

RANCANG BANGUN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKRO HIDRO TURBIN CROSS-FLOW PADA SUNGAI AYUNG

Sega Awaludin¹, Putu Agus Arcana Surya², Cokorde Gede Indra Partha³,
I Wayan Arta Wijaya⁴

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

²Mahasiswa Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

³Dosen Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

⁴Dosen Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

Jalan Raya Kampus Unud, Jimbaran, Kec. Kuta Selatan, Badung Bali 80361

csega203@gmail.com, agusarcana5@gmail.com, cokindra@unud.ac.id,
artawijaya@unud.ac.id

ABSTRAK

Turbin CrossFlow merupakan jenis turbin yang memanfaatkan energi hidrolik (air) dari aliran Sungai Ayung sebagai sumber daya penggeraknya dan sangat cocok digunakan di tempat yang headnya rendah. Saat ini turbin CrossFlow masih sangat sedikit digunakan di Indonesia khususnya di Bali. Hal ini dikarenakan sulitnya pengukuran yang dilakukan secara langsung dengan melakukan pengujian yang berhubungan dengan parameter-parameter yang berpengaruh dilapangan. Oleh sebab itu perlu dibuatkan PLTMH dengan medan serta debit air yang memadai dan tidak sulit untuk melakukan pengukuran sehingga mendapatkan data yang spesifik. Penelitian ini bertujuan untuk membuat rancangan, mengetahui spesifikasi turbin, menganalisa torsi, kecepatan putaran, tegangan ,arus , daya dan efisiensi yang dihasilkan dari prototype PLTMH dengan turbin CrossFlow. Manfaat penelitian ini juga diharapkan menjadi referensi bagi peneliti selanjutnya untuk melakukan penelitian mengenai PLTMH. Metode yang digunakan pada penelitian ini ialah metode kepustakaan dan metode observasi. Penelitian ini juga membahas kajian analisa dari potensi tenaga air yang ada yaitu, debit aliran air dan tinggi terjunan air (*head*) dari aliran air Sungai Ayung. Perhitungan rancangan turbin mendapatkan ketinggian efektif 6 meter dengan kecepatan air masuk 10,63 m/s dan kecepatan keliling 10,22 m/s menunjukkan bahwa runner memiliki diameter luar 0,15 meter, diameter dalam 0,1 meter, lebar *runner* 0,1 meter, jarak antar sudu 0,026 meter, lebar sudu 0,025 meter, dan total 18 buah sudu. Pengujian *prototype* ini menggunakan debit aliran air sebesar 7 L atau 0,007 bukaan m^3 / s sudut sudu pengarah (*guide vane*) sebesar 30° . *Output* yang dihasilkan pada pengujian tanpa beban didapatkan hasil rata-rata putaran turbin sebelum dikopel generator sebesar 539 rpm, hasil rata-rata putaran turbin setelah dikopel sebesar 415 rpm. Hasil rata - rata putaran turbin terbesar dalam keadaan berbeban yaitu sebesar 504 rpm, hasil putaran generator terbesar dalam keadaan berbeban yaitu sebesar 306 rpm, hasil rata - rata tegangan generator terbesar yaitu sebesar 9,64 volt, hasil rata rata arus generator terbesar yaitu sebesar 0,33 Ampere, hasil rata-rata daya generator terbesar yaitu sebesar 3,23 Watt, hasil torsi terbesar yaitu sebesar 0,07 Nm, hasil effisisensi PLTMH terbesar yaitu sebesar 6%.

Kata kunci : Prototype PLTMH , Turbin CrossFlow, Debit Air , Output yang dihasilkan

ABSTRACT

The CrossFlow turbine is a type of turbine that utilizes hydraulic energy (water) from the Ayung River flow as its driving force and is very suitable for use in places with low head. Currently, the CrossFlow turbine is still very little used in Indonesia, especially in Bali. This is due to the difficulty of direct measurements by conducting tests related to influential parameters in the field. Therefore, it is necessary to create a Micro Hydro Power Plant (MHP) with adequate terrain

and water discharge and is not difficult to measure so as to obtain specific data. This study aims to create a design, determine the turbine specifications, analyze the torque, rotation speed, voltage, current, power and efficiency generated from the MHP prototype with the CrossFlow turbine. The benefits of this study are also expected to be a reference for further researchers to conduct research on MHP. The methods used in this study are the library method and the observation method. This study also discusses the analytical study of the existing hydropower potential, namely, the water flow discharge and the height of the waterfall (head) of the Ayung River water flow. The turbine design calculation obtained an effective height of 6 meters with an inlet water velocity of 10.63 m/s and a circumferential velocity of 10.22 m/s indicating that the runner has an outer diameter of 0.15 meters, an inner diameter of 0.1 meters, a runner width of 0.1 meters, a distance between blades of 0.026 meters, a blade width of 0.025 meters, and a total of 18 blades. This prototype test uses a water flow rate of 7 L or 0.007 m³/s, a guide vane angle of 30°. The output produced in the no-load test obtained an average turbine rotation result before being coupled to a generator of 539 rpm, an average turbine rotation result after being coupled of 415 rpm. The average result of the largest turbine rotation under load is 504 rpm, the largest generator rotation result under load is 306 rpm, the largest average generator voltage result is 9.64 volts, the largest average generator current result is 0.33 Ampere, the largest average generator power result is 3.23 Watts, the largest torque result is 0.07 Nm, the largest PLTMH efficiency result is 6%.

Key Words : Prototype PLTMH, CrossFlow Turbine, Water Debit, Output produced

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan listrik di Indonesia mengalami peningkatan setiap tahun seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk dan perkembangan ekonomi nasional. Oleh karena itu, perencanaan kebutuhan listrik jangka panjang sangat penting dilakukan untuk mencerminkan situasi kelistrikan saat ini serta proyeksinya di masa depan. Energi baru dan terbarukan (EBT) dapat menjadi alternatif solusi terhadap permasalahan menipisnya cadangan energi fosil di Indonesia, di tengah meningkatnya permintaan energi. EBT berasal dari sumber-sumber alami yang dapat diperbarui secara berkelanjutan, seperti energi air. Berdasarkan data, potensi energi air di Indonesia tergolong cukup besar dan dapat dimanfaatkan secara optimal [1]. Salah satu upaya dalam menanggulangi krisis listrik adalah dengan memanfaatkan Energi Baru Terbarukan yaitu dengan memanfaatkan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH). Pada capstone project ini, penelitian dilakukan dengan membagi menjadi dua subtopik untuk mempermudah alur penelitian. Subtopik pertama yaitu "Rancang Bangun Kerangka dan Turbin Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro Turbin Cross-Flow", melakukan desain ulang rancang bangun PLTMH dengan turbin cross-flow dengan bantuan aplikasi Sketchup 2020. Perancangan desain ini dilakukan menjadi empat bagian yaitu bagian rangka, bagian housing, bagian runner atau turbin, dan bagian guide vane

yang nanti akan dibangun menggunakan akrilik, 3D printer carbon, dan plat besi. Subtopik kedua yaitu "Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro dengan Generator Magnet Permanen pada Turbin Cross-Flow", dalam merancang PLTMH dilakukan pemilihan beberapa komponen utama dan pendukung seperti pemilihan generator, pulley belt dan V belt yang cocok digunakan. Dalam merancang PLTMH perlu memenentukan penempatan generator dan penggunaan sesuai dengan beban yang dihasilkan. Maka dari itu pemilihan generator sangat penting agar beban yang dihasilkan tidak melebihi kinerja generator yang digunakan. Setelah melakukan komponen maka nantinya diharapkan generator dapat bergerak sehingga mendapatkan daya yang dihasilkan, beban yang dihasilkan, tegangan, dan efisiensi pada turbin cross-flow.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) adalah istilah yang digunakan untuk instalasi pembangkit listrik yang menggunakan energi air sebagai sumber energi. PLTMH termasuk kedalam sumber energi terbarukan dan layak disebut clean energy karena ramah lingkungan. Air dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik apabila memiliki debit aliran dan ketinggian

tertentu, serta dilengkapi dengan instalasi yang sesuai. Semakin tinggi ketinggian dan besar aliran air yang tersedia, maka semakin besar pula energi yang dapat diubah menjadi listrik. Pembangkit listrik skala kecil dapat memanfaatkan aliran air dari saluran irigasi, sungai, atau air terjun alami dengan memaksimalkan ketinggian jatuh air (*head*, dalam meter) dan kapasitas aliran, yaitu volume air yang mengalir per satuan waktu (*flow capacity*). Besarnya potensi energi listrik sangat bergantung pada kedua faktor ini semakin besar keduanya, semakin tinggi pula energi listrik yang dapat dihasilkan.

2.2 Peralatan Elektro Mekanikal pada PLTMH

Peralatan elektro mekanikal merupakan seluruh perangkat yang berfungsi untuk mengubah energi potensial dari air menjadi energi listrik.

1. Turbin
2. Transmisi mekanik (*drive system*)
3. Sistem Kontrol (*flow control*)
4. Generator

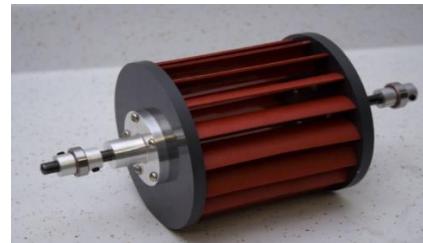
2.3 Turbin Air

Turbin dapat didefinisikan sebagai mesin berputar yang digerakkan oleh aliran air yang bergerak relatif terhadap permukaan turbin, sehingga menghasilkan gerakan pada mesin tersebut. Secara umum, turbin air berfungsi mengkonversi energi aliran air menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros. Komponen utama turbin adalah *runner* yang terhubung dengan poros (*shaft*), yang mengubah energi potensial dari air yang jatuh menjadi tenaga mekanik atau tenaga pada poros. Dalam kebanyakan aplikasi pembangkitan listrik, turbin dihubungkan langsung dengan generator, atau melalui sistem roda gigi, sabuk, dan *pulley*, tergantung pada kecepatan yang diperlukan oleh generator. Pemilihan jenis turbin tergantung pada tinggi jatuh dan debit desain. Pada pembangunan PLTMH, aliran sungai seringkali dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin. Dalam memanfaatkan potensi aliran sungai secara menyeluruh, dari hulu hingga hilir, diperlukan jenis turbin yang berbeda pada setiap segmen sungai karena perbedaan

nilai *head* dan debit air yang terus berubah. Selama proses berjalan, algoritma *Ant Colony Optimization* (ACO) akan menyesuaikan parameter pada model probabilistik, sehingga seiring waktu kemungkinan untuk memperoleh solusi dengan kualitas yang lebih baik akan semakin meningkat.

2.4 Turbin Cross-Flow

Turbin *Cross-flow* terdiri dari dua komponen utama dalam sistem hidrodinamika, yaitu *runner* yang berputar dan *nozzle* yang tetap diam. *Runner* dibentuk dari dua atau lebih piringan melingkar yang dihubungkan oleh deretan sudu atau bilah turbin air (*inter-blade*), membentuk struktur melingkar dengan sudu-sudu yang mengelilingi piringan tersebut. Mekanisme kerja turbin *cross-flow* cukup sederhana, namun berbeda dari turbin Pelton, karena pada turbin *cross-flow* air mengalami dua kali tumbukan pada setiap bilahnya. Terdapat keterkaitan antara bentuk sudu, lebar sudu, ketebalan aliran air, jarak antar bilah, serta diameter roda turbin, sehingga diperlukan analisis yang mendalam untuk memahami performanya secara menyeluruh.



Gambar 1. Turbin Cross-Flow

Aliran air yang keluar dari *nozzle* diarahkan ke turbin melalui sudu jalan, di mana terjadi konversi dari energi kinetik menjadi energi mekanik. Air yang memasuki turbin dari bagian atas akan mentransfer energi ke sudu-sudu, lalu mengalir ke bagian dalam turbin dan akhirnya keluar melalui bagian bawah.

Berikut ini adalah beberapa rumus matematis yang digunakan untuk menghitung debit, tekanan, daya, dan efisiensi :

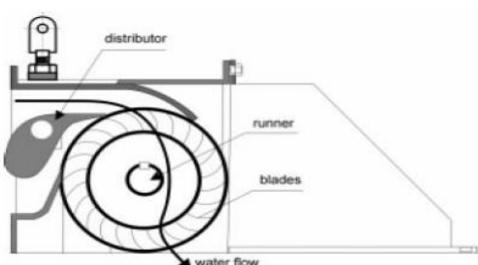
- a. Kecepatan Pancar Air (*V*)

$$V = C \times 2 \cdot g \cdot h$$

dengan:

$$h = \text{Head / Ketinggian (m)}$$

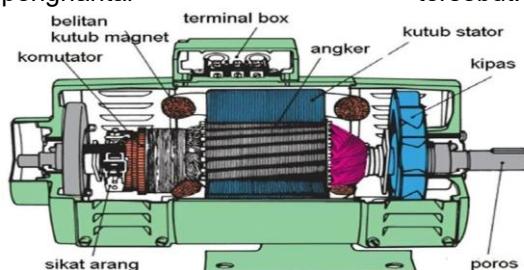
- g = gravitasi (9,8 m/s²)
- b. Kecepatan Tangensial (u)
 $u = V \cos \alpha$
 dengan :
 u = kecepatan tangensial blade atau runner (m/s)
 V = kecepatan aliran air (m²/s)
 α = sudut aliran terhadap arah tertentu
- c. Diameter Luar Runner
 $D = 2,63 \times Q L_n \times h$
 D = Diameter Luar (m)
 Q = Debit Aliran (m³/s)
 L_n = Koefisien
 h = ketinggian (m)
- d. Diameter dalam Runner (D₁)
 $D_1 = 23 \times D$
 dengan :
 D = Diameter Luar (m)
 D₁ = Diameter dalam (m)
- e. Lebar Runner (L)
 $L = 3,16 Q H \times D$
 dengan :
 L = Lebar runner (m)
 Q = Debit aliran air (m³/s)
 H = Tinggi terjunan (m)
 D = Diameter luar runner (m)
- f. Jumlah sudu (n)
 $n = \frac{J}{D_1} D_1 / t$
- g. Lebar Sudu
 $l = r - r_1$
 Dengan
 l = Jarak lebar sudu (m)
 r = jari jari runner
- h. Jarak antar sudu
 $t_1 = 0,175 \times D$
 Dengan :
 t₁ = jarak antar sudu (m)
 D = diameter luar runner (m)



Gambar 2. Skema Turbin Cross-Flow

2.5 Generator

Generator adalah salah satu komponen utama dalam sistem pembangkit listrik yang berperan mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Prinsip kerja generator didasarkan pada hukum Faraday, yaitu ketika suatu penghantar bergerak atau berputar dalam medan magnet sehingga memotong garis-garis gaya magnet, maka akan timbul gaya gerak listrik (ggl) pada ujung-ujung tersebut.



Gambar 3. Generator

2.6 Alat Ukur

Alat ukur yang digunakan sebagai berikut :

1. Tachometer
2. Manometer atau Pressure Gauge
3. Multimeter

3. METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian mengenai potensi model PLTMH dengan menggunakan turbin Cross-Flow dimulai pada bulan Juli 2024. Penelitian ini dilaksanakan di salah satu terjunan aliran Sungai Ayung, Desa Gerih, Kecamatan Abiansemal dengan koordinat (-8,5513925 ; 115,2139298).

3.2 Jenis Data Penelitian

Penelitian mengenai prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) dengan turbin cross-flow menggunakan dua jenis data, yaitu data primer dan data sekunder yang terkait langsung dengan objek penelitian.

1. Data Primer

Data primer diperoleh secara langsung dari pengamatan, pengukuran yang

terdapat pada alat *protoype* Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) dengan turbin *cross-flow* yang telah dibuat.

2. Data Sekunder

Data sekunder diperoleh dari sumber-sumber yang sudah tersedia, seperti instansi terkait, literatur, penelitian terdahulu, datasheet alat yang digunakan, serta buku-buku yang berkaitan dengan objek penelitian ini.

3.3 Tahapan Penelitian

Secara Sistematis tahapan penelitian dilakukan dalam 2 tahapan meliputi :

3.2.1 Perancangan dan Pembuatan Prototype PLTMH

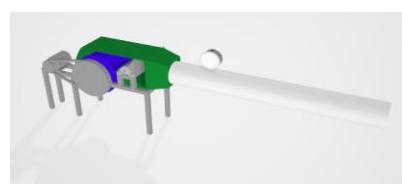
Perencanaan sistem PLTMH dibuat dengan memperkirakan nilai *head*, volume *box*, diameter pipa, dan dimensi rangka dan *housing* turbin adalah seperti pada tabel 1.

Tabel 1. Data Perencanaan Sistem PLTMH

Parameter	Nilai
Panjang Rangka	0,8 meter
Lebar Rangka	0,28 meter
Tinggi Rangka	0,4 meter
Diameter Pipa	0,11 meter
Panjang Pipa	1 meter

Nama Item	Parameter	Nilai
<i>Runner</i>	Diameter Luar	0,15 m
	Sudut <i>Inlet</i> Sudu	16°
	Sudut <i>Outlet</i> Sudu	90°
<i>Housing</i>	Tinggi <i>Housing</i>	0,12 m
	Lebar <i>Housing</i>	0,11 m
	Panjang <i>Housing</i>	0,3 m
	Lebar <i>Cover Bawah</i>	0,11 m
	Tinggi <i>Cover Bawah</i>	0,063 m
<i>Guide vane</i>	Lebar <i>Guide vane</i>	0,11 m
	Panjang <i>Guide vane</i>	0,10 m
	Tinggi <i>Guide vane</i>	0,067 m
	Diameter <i>Gear</i>	0,1 m
<i>Nozzle</i>	Sudut Posisi <i>Guide Vane</i>	30°
	Diameter Lebar <i>Nozzle</i>	0,0056

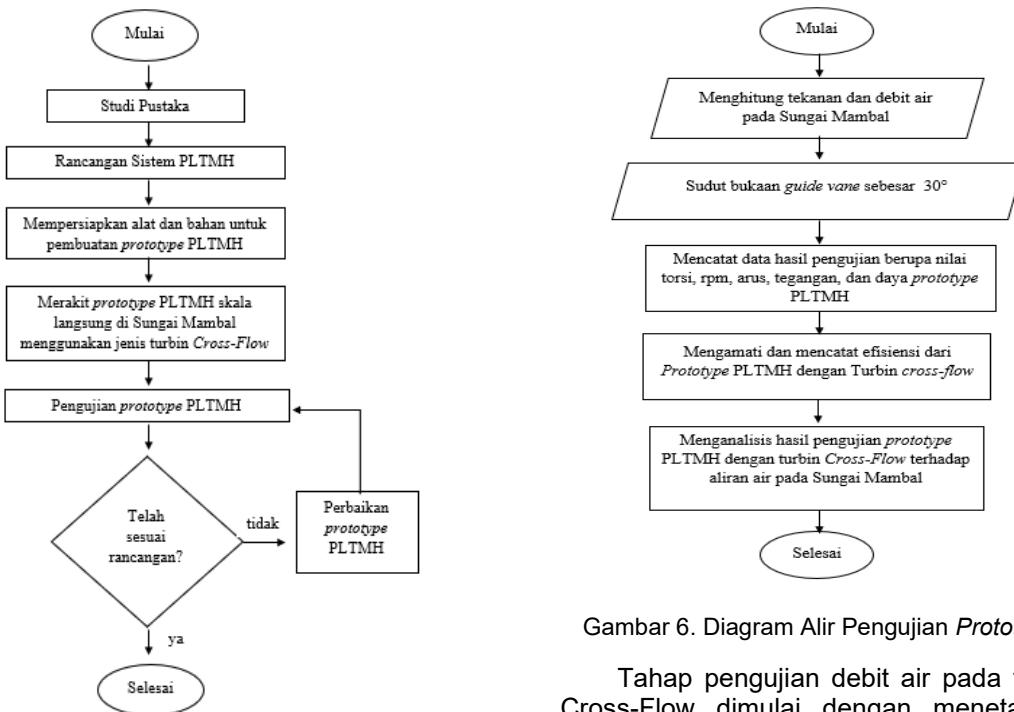
Berikut ini adalah ilustrasi modul pembangkit listrik tenaga mikrohidro yang menggunakan turbin *Cross-Flow*.



Gambar 4. Pemodelan Prototype PLTMH

Tabel 2. Perencanaan Pemodelan Turbin

Tahapan dalam merancang dan membuat prototipe adalah sebagai berikut :



Gambar 5. Diagram Alir Perancangan Prototype PLTMH

3.3.2 Pengujian Pada Kinerja Prototype PLTMH

Adapun tahapan pengujian PLTMH dengan turbin *cross-flow* di Sungai Ayung sebagai berikut :

Tabel 3. Pengujian PLTMH dengan turbin *Cross-Flow* di Sungai Ayung

Pengulangan	Head	Panjang lintasan	Lebar lintasan	Luas Penampang(A)	Waktu (t)
1	0,8 m	10 m	6,4 m	64 m ²	14 s
2	0,8 m	10 m	6,4 m	64 m ²	12 s
3	0,8 m	10 m	6,4 m	64 m ²	13 s
Jumlah Rata-rata Waktu					13 s
Kecepatan aliran air (m/s)		v = Panjang Lintasan / Waktu		0,769 m/s	
Debit Air (m ³ /s)		Q = v . A		49,216 m ³ /s	

Gambar 6. Diagram Alir Pengujian Prototype

Tahap pengujian debit air pada turbin *Cross-Flow* dimulai dengan menetapkan sudut bukaan *guide vane* sebesar 30°. Pengujian dilakukan dengan variasi sudut bukaan *guide vane* serta jumlah sudu yang dipakai. Data yang diperoleh dari pengujian meliputi nilai putaran turbin, arus, tegangan, daya, putaran, dan torsi pada generator.

Parameter-parameter tersebut kemudian dianalisis dalam bentuk grafik yang menunjukkan hubungan antara arus, tegangan, dan daya dari generator terhadap debit air sungai Ayung. Selain itu, dilakukan juga analisis efisiensi prototipe PLTMH dengan turbin *Cross-Flow* berdasarkan variasi sudut bukaan *guide vane* yang digunakan.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.3 Pengukuran Debit Air

Pengukuran debit air dilakukan menggunakan metode benda apung (*floating method*), yaitu dengan meletakkan benda yang tidak tenggelam di permukaan aliran sungai sepanjang jarak tertentu, kemudian mencatat waktu yang dibutuhkan benda apung tersebut untuk bergerak dari satu titik pengamatan ke titik pengamatan lain yang telah ditetapkan.

Debit air mengalir dari Sungai Ayung dengan panjang 10 meter adalah 49,216 m³/s.

Tabel 4. Debit Air Mengalir pada Sungai Ayung

Pengulangan	Panjang pipa	Diameter pipa	Volume Pipa (V)	Waktu (t)
1	1,5 m	0,0762 m	6,84 Liter	1 s
2	1,5 m	0,0762 m	6,84 Liter	0,9 s
3	1,5 m	0,0762 m	6,84 Liter	1 s
Jumlah Rata-rata Waktu			1 s	
Debit Air (m ³ /s)			6,84	L/s

Debit air mengalir dari Sungai Ayung yang melalui pipa masukan 3" dengan panjang 1,5 meter adalah 6,84L/s dibulatkan menjadi 7L/s atau 0,007 m³/s.

4.2 Pemodelan Prototype PLTMH Menggunakan Turbin Cross-Flow

Proses perancangan dan pemodelan sistem PLTMH berbasis pada air Sungai Ayung secara langsung, dengan debit keluaran sebesar 0,007 m³/s. Parameter yang diasumsikan mencakup koefisien nozzle sebesar 0,98, sudut masuk air ke runner 16°, sudut keluar 90°, diameter luar runner 0,15 meter, serta lebar nozzle sebesar 0,056 meter.

1. Perhitungan Head Efektif

Dalam pemodelan PLTMH turbin *cross-flow* hanya berbasis aliran air yang mengalir secara horizontal di Sungai Ayung. Namun, *head* dapat dihitung dengan cara menentukan *head* efektif melalui pendekatan persamaan yang digunakan untuk menentukan diameter luar *runner* yang sesuai.

$$D = \frac{2,63 \times Q}{\ln x \sqrt{h}}$$

$$h = \left[\frac{2,63 \times Q}{\ln x D} \right]^2$$

D = Diameter Luar (m)

Q = Debit Aliran (m³/s)

Ln = Koefisien lebar nozzle (m)

h = ketinggian (m)

$$h = \left[\frac{2,63 \times 0,007}{0,056 \times 0,15} \right]^2 = 5,68 \text{ m}$$

Hasil perhitungan dari persamaan menghasilkan nilai energi kinetik dari aliran Sungai Ayung sama dengan ketinggian jatuh air sebesar 5,68 meter dan dibulatkan menjadi 6 meter.

2. Perhitungan Kecepatan Pancar Air

Perhitungan kecepatan pancar air diperlukan untuk mengetahui nilai pancar air yang masuk ke turbin melewati *nozzle*. Menggunakan persamaan.

$$V_1 = C \times g \cdot h$$

dengan:

h = Head / Ketinggian (m)

g = gravitasi (9,8 m/s²)

C = Koefisien nozzle (0,98)

V₁ = Kecepatan pancar air (m/s)

$$V_1 = 0,98 \times 2 \cdot 9,8 \cdot 6 = 10,63 \text{ m/s}$$

Jadi hasil perhitungan yang menggunakan persamaan 3.3 adalah nilai pancar air yang masuk ke turbin melewati *nozzle* sebesar 10,63m/s.

3. Perhitungan Kecepatan Radiant

Perhitungan untuk menentukan kecepatan *radiant* masuk air ke turbin pada sistem PLTMH menggunakan persamaan.

Kecepatan Tangensial (u)

$$u = V \cos \alpha$$

dengan :

u = kecepatan tangensial blade atau runner (m/s)

V = kecepatan aliran air (m²/s)

α = sudut aliran terhadap arah tertentu

$$u = 10,63 \times \cos 162 = 10,22 \text{ m/s}$$

Jadi hasil perhitungan yang menggunakan persamaan adalah kecepatan *radiant* masuk air ke turbin PLTMH sebesar 10,22 m/s.

Berikut ini adalah data hasil perencanaan yang diperoleh dari perhitungan dalam desain prototipe sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) dengan Turbin *Cross-Flow* di Sungai Ayung.

Tabel 5. Data Rancangan Sistem PLTMH Turbin *Cross-Flow* di Sungai Ayung

Parameter	Nilai
Kapasitas Debit Air	0,007 m ³ /s
Koefisien Nozzle (C)	0,98
Lebar Nozzle (L _n)	0,056 meter
Sudut Masuk Air (α)	16°
Sudut Keluar Air (β)	90°
Head Efektif	6 meter
Kecepatan Mutlak Air	10,63 m/s

Kecepatan Radiant Masuk Air	10,22 m/s
-----------------------------	-----------

Berikut ini adalah hasil perhitungan desain *Runner* Turbin *Cross-Flow* yang didasarkan pada data perancangan PLTMH Turbin *Cross-Flow* pada Tabel 3.

1. Diameter dalam *runner*

Perhitungan diameter dalam *runner* dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$D_1 = \frac{2}{3} \times D$$

dengan :

D = Diameter Luar (m)

D₁ = Diameter dalam (m)

$$D_1 = \frac{2}{3} \times 0,15 = 0,10 \text{ meter}$$

2. Lebar *runner* / panjang *blade*

Perhitungan ukuran lebar *runner* atau panjang bilah (*blade*) dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$L = 3,16 \sqrt{\frac{Q}{\sqrt{H}}} \times \frac{1}{D}$$

dengan :

L = Lebar *runner* (m)

Q = Debit aliran air (m³/s)

H = Tinggi terjunan (m)

D = Diameter luar *runner* (m)

$$L = 3,16 \sqrt{\frac{0,007}{\sqrt{6}}} \times \frac{1}{0,1} = 0,103 \text{ meter}$$

3. Jarak antar sudu

Perhitungan untuk menentukan jarak antara sudu dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$t_1 = 0,175 \times D$$

Dengan :

t₁ = jarak antar sudu (m)

D = diameter luar *runner* (m)

$$t_1 = 0,175 \times 0,15 = 0,026 \text{ meter}$$

4. Lebar sudu pada *runner*

Perhitungan lebar sudu pada *runner* turbin dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$l = r - r_1$$

Dengan

l = Jarak lebar sudu (m)

r = jari jari *runner*

$$l = 0,075 - 0,05 = 0,025 \text{ meter}$$

5. Jumlah sudu pada *runner*

Perhitungan jumlah sudu pada *runner* turbin dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$n = \frac{\pi D}{t_1}$$

dengan :

n = jumlah sudu

D = diameter luar *runner* (m)

t₁ = jarak antar sudu (m)

$$n = \frac{3,14 \times 0,15}{0,026} = 18 \text{ buah}$$

Tabel 6 memuat data hasil perancangan yang diperoleh dari perhitungan desain Turbin *Cross-Flow* yang diterapkan pada modul sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH).

Tabel 6. Data Perancangan Turbin *Cross-Flow*

Parameter	Value
Sudut <i>inlet blade</i>	16°
Sudut <i>outlet blade</i>	90°
Diameter luar	0,15 meter
Diameter dalam	0,1 meter
Lebar <i>runner</i>	0,1 meter
Jarak antar sudu	0,026 meter
Lebar sudu	0,025 meter
Jumlah sudu	18 buah

Berikut ini adalah bentuk nyata dari prototipe Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) yang telah dibuat.



Gambar 7. Realisasi Sistem PLTMH dengan Turbin *Cross-Flow* Secara Keseluruhan

4.3 Pengujian Prototype Turbin Crossflow dalam Keadaan Tanpa Beban

Tabel 7. Pengujian Prototype Putaran Turbin, Generator, dan Tegangan Generator dalam Keadaan Tanpa Beban

No.	Sebelum Dikopel Generator (rpm)	Rata-Rata (rpm)	Sesudah Dikopel Generator (rpm)	Rata-Rata (rpm)
1.	339 rpm		294 rpm	
2.	593 rpm		489 rpm	
3.	543 rpm		387 rpm	
4.	717 rpm	539 rpm	604 rpm	415 rpm
5.	505 rpm		304 rpm	

No	Daya Lampu (Watt)	Putaran Generator (rpm)	Putaran Rata-Rata (rpm)
1.	0	294 rpm	287 rpm
		339 rpm	
		206 rpm	
		206 rpm	
		391 rpm	

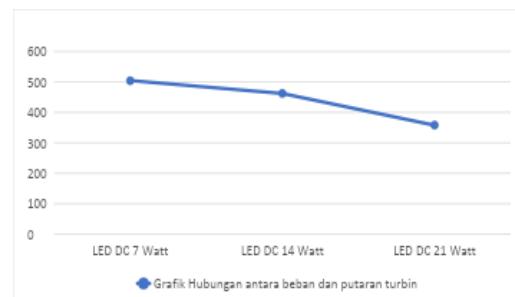
No	Daya Lampu (Watt)	Tegangan Generator (Volt)	Tegangan Rata-Rata (Volt)
1.	0	74,8 V	64,24 V
		67,7 V	
		63,2 V	
		59,2 V	
		56,3 V	

4.4 Pengujian Prototype Turbin Crossflow Dalam Keadaan Berbeban

Dalam pengukuran putaran turbin dan generator ini berikan pembebanan dengan variasi beban yang berbeda-beda yaitu LED DC 7 Watt, LED DC 14 Watt, LED DC 21 Watt.

NO	Daya Lampu (Watt)	Putaran		Output Generator		
		Turbin (rpm)	Generator (rpm)	Tegangan (V)	Arus (I)	Daya (W)
1.	LED DC 7 Watt	504	306	9,64	0,33	3,23
2.	LED DC 14 Watt	462	267	9,02	0,32	2,89
3.	LED DC 21 Watt	358	174	8,12	0,29	2,44

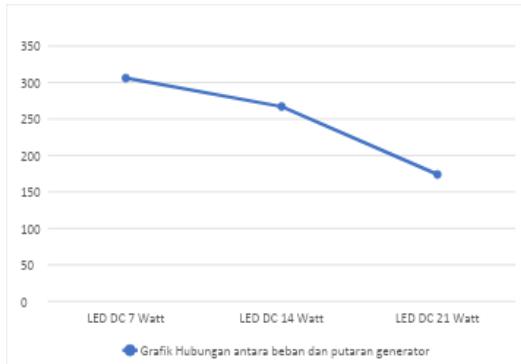
Dimana perubahan daya mekanis meliputi perubahan putaran turbin dan generator dan perubahan daya elektrik meliputi perubahan tegangan, arus serta daya generator yang disajikan sebagai berikut :



Gambar 8. Grafik Hubungan antara Beban dan Putaran Turbin

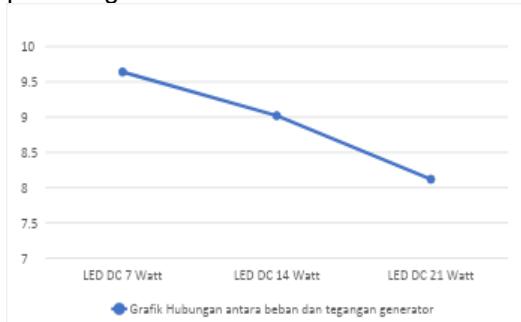
Gambar 8 menunjukkan bahwa kecepatan putaran turbin tertinggi terjadi saat pembebanan dengan LED DC 7 Watt yaitu sebesar 504 rpm, Putaran terendah yang dihasilkan turbin terjadi saat beban diberikan menggunakan LED DC 21 Watt, yaitu sebesar 358 rpm. Penambahan beban pada generator menyebabkan penurunan kecepatan putaran turbin. Hal ini disebabkan oleh munculnya reaksi jangkar ketika generator terhubung dengan beban. Semakin besar daya beban yang diberikan, maka reaksi jangkar pada generator juga semakin besar, sehingga memperlambat kecepatan putaran generator dan secara langsung memengaruhi kinerja putaran turbin.

Tabel 8. Pengujian Prototype Putaran Turbin dan Generator Dalam Keadaan Berbeban



Gambar 9. Grafik Hubungan antara Beban dan Putaran Generator

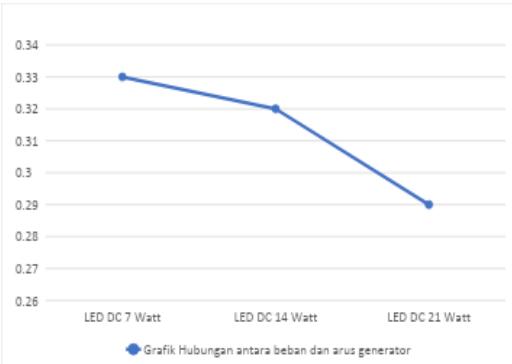
Gambar 9 menunjukkan bahwa putaran tertinggi yang dicapai oleh generator terjadi saat diberi beban LED DC 7 Watt, yaitu sebesar 306 rpm, sedangkan putaran terendah terjadi saat beban menggunakan LED DC 21 Watt, yaitu sebesar 174 rpm. Peningkatan beban pada generator menyebabkan penurunan kecepatan putaran generator. Hal ini disebabkan oleh munculnya reaksi jangkar saat generator dibebani. Reaksi jangkar tersebut meningkatkan torsi pada generator, yang secara langsung memengaruhi kecepatan putarannya. Semakin besar beban yang diberikan, semakin besar pula torsi yang timbul, sehingga menyebabkan penurunan putaran generator.



Gambar 10. Grafik Hubungan antara Beban dan Tegangan Generator

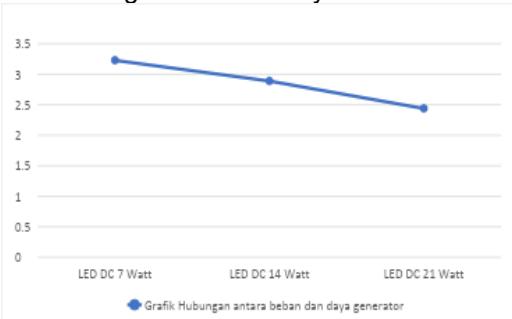
Gambar 10 menunjukkan bahwa tegangan generator tertinggi yang dihasilkan oleh generator terjadi saat pembebahan dengan menggunakan LED DC 7 Watt yaitu sebesar 9,64 V, sementara tegangan terendah yang dihasilkan oleh generator terjadi saat pembebahan LED DC 21 Watt yaitu sebesar 8,12 V. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa terdapat hubungan terbalik antara beban pada generator dan tegangan yang dihasilkan. Semakin besar beban yang diberikan,

semakin menurun tegangan output generator. Penurunan ini disebabkan oleh munculnya reaksi jangkar yang menyebabkan penurunan tegangan pada terminal generator. Selain itu, nilai tegangan yang dihasilkan juga dipengaruhi oleh kecepatan putaran generator itu sendiri.



Gambar 11. Grafik Hubungan antara Beban dan Arus Generator

Gambar 11 menunjukkan bahwa arus tertinggi yang dihasilkan oleh generator terjadi saat pembebahan dengan menggunakan LED DC 7 Watt yaitu sebesar 0,33 A, sementara arus terendah yang dihasilkan oleh generator terjadi saat pembebahan menggunakan LED DC 21 Watt yaitu sebesar 0,29 A. Dari grafik tersebut juga terlihat bahwa hubungan antara beban pada generator dengan arus yang dihasilkan tidak bersifat linier; semakin besar beban yang diberikan, arus yang dihasilkan oleh generator justru cenderung menurun. Hal ini disebabkan oleh pada saat percobaan alat kondisi alat terkena hujan, oleh karena itu tegangan output generator dan arus yang dihasilkan tidak berbanding lurus sebagaimana mestinya.



Gambar 12. Grafik Hubungan antara Beban dan Daya Generator

Gambar 12 menunjukkan bahwa daya tertinggi yang dihasilkan oleh generator terjadi saat pembebahan dengan menggunakan LED DC 7 Watt yaitu sebesar 3,23 Watt, sementara daya terendah yang

dihasilkan oleh generator terjadi saat pembebahan menggunakan LED DC 21 Watt yaitu sebesar 2,44 watt. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa terdapat hubungan searah antara beban pada generator dengan daya yang dihasilkan; semakin besar beban yang diberikan, semakin tinggi pula daya output generator. Hal ini terjadi karena peningkatan torsi akibat reaksi jangkar pada generator serta kenaikan arus beban yang turut memengaruhi daya yang dihasilkan.

1. Perhitungan Torsi

Torsi adalah besaran yang menggambarkan besarnya gaya yang menyebabkan suatu benda berputar. Pada pengujian PLTMH dengan variasi beban yang berbeda, torsi turbin yang terhubung ke generator juga bervariasi. Besarnya nilai torsi yang dihasilkan dihitung menggunakan persamaan 1.

$$T = \frac{P}{2\pi n}$$

Dimana = T = Torsi (Nm)

P = Daya (W)

n = putaran turbin (rpm)

Tabel 9. Variasi Pembebahan Lampu Hasil Perhitungan Torsi Terhadap Putaran Turbin

No	Variasi Pembebahan (Watt)	Torsi (Nm)
1	LED DC 7 Watt	0,06
2	LED DC 14 Watt	0,06
3	LED DC 21 Watt	0,07



Gambar 13. Grafik Perubahan Variasi Pembebahan Terhadap Torsi Turbin

Gambar 13 menunjukkan bahwa torsi turbin terbesar mencapai 0,07 Nm saat beban menggunakan LED DC 21 Watt, sedangkan torsi terkecil sebesar 0,06 Nm terjadi pada beban LED DC 7 Watt. Dari grafik tersebut juga terlihat bahwa terdapat hubungan searah antara beban pada generator dengan torsi turbin yang dihasilkan; semakin besar beban yang diberikan, semakin besar pula torsi turbin. Hal ini disebabkan oleh peningkatan torsi pada generator akibat reaksi jangkar saat generator dibebani, di mana torsi turbin dipengaruhi oleh besarnya torsi yang dihasilkan generator.

2. Perhitungan Daya Hidrolis

Daya hidrolis adalah energi yang dihasilkan oleh aliran air dari suatu ketinggian tertentu. Dalam pemodelan PLTMH ini, daya hidrolis berfungsi sebagai daya input bagi sistem PLTMH. Dalam pemodelan ini ketinggian head yaitu 80 cm dibulatkan menjadi 0,8 m, debit aliran air didalam pipa sebesar 0,007 m³/s masa jenis air sebesar 1000 kg/m³ dan gravitasi bumi sebesar 9,8 m/s². Adapun hasil dari perhitungan daya hidrolis dengan penggunaan persamaan.

$$PH = P \times g \times Q \times h$$

Dimana : PH = Daya (Watt)

P = Massa Jenis Zat (kg/m³)

g = Gaya Gravitasi Bumi (m/s²)

Q = Debit Air (m³/s)

H = Tinggi Head Efektif (m)

$$PH = P \cdot g \cdot Q \cdot h$$

$$PH = 1000 \cdot 9,8 \cdot 0,007 \cdot 0,8$$

$$PH = 54,88 \text{ Watt}$$

3. Perhitungan Efisiensi PLTMH

Effisiensi merupakan perbandingan daya hidrolis dengan daya generator (daya elektris yang dihasilkan generator). Melalui perhitungan efisiensi ini, dapat diketahui seberapa besar daya yang mampu dihasilkan oleh prototipe dalam memanfaatkan potensi daya yang tersedia. Berikut adalah hasil perhitungan efisiensi sistem PLTMH pada berbagai variasi beban menggunakan persamaan terkait.

Dimana : η_t = Efisiensi

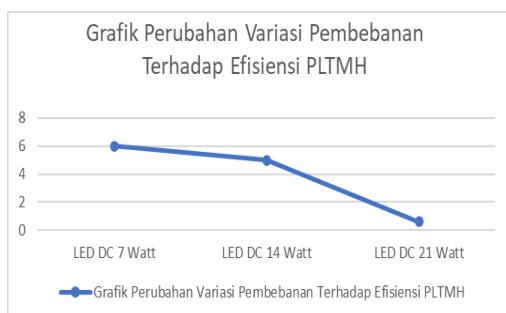
P_t = Daya Output

P_a = Daya Input

$$\eta_t = \frac{P_t}{P_a} \times 100 \%$$

Tabel 10. Variasi Pembebanan Lampu Hasil Perhitungan Efisiensi Terhadap Putaran Turbin

No	Variasi Pembebanan (Watt)	Daya Input (Watt)	Daya Output (Watt)	Efisiensi sistem. PLTMH (%)
1	LED DC 7 Watt	54,88	3,23	6
2	LED DC 14 Watt	54,88	2,89	5
3	LED DC 21 Watt	54,88	2,44	4



Gambar 14. Grafik Perubahan Variasi Pembebanan Terhadap Efisiensi Sistem PLTMH

Gambar 14 menunjukkan bahwa nilai efisiensi turbin tertinggi mencapai nilai 6 % pada saat pembebanan menggunakan LED DC 7 Watt Sedangkan nilai efisiensi turbin terkecil mencapai nilai 4 % pada saat pembebanan menggunakan LED DC 21 Watt. Mengacu pada grafik tersebut juga dapat diketahui hubungan antar pembebanan generator terhadap efisiensi sistem PLTMH akan berbanding lurus, meningkatnya pembebanan yang diberikan pada generator akan menyebabkan meningkatnya efisiensi sistem PLTMH. Hal ini disebabkan karena efisiensi sistem PLTMH dipengaruhi dari besarnya nilai daya output yang dihasilkan generator, Semakin besar daya output yang dihasilkan oleh generator maka

efisiensi dari sistem PLTMH juga semakin besar. Tetapi pada kasus ini tidak berjalan sebagaimana mestinya dikarenakan efisiensi yang dihasilkan mengalami penurunan dikarenakan generator terkena hujan pada saat percobaan alat dilakukan.

5. KESIMPULAN

Simpulan yang dapat diambil dari hasil pengujian dan pembahasan yang telah dilakukan adalah :

1. Rancangan *prototype* PLTMH dengan menggunakan turbin *cross-flow* pada Sungai Ayung mendapatkan ketinggian efektif 6 meter dengan kecepatan air masuk 10,63 m/s dan kecepatan *radian* 10,22 m/s menunjukkan bahwa *runner* memiliki diameter luar 0,15 meter, diameter dalam 0,1 meter, lebar *runner* 0,1 meter, jarak antar sudu 0,026 meter, lebar sudu 0,025 meter, dan total 18 buah sudu.
2. Prototype ini menggunakan debit aliran air dari Sungai Ayung yang masuk melalui pipa masukan dengan ukuran 3" sebesar 7 L/s dengan dua pengujian, yaitu pengujian tanpa beban dan pengujian menggunakan variasi pembebanan. Pada pengujian tanpa beban didapatkan hasil rata-rata putaran turbin sebelum dikopel generator sebesar 539 rpm, hasil rata-rata putaran turbin setelah dikopel sebesar 415 rpm, hasil rata-rata putaran generator sebesar 287 rpm dan tegangan generator rata-rata yang dihasilkan sebesar 64,24 volt. Sedangkan pada pengujian dengan variasi pembebanan didapatkan hasil rata-rata putaran turbin terbesar yaitu pada pembebanan LED DC 7 Watt sebesar 504 rpm, hasil putaran generator terbesar yaitu pada pembebanan LED DC 7 Watt sebesar 306 rpm, hasil rata-rata tegangan generator terbesar yaitu pada pembebanan LED DC 7 Watt sebesar 9,24 volt, hasil rata-rata arus generator terbesar yaitu pada pembebanan LED DC 7 Watt sebesar 0,33 Ampere, hasil rata-rata daya generator terbesar yaitu pada pembebanan LED DC 7 Watt sebesar 3,23 Watt, hasil torsi terbesar yaitu

- pada pembebanan LED DC 21 Watt sebesar 0,07 Nm,
3. Hasil effisisensi PLTMH terbesar yaitu pada pembebanan LED DC 7 Watt sebesar 6 % Sedangkan nilai efisiensi turbin terkecil mencapai nilai 4 % pada saat pembebanan menggunakan LED DC 21 Watt. Data yang dihasilkan pada pengujian alat yang dibuat merupakan simulasi atau konsep kerja suatu alat PLTMH dimana data atau alat tersebut bisa dikembangkan kembali. Dimana potensi yang dibangkitkan dengan alat yang diujikan belum memenuhi data yang dibangkitkan.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dwi Metadyasa, I Made. 2021. Pengaruh Sudut Bukaan Guide vane dan Tekanan Air. Terhadap Kecepatan Putar Dan Daya Output Pada Prototype Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Dengan Turbin Cross-Flow : Teknik Elektro Udayana
- [2] Wiludjeng Trisasiwi. 2017. Rancang Bangun Turbin Cross-Flow untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Skala Laoratorium : Program Studi Teknik Pertanian Universitas Jendral Soedirman Purwokerto
- [3] Andrean Wiranata , I Putu. 2020. Rancang Bangun Prototype Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro Menggunakan Turbin Cross-Flow. Teknik Elektro Udayana
- [4] Ridwan, K.A. 2021. Simulasi Prototype Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Turbin Crossflow Ditinjau dari Ketinggian, Debit dan Arah Aliran. Politeknik Negeri Surabaya
- [5] Saleh et al. 2019. Analisis Karakteristik Turbin Cross-flow Kapasitas 5 kW. Teknik Elektro : Universitas Semarang
- [6] Apriani, Y. 2019. Analisis Karakteristik Turbin Cross-flow Kapasitas 5 Kw. Jurnal Surya Energy . 3 (2): 255-261.
- [7] Jasa, L. 2017 . Mikro Hidro; Strategi Memanfaatkan Energi Murah dan Ramah Lingkungan Yogyakarta : Teknosain .
- [8] Krishnastana , M.A.K. 2017 . "Studi Analisis Pengaruh Perubahan Debit Air dan Tekanan Air Pada Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro". Bali : Universitas Udayana.
- [9] Mafruddin. 2017. Pengaruh Bukaan Guide vane Terhadap Kinerja Turbin Piko hidro Tipe Cross-Flow. Jurnal Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Metro. 6(1): 31-37.
- [10] Mockmore, C. A (1949). The Banki Water Turbine. Corvallis: Bulletin. Series No. 25.
- [11] Nashrullah, A. 2019. Pengaruh Sudut Pengarah Terhadap Daya dan Efisiensi Turbin Reaksi Crossflow Poros Vertikal. Jurnal Pendidikan Teknik Mesin 8(2): 96-103.
- [12] Tzong Su. C. , Chung-Fu C., Ji-Pyng. C. 2005. Optimal Capacitor Placement in Distribution Systems Employing Ant Colony Search Algorithm. Taylor & Francis Paper. Hal. 931-947
- [13] Republik Indonesia . 2017. Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional. Lembar Negara RI Tahun 2017, No. 43. Sekretariat Negara. Jakarta.
- [14] Sihaloho , D.L. 2017. "Rancang . Bangun. Alat Uji Model Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Menggunakan Turbin Aliran Silang". Bandar Lampung : Universitas Lampung.
- [15] Sitompul, R. 2011. "Teknologi Energi Terbarukan Yang Tepat Untuk Aplikasi Di Masyarakat Perdesaan". Jakarta : PNPM Mandiri
- [16] Suhendra . 2019. "Konsep Dasar dan Aplikasi Mekanika Fluida Bidang Teknik Mesin". Ponorogo : Uwais Inspirasi Indonesia .
- [17] Yulianto, B. Darjati. 2017. Fisika Lingkungan, Edisi Tahun 2017. Badan Pengembangan dan Pemberdayaan Sumber Daya Manusia Kesehatan

- [18] Yani, A. 2017. Rancang Bangun Alat Praktikum Turbin Air dengan Pengujian Bentuk Sudu Terhadap Torsi dan Daya Turbin yang Dihasilkan. *Jurnal Teknik Mesin Univ. Muhammadiyah Metro*. Vol. 6 No. 1. 2017.