
Jurnal ***Rekayasa Elektrika***

VOLUME 13 NOMOR 3

DESEMBER 2017

Desain Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro di Air Terjun Kedung Kayang 161-171

Dedi Nugroho, Agus Suprajitno, dan Gunawan

JRE	Vol. 13	No. 3	Hal 119-190	Banda Aceh, Desember 2017	ISSN. 1412-4785 e-ISSN. 2252-620X
-----	---------	-------	-------------	------------------------------	--------------------------------------

Desain Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro di Air Terjun Kedung Kayang

Dedi Nugroho, Agus Suprajitno, dan Gunawan
Jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung
Jl. Raya Kaligawe km.04, Semarang 50112
e-mail: dedinugroho66@gmail.com

Abstrak—Air terjun Kedung Kayang terletak di perbatasan Kabupaten Magelang dan Boyolali Jawa Tengah, memiliki tinggi jatuh air 38 meter, sehingga memiliki potensi untuk digunakan sebagai penggerak pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). Untuk mendesain PLTMH di lokasi tersebut diperlukan sejumlah bidang kajian, di antaranya hidrologi, sipil, mekanikal, dan elektrikal. Tujuan riset ini adalah memprediksi jumlah debit air andalan, menentukan potensi daya air, pemilihan jalur PLTMH, desain turbin air dan generator. Riset ini menggunakan metode Penman Modifikasi untuk menghitung evapotranspirasi, metode Mock untuk debit air andalan, pemetaan geografis untuk pemilihan jalur PLTMH dan perhitungan desain turbin cross flow. Makalah ini menyajikan hasil riset desain PLTMH berupa kapasitas daya nominal PLTMH, pemilihan jalur PLTMH, desain pipa penstock, turbin cross flow, dan generator listrik. Berdasarkan hasil riset diketahui debit air andalan 0,143 m³/detik, head efektif 19,5 meter, potensi daya air 27,33 kW dan daya listrik yang dapat dihasilkan 18 kW, panjang dan diameter penstock 81,74 m dan 26,77 cm, turbin air digunakan tipe cross flow dengan diameter luar runner 17,17 cm diameter dalam 11,45 cm dan lebar 59,16 cm. Jalur PLTMH berada didesa Klakah Kecamatan Selo Kabupaten Boyolali.

Kata kunci: *PLTMH, debit air, turbin cross flow, mikrohidro, penstock*

Abstract—Kedung Kayang waterfall is located on the border of Magelang and Boyolali regency of Central Java. The waterfall is 38 meters high, so it has the potential to be used as a micro hydro power plant (MHP). In designing the MHP, it requires some studies including hydrology, civil, mechanical, and electrical. The purpose of this research is to predict the water discharge, determine the potential of hydro power, selection of MHP sites, design of hydro turbine and electric generator. This research uses Penman Modification method to calculate evapotranspiration, Mock method to calculate water discharge, geographical mapping for MHP sites selection and cross-flow turbine design calculation. This paper presents the results of MHP design consist of MHP capacity, selection of MHP sites, penstock design, cross-flow turbine design and electric generator selection. The result showed that dependable water discharge is 0.143 m³ / sec, effective head is 19.5 meters, hydro potential is 27.33 kW, and electric power that can be produced is 18 kW, length and diameter penstock are 81.74 m and 26.77 m, hydro turbine used cross flow type with outer diameter of the runner is 17.17 cm, inner diameter is 11.45 cm and width is 59.16 cm. MHP site is located in Klakah village, Selo Sub-district, Boyolali District.

Keywords: *MHP, water discharge, cross flow turbine, micro hydro, penstock*

Copyright © 2017 Jurnal Rekayasa Elektroika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Merujuk pada kebijakan pemerintah tentang diversifikasi energi dan konservasi energi, maka perlu dilakukan penggalian sumber daya energi baru dan terbarukan. Salah satu bentuk energi ini yang memiliki potensi besar adalah energi air. Berdasarkan data kementerian ESDM bahwa potensi energi air Indonesia mencapai 75.000 MW dan baru sekitar 10% saja yang telah diberdayakan. Salah satu pemanfaatan potensi energi air adalah PLTMH (Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro). Jenis pembangkit ini memiliki kelebihan yaitu dapat langsung menggunakan aliran sungai (*runoff*) tanpa perlu membuat bendungan dan waduk, sehingga

kontruksinya sederhana, murah, dan cocok digunakan didaerah pedesaan atau terpencil yang memiliki potensi energi air. Air terjun Kedung Kayang merupakan air terjun dengan ketinggian 38 meter terletak didaerah perbatasan antara desa Wonolelo Kecamatan Sawangan Kabupaten Magelang dan desa Klakah Kecamatan Selo Kabupaten Boyolali dengan daerah tangkapan air meliputi kaki gunung Merbabu dan Merapi. Menurut penduduk setempat air ini tetap mengalir walaupun pada musim kemarau panjang, oleh karena itu perlu dikaji potensi energi air yang ada untuk dapat dimanfaatkan sebagai penggerak pembangkit listrik tenaga mikrohidro.

II. STUDI PUSTAKA

PLTMH adalah pembangkit listrik berskala kecil (< 100 kW). Secara umum bangunan PLTMH terdiri atas bangunan ambil air (*intake weir*), bak pengendap (*settling basin*), saluran atas (*headrace/channel*), bak penenang (*forebay tank*), pipa pesat (*penstock*), *Power house* (turbin air dan generator), dan saluran pembuangan (*tailrace*) seperti ditunjukkan pada Gambar 1 [1].

A. Perhitungan Daya

Daya yang dapat dibangkitkan oleh PLTMH sangat tergantung oleh ketinggian jatuh (*head*) efektif air dan banyaknya debit air sungai yang digunakan untuk menggerakkan turbin air. Estimasi perhitungan daya meliputi daya potensi air, daya turbin, daya transmisi mekanik, dan daya generator. Rumus-rumus perhitungan daya [2] diberikan dalam persamaan-persamaan di bawah ini.

Daya potensi air :

$$P_{\text{hydro}} = g H_{\text{eff}} Q \text{ (kW)} \quad (1)$$

dengan $g = 9,8$ m/detik², $H_{\text{eff}} = \text{Head}$ efektif (meter), dan $Q = \text{debit}$ air (m³/detik).

Daya pada turbin adalah :

$$P_{\text{turbin}} = \eta_t \cdot g \cdot H_{\text{eff}} \cdot Q \text{ (kW)}, \quad (2)$$

$$P_{\text{turbin}} = \eta_t \cdot P_{\text{hydro}} \text{ (kW)} \quad (3)$$

dengan $\eta_t = \text{efisiensi turbin}$ (0,8–0,95).

Daya transmisi mekanik

$$P_{\text{transmisi}} = \eta_t \eta_{tr} g H_{\text{eff}} Q \text{ (kW)}, \quad (4)$$

$$P_{\text{transmisi}} = \eta_{tr} \cdot P_{\text{turbin}} \text{ (kW)}, \quad (5)$$

dengan $\eta_{tr} = \text{efisiensi transmisi}$ (0,98 untuk flat belt dan 0,95 untuk V belt).

Daya yang dihasilkan generator:

$$P_{\text{generator}} = \eta_g \eta_t \eta_{tr} \cdot g \cdot H_{\text{eff}} \cdot Q \text{ (kW)}, \quad (6)$$

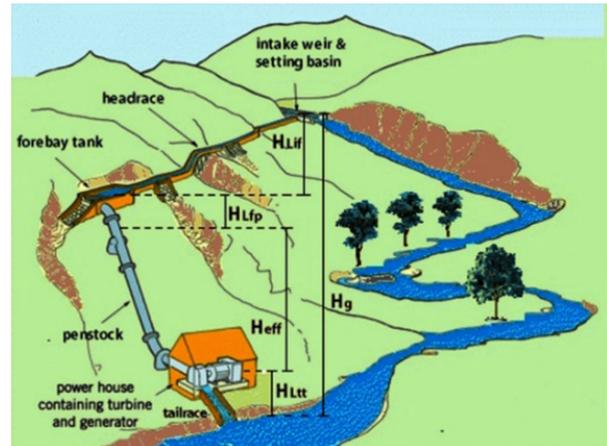
$$P_{\text{generator}} = \eta_g P_{\text{transmisi}} \text{ (kW)}, \quad (7)$$

dengan $\eta_g = \text{efisiensi generator}$ (0,8–0,95).

B. Tinggi Jatuh Efektif

Tinggi jatuh air (*head*) efektif adalah tinggi jatuh air yang berguna untuk memutar turbin air dan menghasilkan energi mekanik rotasi. Tinggi jatuh efektif ini diperoleh dari tinggi kotor jatuh air (*head gross/Hg*) dikurangi jumlah total rugi-tugi tinggi jatuh air (*head loss*) yang terdiri atas rugi tinggi jatuh air antara *intake-forebay* (H_{Lif}), rugi tinggi jatuh air akibat gesekan air pada permukaan dalam pipa pesat (H_{Lfp}) dan rugi tinggi jatuh air antara bangunan turbin dan *tailrace* (H_{Ltt}).

Tinggi jatuh air efektif [1]:



Gambar 1. Bangunan PLTMH

$$H_{\text{eff}} = H_g - H_{Lif} - H_{Lfp} - H_{Ltt} \text{ (m)}. \quad (8)$$

C. Pipa Pesat

Pipa pesat berguna untuk mengubah energi potensial air menjadi energi kinetik yang digunakan untuk menggerakkan turbin air, oleh karena itu penentuan kapasitas pipa pesat harus sesuai dengan besarnya debit air yang ada. Parameter terpenting dalam penentuan pipa pesat adalah diameter, panjang, dan ketebalan. Panjang pipa disesuaikan dengan desain PLTMH untuk mendapatkan head yang tinggi.

Kecepatan air dalam pipa pesat [2] adalah:

$$V_p = 0,125 \sqrt{2gh} \text{ (m/s)}. \quad (9)$$

Untuk menentukan diameter dan penampang pipa pesat dihitung sebagai berikut [3]:

Diameter pipa pesat :

$$D = \sqrt{\frac{4Q_p}{V_p}}. \quad (10)$$

Penampang pipa :

$$A_p = \frac{Q_p}{V_p} \text{ (m}^2\text{)}. \quad (11)$$

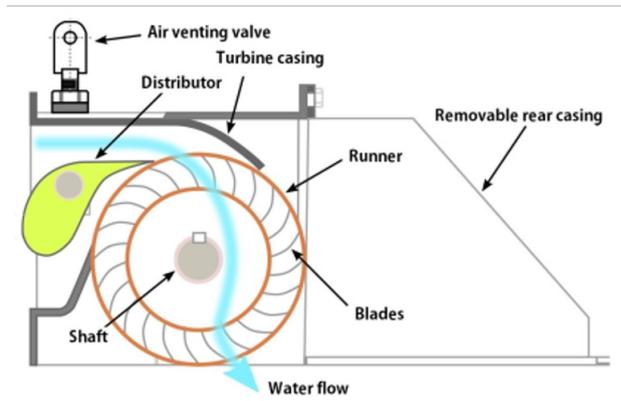
Ketebalan pipa pesat harus diperhitungkan mengingat tekanan air yang cukup besar dalam pipa, oleh karena itu ketebalan minimum dihitung sebagai berikut [4]:

$$t_{\text{min}} = \frac{508 + D}{400} \text{ (mm)}. \quad (12)$$

Rugi head dalam pipa pesat merupakan rugi tinggi jatuh akibat gesekan air pada permukaan pipa yang nilainya adalah [5]:

$$H_{Lfp} = 10,29 \frac{n^2 Q^2 L}{D^{5,3}}. \quad (13)$$

dengan n adalah koefisien manning yang bernilai antara 0,009–0,014 tergantung pada jenis bahan pipa, D adalah diameter pipa (meter), dan L panjang pipa (meter).



Gambar 2. Turbin cross flow

D. Turbin Cross Flow

Turbin air *Cross flow* merupakan turbin impuls radial dengan aliran air melintasi sudu gerak turbin sebanyak dua kali sebelum aliran air ini meninggalkan turbin (Gambar 2). Turbin ini dikembangkan oleh Banki dan Mitchell dengan tujuan untuk memperoleh turbin yang sederhana dan murah, oleh karena itu turbin ini banyak digunakan dalam PLTMH.

Agar turbin ini dapat bekerja optimal sesuai dengan kapasitas daya yang telah direncanakan, maka perlu didesain dimensi turbin. Masalah terpenting dalam desain ini adalah perhitungan dimensi *runner* turbin meliputi diameter, lebar jarak antar sudu dan jumlah sudu dalam *runner*. Aliran air masuk melalui impeler A dan memukul blade AB kemudian melalui bagian dalam *runner* dan memukul blade CD untuk selanjutnya keluar dari *runner* (Gambar 3).

Kecepatan air sebelum masuk ke impeler A [6] adalah

$$V_1 = C\sqrt{2gH} \text{ (m/s)}, \tag{14}$$

dengan C adalah koefisien kecepatan (0,95 ≤ C ≤ 0,98).

Kecepatan spesifik turbin [5]:

$$N_s = N \frac{\sqrt{P}}{H^{5/4}}, \tag{15}$$

dengan N = kecepatan putaran turbin (rpm).

Kecepatan spesifik turbin *cross flow* (Kpordze & wamick 1983) :

$$N_s = \frac{513,25}{H^{0.505}}. \tag{16}$$

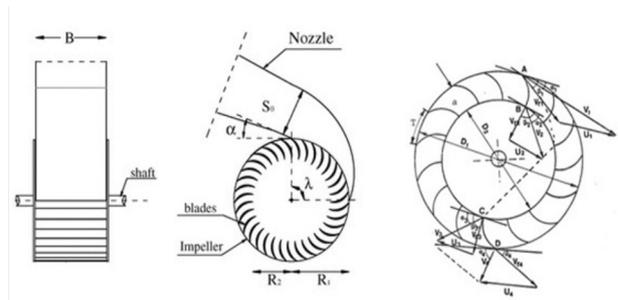
Kecepatan tangensial keliling luar *runner* [7] adalah:

$$u_1 = \frac{V_1 \cos \alpha_1}{2} \text{ (m/s)}. \tag{17}$$

dengan α_1 adalah sudut antara keliling dalam *runner* dan kecepatan absolut air masuk ke impeler (sudut serang), umumnya $\alpha_1 = 16^\circ$.

Perhitungan diameter dan radius *runner* turbin *cross flow* sebagai berikut [7]:

Diameter luar *runner*:



Gambar 3. Runner turbin cross flow

$$u_1 = \frac{V_1 \cos \alpha_1}{2} = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot N}{60}, \tag{18}$$

$$D_1 = \frac{60u_1}{\pi N} \text{ (m)}. \tag{19}$$

Radius luar *runner*:

$$R_1 = \frac{D_1}{2} \text{ (m)}. \tag{20}$$

Diameter dalam *runner* :

$$D_2 = \frac{2}{3} D_1 \text{ (m)}. \tag{21}$$

Radius dalam *runner* :

$$R_2 = \frac{D_2}{2} \text{ (m)}. \tag{22}$$

Lebar *runner* dapat ditentukan sebagai berikut [6] :

$$L = \frac{Q}{kD_1c\sqrt{2gH}} = \frac{Q}{kD_1V_1} \text{ (m)}. \tag{23}$$

dengan $k = 0.075$.

Tebal semburan nozel :

$$S_1 = \frac{Q}{Lc\sqrt{2gH}} = \frac{Q}{LV_1} = kD_1 \text{ (m)}. \tag{24}$$

Jarak antar sudu :

$$t_1 = \frac{S_1}{\sin \beta_1} = \frac{kD_1}{\sin \beta_1} \text{ (m)}. \tag{25}$$

Sudut sudu keluaran air dihitung dengan :

$$\tan \beta_1 = 2 \tan \alpha_1, \tag{26}$$

Dengan β_1 sebagai sudut antara keliling dalam *runner* dan kecepatan relatif air masuk *impeler*, umumnya $\beta_1 = 30^\circ$.

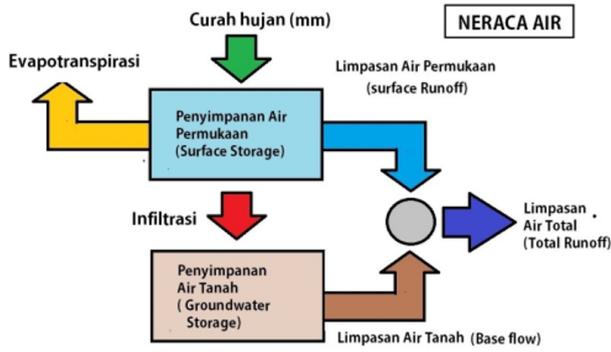
Radius kelengkungan sudu:

$$R_b = \frac{R_1^2 - R_2^2}{2R_1 \cos \beta_1} \text{ (m)}. \tag{27}$$

Jumlah sudu dalam *runner* adalah:

$$n = \frac{\pi D_1}{t_1}. \tag{28}$$

Efisiensi turbin *cross flow* [8] adalah:



Gambar 4. Neraca air (Metode Mock)

$$\eta = \frac{2C^2 U_1 \left(1 + \frac{\psi \cos \beta_2}{\cos \beta_1} \right) \left(\cos \alpha_1 - \frac{U_1}{V_1} \right)}{V_1} \quad (29)$$

dengan ψ adalah koefisien kekasaran sudu (0,98) dan β_2 sudut antara keliling dalam *runner* dan kecepatan relatif air keluar *impeler*.

Torsi turbin air:

$$T_{turbin} = \frac{P_{turbin}}{2\pi N_{turbin}} \quad (30)$$

E. Studi Hidrologi

Studi ini berguna untuk menentukan debit air andalan. Untuk menghitung debit air andalan diperlukan sejumlah data seperti curah hujan, hari hujan, kelembaban, temperatur, kecepatan angin, elevasi, letak koordinat, penyinaran matahari dan sebagainya.

Ada beberapa metode dalam menentukan debit air, salah satunya yang banyak digunakan adalah metode Mock. Prinsip dasar metode ini berdasarkan neraca air seperti ditunjukkan pada Gambar 4.

Keseimbangan air menyatakan bahwa curah hujan yang turun ke permukaan bumi sama dengan evapotranspirasi aktual ditambah dengan perubahan penyimpanan air tanah dan limpasan air total di bumi.

Keseimbangan air dirumuskan pada (31),

$$R = E + \Delta GS + TRO \quad (\text{mm}), \quad (31)$$

dengan R adalah curah hujan (mm), E evapotranspirasi aktual (mm), ΔGS adalah *Groundwater Storage change* (mm), dan TRO limpasan air total (mm).

F. Evapotranspirasi

Evapotranspirasi adalah Proses penguapan air permukaan (danau, laut) ke atmosfer dan penguapan yang berasal dari tumbuh-tumbuhan secara langsung ke atmosfer.

Untuk menentukan evapotranspirasi potensial dalam riset ini digunakan metode Penman modifikasi. Perhitungan evapotranspirasi dan perhitungan-perhitungan limpasan

air sungai dan debit air menggunakan rumus-rumus di bawah ini [9].

Evapotranspirasi potensial:

$$Eto = c \cdot (w \cdot R_n + (1 - w) f(u) (e_a - e_d)) \quad (\text{mm}), \quad (32)$$

dengan c adalah faktor yang mempengaruhi perbandingan antara kecepatan angin siang dan malam hari, w faktor pembobot yang berkaitan dengan elevasi dan temperatur udara, R_n adalah besar radiasi bersih yang akan menghasilkan evaporasi, $f(u)$ sebagai fungsi kecepatan angin, e_a tekanan uap jenuh, dan e_d tekanan uap aktual.

Evapotranspirasi aktual:

$$E = Eto - E \quad (\text{mm}), \quad (33)$$

$$E = (m - 20)(n - 18), \quad (34)$$

dengan Eto adalah evapotranspirasi potensial (mm), m persentase *exposed surface*, dan n jumlah hari hujan.

G. Metode Mock

Air hujan yang mencapai permukaan tanah:

$$As = R - E \quad (\text{mm}), \quad (35)$$

dengan R curah hujan bulanan (mm) dan E adalah Evapotranspirasi aktual (mm).

Penyimpanan kelembaban tanah:

$$SMS = ISM + R - E \quad (\text{mm}), \quad (36)$$

dengan ISM = kelembapan tanah awal (mm).

Water surplus (kelebihan air):

$$Ws = ISM + R - E - SMC \quad (\text{mm}), \quad (37)$$

$$Ws = SMS - SMC \quad (\text{mm}), \quad (38)$$

dengan SMC sebagai kapasitas kelembaban tanah (200 mm, untuk tegalan/hutan).

Infiltrasi (penyerapan air)

$$Infil = W_s \cdot C_i \quad (\text{mm}), \quad (39)$$

dengan W_s adalah Water surplus dan C_i koefisien infiltrasi (0,3–0,5).

Volume penyimpanan air tanah:

$$V(n) = k \cdot V(n-1) + 0,5(1-k) Infil \quad (\text{mm}), \quad (40)$$

dengan k = faktor ressi aliran tanah, $V(n-1)$ = volume air bulan lalu, $V(n)$ = volume air bulan sekarang, $Infil$ = Infiltrasi air.

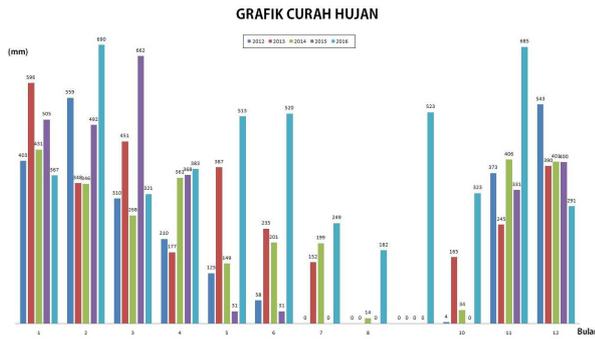
Perubahan penyimpanan air tanah:

$$\Delta V = V(n) - V(n-1). \quad (41)$$

Limpasan air dasar:

$$Q_{base\ flow} = Infil - \Delta Vn \quad (\text{mm}). \quad (42)$$

Limpasan air permukaan:



Gambar 5. Grafik curah hujan tahun 2012-2016

$$Q_{direct \text{ --} runoff} = WS - Infil \text{ (mm)}. \quad (43)$$

Limpasan air sungai:

$$Q_{runoff} = Q_{base \text{ flow}} + Q_{direct \text{ --} runoff} \text{ (mm)}. \quad (44)$$

Perhitungan debit air adalah [10]:

$$Q = (Q_{runoff} \times A) / \text{satu bulan dalam detik} \text{ (m}^3/\text{s)}. \quad (45)$$

dengan A = luas daerah aliran sungai (km²).

H. Debit Air Andalan

Debit air andalan adalah debit minimum sungai kemungkinan debit dapat dipenuhi ditetapkan 80%, sehingga kemungkinan debit sungai lebih rendah dari debit andalan sebesar 20%. Berdasarkan hasil analisis melalui metode Mock menurut tahun pengamatan yang diperoleh, harus diurut dari terbesar ke terkecil kemudian dihitung tingkat keandalan debit tersebut berdasarkan probabilitas kejadian mengikuti rumus Weibull [11].

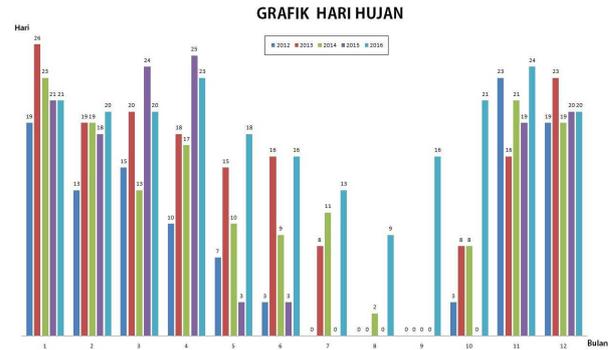
$$P = \frac{m}{n+1} \times 100\%, \quad (46)$$

dengan P = Probabilitas terjadinya kumpulan nilai yang diharapkan selama perioda pengamatan (%), m = nomor urut kejadian dengan urutan dari besar ke kecil, dan n = jumlah data.

III. METODE

Metode penelitian diawali dengan mengumpulkan data-data sekunder (2012-2016) meliputi data-data historis curah hujan, hari hujan, kelembaban, temperatur udara, dan kecepatan angin, dan topografi. Pengumpulan data-data primer dilakukan melalui pengamatan langsung di obyek penelitian untuk mengetahui kondisi letak geografis guna menentukan jalur PLTMH yang ideal. Secara ringkas alur penelitian adalah sebagai berikut:

1. Pengumpulan data-data sekunder diambil dari stasiun hujan Sawangan Magelang.
2. Menghitung evapotranspirasi.



Gambar 6. Grafik hari hujan tahun 2012-2016

3. Menghitung neraca air, debit air dan debit air andalan.
4. Menentukan lokasi dan merancang jalur PLTMH, menghitung dimensi penstock, rugi-rugi head, dan head efektif.
5. Menghitung potensi daya air, menentukan daya turbin PLTMH, daya generator listrik, dimensi turbin air crossflow dan dimensi generator.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kajian Hidrologi

Data-data curah hujan dan hari hujan (Gambar 5 dan 6) merupakan parameter terpenting dalam menentukan debit air sungai. Oleh karena itu data-data ini diambil dari stasiun terdekat dengan lokasi air terjun Kedung Kayang yaitu stasiun hujan Sawangan Magelang. Data-data diambil dalam kurun waktu 2012-2016 untuk memperoleh karakteristik curah hujan agar hasil estimasi lebih akurat (Tabel 1). Data-data curah hujan dan hari hujan diperlihatkan dalam Gambar 5 dan 6. Agar dapat mengetahui neraca air, harus dihitung terlebih dahulu evapotranspirasi, dalam riset ini dipakai metode Penman modifikasi, sedangkan neraca air digunakan metode Mock. Hasil perhitungan ditunjukkan dalam Gambar 7–11 yang memperlihatkan neraca air 2012–2016.

Berdasarkan grafik neraca air terlihat bulan-bulan kering yang lama terjadi pada tahun 2012 dan 2015, sedangkan bulan-bulan kering yang pendek terjadi pada tahun 2013 dan 2014. Pada tahun 2016 terjadi perubahan curah hujan yang ekstrim dimana setiap bulan sepanjang tahun terjadi hujan, sehingga tidak terjadi bulan-bulan kering.

Dalam grafik terlihat walaupun terjadi bulan-bulan kering yang lama, namun limpasan air sungai tetap mengalir karena air dalam tanah tetap mengalir walaupun debitnya menurun secara signifikan, oleh karena itu didalam perancangan PLTMH perlu dihitung debit andalan yang dapat menjamin PLTMH tetap beroperasi walaupun pada bulan-bulan kering sekalipun. Gambar 12 menunjukkan kondisi debit air pada musim kemarau.

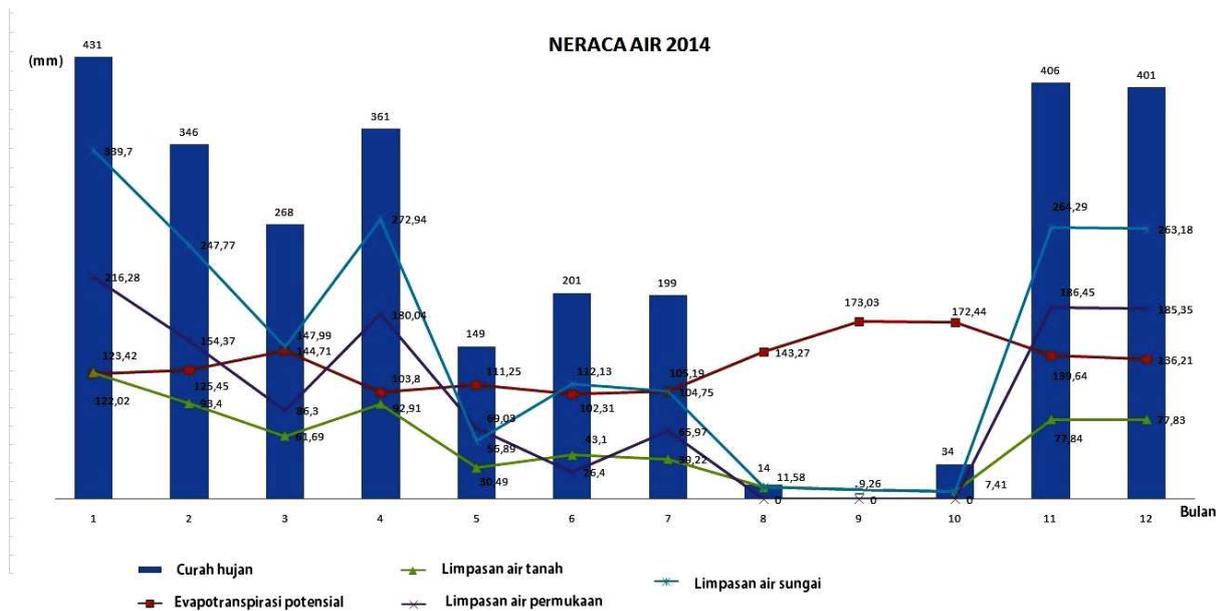
Agar dapat menghitung debit air sungai, maka nilai limpasan air sungai dikalikan dengan luas daerah aliran



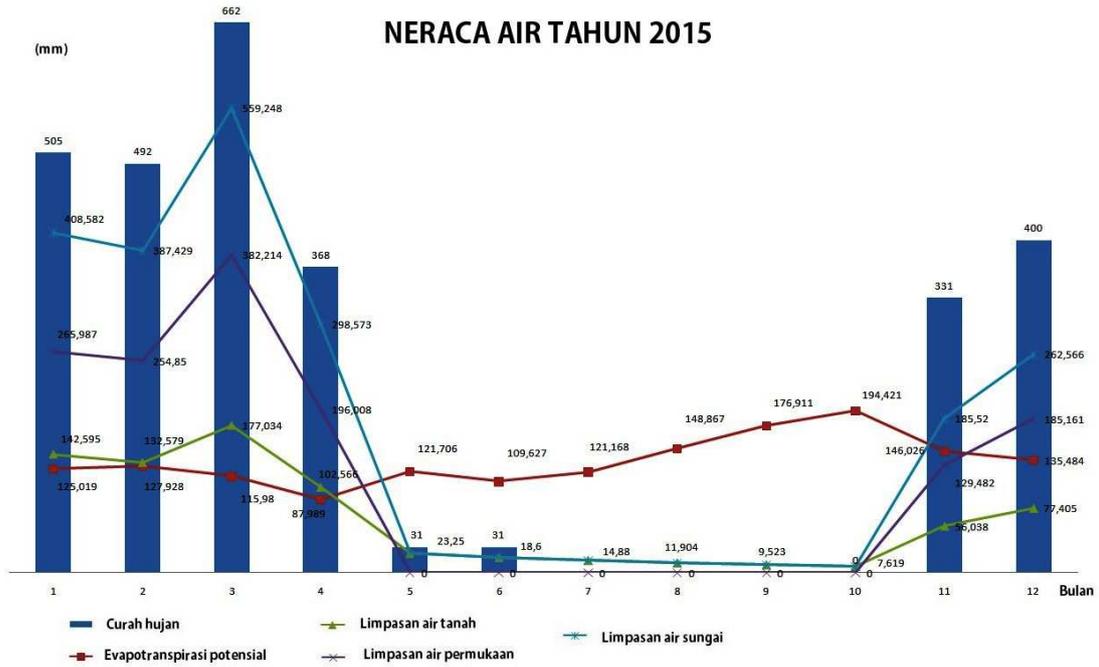
Gambar 7. Grafik neraca air tahun 2012



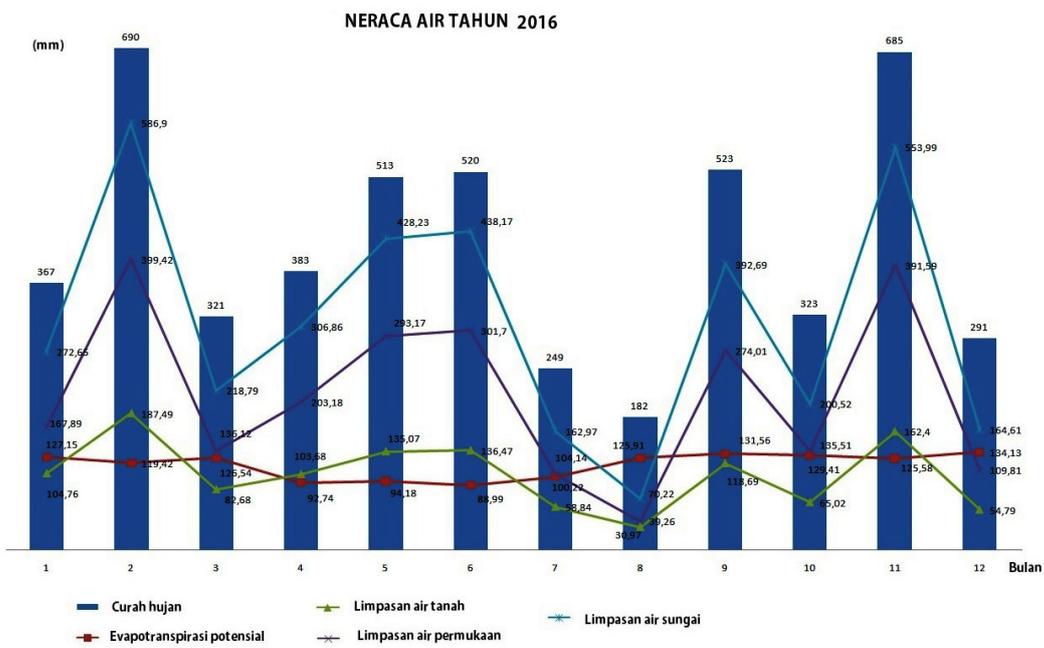
Gambar 8. Grafik neraca air tahun 2013



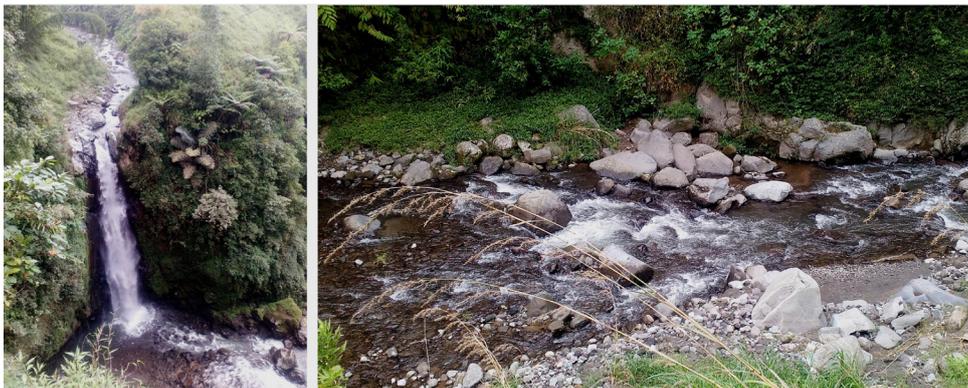
Gambar 9. Grafik neraca air tahun 2014



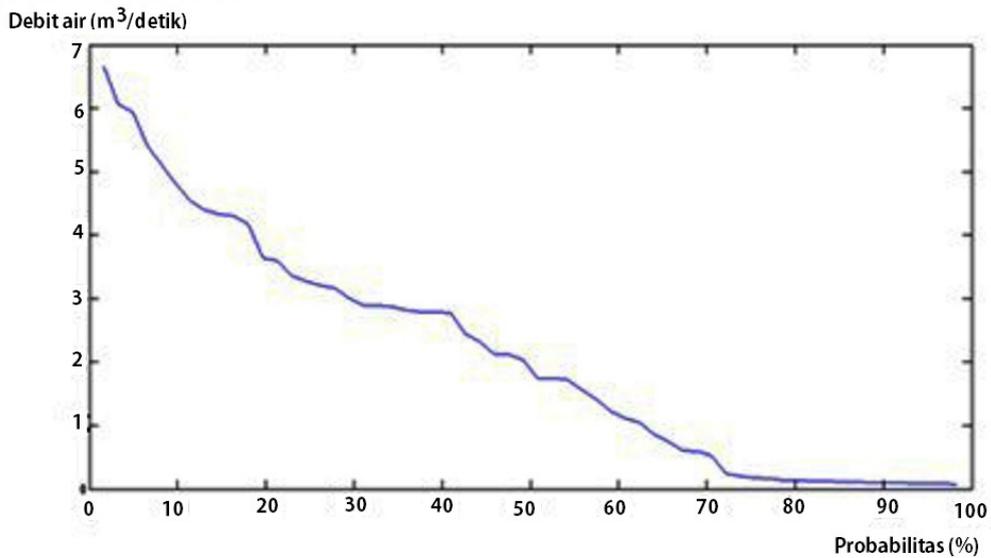
Gambar 10. Grafik neraca air tahun 2015



Gambar 11. Grafik neraca air tahun 2016



Gambar 12. Debit air pada musim kemarau



Gambar 13. Flow duration curve



Gambar 14. Rencana jalur PLTMH

sungai (DAS). Dalam kasus ini luas daerah aliran sungai adalah 28,4 km².

Untuk mencari debit andalan, dapat digunakan metoda probabilitas *weibull*. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh *Flow Duration Curve* seperti diperlihatkan dalam Gambar 13.

Merujuk pada rekomendasi dari pedoman studi kelayakan hidrologi, bahwa probabilitas debit air andalan untuk PLTMH adalah 80%, maka berdasarkan kurva di atas dapat ditentukan besarnya debit air andalan untuk air terjun Kedung Kayang adalah 0,143 m³ / detik.

B. Perencanaan Jalur PLTMH

Melalui pengamatan terhadap letak geografis dan elevasinya, maka jalur PLTMH yang direncanakan melalui desa Klakah, Kecamatan Selo, Kabupaten Boyolali. Jalur yang direncanakan terlihat dalam Gambar 14.

Berdasarkan pengukuran ketinggian pada jalur PLTMH

yang direncanakan, maka ketinggian permukaan sungai di bagian atas adalah 1022 mdpl, sedangkan di bagian bawah 990 mdpl, sehingga terdapat beda tinggi 32 meter. Panjang jalur PLTMH yang direncanakan adalah sekitar 275 meter. Jalur PLTMH secara garis besar terdiri atas jalur antara *intake weir* sampai ke *penstock* yang memiliki panjang 191 meter dan jalur antara *penstock* menuju *power house* dengan panjang 79 meter. Ketinggian *forebay tank* diambil ketinggian 1015 mdpl, atau memiliki ketinggian 25 meter dari permukaan *forebay tank* ke *tailrace*.

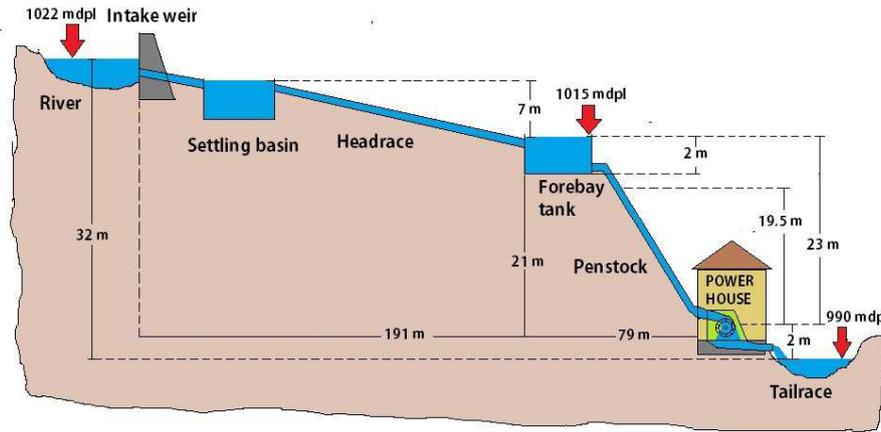
C. Desain Penstock

Dengan tinggi *penstock* 21 meter, maka diperoleh panjang *penstock* 81,74 meter.

Kecepatan aliran air dalam pipa *penstock*:

$$V_p = 0,125 \sqrt{2gh} = 0,125 \sqrt{2(9,8)(21)} = 2,54 \text{ (m/s)}$$

Luas penampang pipa *p*



Gambar 15. Ketinggian dan jarak bangunan PLTMH

Tabel 1. Debit air sungai 2012 - 2016

BULAN	DEBIT AIR (m ³ / detik)				
	2012	2013	2014	2015	2016
Januari	3,210	5,407	3,602	4,332	2,891
Februari	5,119	2,869	2,809	4,392	6,652
Maret	2,118	3,631	1,569	5,930	2,320
April	1,415	0,866	2,991	3,271	3,362
Mei	0,527	3,165	0,603	0,247	4,541
Juni	0,181	1,746	1,229	0,204	4,801
Juli	0,140	0,593	1,115	0,158	1,728
Agustus	0,112	0,134	0,123	0,126	0,745
September	0,093	0,111	0,102	0,104	4,303
Oktober	0,072	0,085	0,079	0,081	2,126
November	2,443	1,047	2,896	2,003	6,070
Desember	4,179	2,779	2,791	2,784	1,745

$$A_p = \frac{Q_p}{V_p} = \frac{0,143}{2,54} = 0,056 \text{ m}^2.$$

Diameter pipa penstock:

$$D = \sqrt{\frac{4Q_p}{V_p}} = \sqrt{\frac{4(0,143)}{3,14(2,54)}} = 26,77 \text{ cm.}$$

Rugi head penstock (bahan PE, n = 0,009):

$$D = \sqrt{\frac{4Q_p}{V_p}} = \sqrt{\frac{4(0,143)}{3,14(2,54)}} = 26,77 \text{ cm.}$$

Tebal minimum pipa penstock adalah:

$$H_{Lfp} = 10,29 \frac{n^2 Q^2 L}{D^{5,3}}.$$

Head efektif: 21 – 1,504 = 19,5 meter.

D. Perhitungan Daya

Dengan asumsi efisiensi turbin, transmisi mekanik dan generator masing-masing 0,8; 0,95; dan 0,9 maka:

a. Daya potensi air:

$$P_{air} = 9,8Q H_{eff} = 9,8(0,143)(19,5) = 27,33 \text{ kW.}$$

b. Daya turbin:

$$P_{turbin} = \eta_{turbin} P_{air} = 0,8(27,33) = 21,86 \text{ kW}$$

c. Daya transmisi mekanik:

$$P_{transmisi} = 0,95 P_{turbin} = 0,95(21,86) = 20,77 \text{ kW}$$

d. Daya listrik :

$$P_{generator} = 0,9 P_{transmisi} = 0,9(20,77) = 18,69 \text{ kW.}$$

E. Kajian Mekanik

Kajian ini meliputi perancangan turbin air dan sistem transmisi mekaniknya. Berdasarkan head efektif (19,4 m), kecepatan air dalam penstock (2,54 m/detik) dan dengan mempertimbangkan segi ekonomi, maka turbin air yang digunakan adalah turbin air cross flow karena memiliki karakteristik yang cocok dan biaya yang ekonomis.

F. Desain Turbin Cross Flow

Kecepatan air masuk impeler turbin:

$$V_1 = C\sqrt{2gH} = 0,96\sqrt{2(9,8)(19,5)} = 18,77 \text{ (m/s).}$$

Kecepatan spesifik turbin air cross flow (Kpordze & wamick):

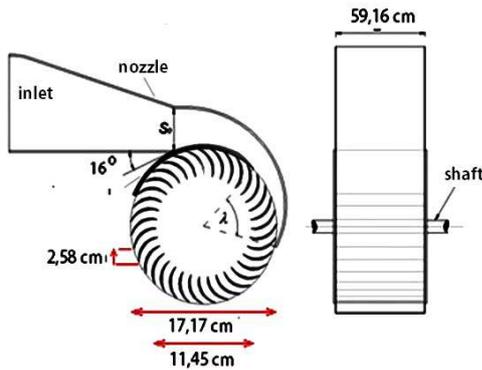
$$N_s = \frac{513,25}{H^{0,505}} = \frac{513,25}{19,5^{0,505}} = 114,5.$$

Kecepatan turbin:

$$N = \frac{N_s H^{5/4}}{\sqrt{P}} = \frac{114,5(19,5^{5/4})}{\sqrt{21,86}} = 1003,5 \text{ rpm.}$$

Asumsi: Sudut serang air $\alpha_1 = 16^\circ$.

Kecepatan keliling air:



Gambar 16. Desain turbin cross flow

$$u_1 = \frac{V_1 \cos \alpha_1}{2} = \frac{18,77 \cos 16^\circ}{2} = 9,02 \text{ m/s.}$$

Diameter luar runner:

$$D_1 = \frac{60u_1}{N} = \frac{60(9,02)}{3,14(1003,5)} = 0,1717 \text{ m} = 17,17 \text{ cm.}$$

Radius luar runner:

$$R_1 = \frac{D_1}{2} = \frac{17,17}{2} = 8,59 \text{ cm.}$$

Diameter dalam runner:

$$D_2 = \frac{2}{3} D_1 = \frac{2}{3} (17,17) = 11,45 \text{ cm.}$$

Radius dalam runner:

$$R_2 = \frac{D_2}{2} = \frac{11,45}{2} = 5,72 \text{ cm.}$$

Lebar runner:

$$L = \frac{Q}{kD_1V_1} = \frac{0,143}{(0,075)(0,11717)(18,77)} = 59,16 \text{ cm,}$$

dengan $k = 0,075$.

Tebal semburan nozel :

$$S_1 = kD_1 = 0,075(0,1717) = 1,29 \text{ cm, dan}$$

$$\tan \beta = 2 \tan 16^\circ, \longrightarrow \beta = 30^\circ.$$

Jarak antar sudu:

$$t_1 = \frac{0,0129}{\sin 30^\circ} = 2,58 \text{ cm.}$$

Radius kelengkungan sudu:

$$R_b = \frac{R_1^2 - R_2^2}{2R_1 \cos \beta} = \frac{8,59^2 - 5,72^2}{2(8,59) \cos 30^\circ} = 2,76 \text{ cm.}$$

Jumlah sudu dalam runner:

$$n = \frac{D_1}{t_1} = \frac{3,14(17,17)}{2,58} = 21 \text{ buah.}$$

Efisiensi turbin air:

$$\eta = \frac{2C^2 U_1 \left(1 + \frac{\psi \cos \beta_2}{\cos \beta_1}\right) \left(\cos \alpha_1 - \frac{U_1}{V_1}\right)}{V_1}, \quad (29)$$

dengan, $\beta_1 = \beta_2$ maka:

$$\eta = \frac{2(0,96)^2 9,02(1 + 0,98) \left(\cos 16^\circ - \frac{9,02}{18,77}\right)}{18,77} = 0,84 \text{ atau } 84\%$$

• Torsi turbin air:

Daya keluar turbin 21,86 kW dan Kecepatan putaran turbin 1003,5 rpm, maka torsi turbin air adalah:

G. Sistem Transmisi Mekanik

Sistem transmisi mekanik adalah sistem yang mentransfer energi putaran yang dihasilkan turbin ke generator listrik. Dalam desain ini menggunakan pulley dan van belt. Untuk kecepatan generator 1500 rpm, maka rasio kecepatan adalah:

$$n_r = \frac{ng}{nr} = \frac{1500}{1003,3} = 1,5.$$

Jika diameter pulley generator 4 inchi = 10,16 cm, diameter pulley turbin = 10,16 x 1,5 = 15,24 cm = 5 inchi.

H. Generator Listrik

Daya listrik (daya nyata) yang dihasilkan oleh PLTMH ini adalah 18,69 kW. Daya ini merupakan daya keluaran generator listrik berdasarkan hasil perhitungan daya. Dengan asumsi $\cos \phi = 0,8$, maka kapasitas daya semu generator adalah :

$$S = \frac{P}{\cos \phi} = 23,36 \text{ kVA.}$$

Pemilihan desain generator sinkron dapat berupa generator 1 fasa maupun 3 fasa.

a. Jika dipilih generator sinkron 1 fasa dan apabila diinginkan tegangan generator 230 volt (line to neutral), 50 Hz, 1500 rpm, maka kapasitas arus maksimum adalah:

$$I = \frac{S}{V} = \frac{23360}{230} = 101,5 \text{ A.}$$

b. Jika dipilih generator sinkron 3 fasa, dengan tegangan generator 400 Volt (line to line), 50 Hz, 1500 rpm, maka kapasitas arus maksimum generator:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} V} = \frac{23360}{\sqrt{3}(400)} = 33,7 \text{ A.}$$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut diatas terlihat bahwa pemakaian generator 1 fasa akan menarik arus maksimum mencapai 101,5 A, sedangkan untuk generator 1 fasa hanya menarik arus maksimum 33,7 A untuk setiap phasanya. Dengan demikian pemakaian generator 3 fasa lebih menguntungkan karena:

- a. Ukuran dimensi dan berat generator 3 fasa lebih kecil dan ringan dibandingkan generator 1 fasa untuk kapasitas daya yang sama, hal ini disebabkan arus keluaran generator 3 fasa lebih kecil dibandingkan 1 fasa.
- b. Ukuran konduktor yang diperlukan untuk sistem penyaluran daya listrik menjadi lebih kecil dan ringan, sehingga lebih efisien.

Berdasarkan ketersediaan generator sinkron di pasaran maka direkomendasikan penggunaan generator 3 fasa dengan spesifikasi: Generator yang dipakai adalah generator sinkron 3 fasa, 4 pole, 50 Hz, 1500rpm, 22,5 kVA, 18 kW, $\text{pf} = 0,8$, 400 volt, 32,5A

V. KESIMPULAN

Sumber aliran Air terjun Kedung Kayang memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai tenaga penggerak PLTMH. Melalui data historis curah hujan dan hujan harian dalam kurun waktu 2012–2016 dan pengolahan data berdasarkan metode Penman modifikasi dan Mock, maka dapat diprediksi debit air andalan 80% mencapai 0,143 m³/detik. Melalui pemilihan jalur PLTMH dari Desa Klakah Kabupaten Boyolali, diperoleh tinggi jatuh air efektif 19,5 meter yang mampu menghasilkan potensi daya air 27.33 kW dan memproduksi daya listrik sebesar 18,69 kW. Turbin air yang digunakan adalah jenis *Cross flow* dengan diameter *runner* luar 17,17 cm dan dalam 11,45 cm, jumlah sudu 21 buah, lebar *runner* 59,16 cm dan sudut serang 16⁰, kecepatan 1000 rpm. Generator dipilih 18 kW, 22,5 kVA, 1500 rpm, 50Hz, 400 volt. Jadi kapasitas PLTMH adalah 22,5 kVA, 32,5 ampere.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kemenristek Dikti yang telah mendukung dan mendanai penelitian ini melalui pendanaan hibah penelitian.

REFERENSI

- [1] Handi Wibowo, dkk “ Kajian Teknis dan Ekonomi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) di Sungai Lematang Kota Pagar Alam , “ *Jurnal ilmiah Cantilever* , vol. 4 No.1, hal 34-41, ISSN : 1907 – 4247, 2015.
- [2] Parabelem T.D. Rompas , “ Analisis Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) pada Daerah Aliran Sungai Ongkak Mongondow di desa Muntoi Kabupaten Bolaang Mongondow, “ *Jurnal Penelitian Sainstek*, Vol. 16, Nomor 2, Oktober 2011 Universitas Negeri Manado.
- [3] Mafrudin, dan Dwi Irawan “, Pembuatan Turbin Mikrohidro Tipe Cross flow Sebagai Pembangkit Listrik Di Desa Bumu Nabung Timur, “ *Jurnal Turbo*, Vol 3 (2), 2014, Universitas Muhammadiyah Metro.
- [4] Bilal Abdullah Nasir , “ Suitable Selection of Components for The Micro Hydro Electric Power Plant, ” *Advances Energy and Power*, 2(1) : 7 – 12, 2014.
- [5] A.O. Edoja, J.S. Ibrahim , and E.I. Kucha “, Investigation of the Effect of Penstock Configuration of a Simplified Pico Hydro System, “ *British Journal of Applied Science & Technology* 14(5): 1-11-2016, ISSN : 2231-0843
- [6] Zar Ni Tin Win, Htay Htay Wi, Myint Thein ,” Design Contruction and Performance Test of Cross flow Turbine, ” *International Journal Mechanical and Production Engineering*. Vol. 4, 12 Dec, 2016 ISSN 2320-2092
- [7] Alo Khomsah dan Efrita Arfah Zuliari “, Analisa Teori : Performa Turbin Cross flow Sudu Bambu 5 Sebagai Penggerak Mula Generator Induksi 3 Fasa, “ *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan III*, 2015, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya.
- [8] J.A. Chattha, M.S. Khan, “ Standarization of Cross Flow Turbine Design for Typocal Micro Hydro Site Condition in Pakistan, ” *Proceeding of the ASME 2014 Power Conference* , July 28-31 2014, Baltimore, Maryland, USA
- [9] Meri Gustian, Azmeri, dan Alfiansyah Yulianur “, Optimasi Parameter Model DR. Mock Untuk Pengelolaan Daerah Aliran Sungai , “ *Jurnal Teknik Sipil Pasca Sarjana Universitas Syiah Kuala*, pp 36-45, Vol 3. No.1, Februari 2014
- [10] Sri Sukamta , Adhi Kusmantoro , “ Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) di Jantur Tabalas Kalimantan Timur, ” *Jurnal Teknik Elektro*, Vol 5. No.2, edisi Juli –Desember, 2013, ISSN : 1441-0059.
- [11] Zulfikan Indra, M.I. Jasin, dkk ,” Analisis Debit Air Sungai Munte dengan Metode Mock dan Metode Nreca Untuk Kebutuhan Pembangkit Listrik Tenaga Air, ” *Jurnal Sipil Statistik*, Vol 1. No.1 (34-38), 2012.

Penerbit:

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No. 7, Banda Aceh 23111

website: <http://jurnal.unsyiah.ac.id/JRE>

email: rekayasa.elektrika@unsyiah.net

Telp/Fax: (0651) 7554336

