

RANCANG BANGUN PROTOTYPE PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKRO HIDRO MENGGUNAKAN TURBIN CROSS-FLOW

I Putu Andrean Wiranata¹, I Gusti Ngurah Janardana², I Wayan Arta Wijaya³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

Email : andrewira176@gmail.com¹, janardana@unud.ac.id²,
artawijaya@ee.unud.ac.id³

Abstrak

Pembangkit listrik tenaga air yang banyak saat ini dibuat dalam skala besar. Sementara, pembangunan pembangkit listrik skala besar ini memerlukan lahan yang sangat luas dan *head* yang sangat tinggi. Hal ini berdampak pada sulitnya penyaluran energi listrik untuk daerah-daerah terpencil, disisi lain masih banyak sungai-sungai kecil di daerah pemukiman terpencil belum dimanfaatkan secara maksimal sebagai alternatif potensi sumber pembangkit listrik. Maka untuk mengatasi hal tersebut, melalui penelitian ini dibuatlah sebuah *prototype* Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) menggunakan turbin *Cross-Flow* yang dapat diaplikasikan secara langsung pada sungai-sungai dengan debit dan *head* yang cukup rendah. Metode dari penelitian ini meliputi pembuatan *prototype* berdasarkan hasil perhitungan pada perancangan parameter dan pengujian kinerja *prototype* PLTMH. Pada penelitian ini, hasil perhitungan parameter *prototype* PLTMH dengan Turbin *Cross-Flow* dirancang pada *head* efektif 6 meter. Desain Turbin *Cross-Flow* menggunakan ukuran diameter luar *runner* 0,15 meter, diameter dalam *runner* 0,10 meter, jumlah sudu 18 buah. Hasil pengujian didapatkan hasil 574,6 rpm putaran turbin sebelum dikopel generator; 489 rpm putaran turbin setelah dikopel generator; 3309,2 rpm putaran turbin, tegangan *output* 36,52 V pada saat tanpa beban, serta 386,4 rpm putaran turbin maksimal; 2584,4 rpm putaran generator maksimal; 28,18 V tegangan *ouput* maksimal; 0,422 A arus *output* maksimal; 10,59 Watt daya *output* maksimal; 0,312 Nm torsi maksimal; 8,026 % efisiensi maksimal pada keadaan berbeban.

Kata kunci : Hasil Pengujian, PLTMH, *Prototype*, Rancang Bangun, Turbin *Cross-Flow*.

Abstract

Many hydropower plants today are built on a large scale. Meanwhile, the construction of this large-scale power plant requires a very large area and a very high head. This has an impact on the difficulty of distributing electrical energy to remote areas, on the other hand, there are still many small rivers in remote residential areas that have not been fully utilized as an alternative to potential sources of electricity generation. So to overcome this, through this research a prototype Micro Hydro Power Plant (PLTMH) was made using a Cross-Flow turbine which of course can be applied to rivers that have a fairly low flow and head. In this study, the results of the calculation of the PLTMH prototype parameters with a Cross-Flow Turbine were designed at an effective head of 6 meters. The design of the Cross-Flow Turbine uses a runner outer diameter of 0.15 meters, a runner inner diameter of 0.10 meters, and the number of blades is 18. The test results obtained 574,6 rpm of turbine rotation before coupled with the generator; 489 rpm rotation of the turbine after coupling the generator; 3309.2 rpm of turbine rotation, 36.52 V output voltage at no load, and 386.4 rpm maximum turbine rotation; 2584.4 rpm maximum generator rotation; 28.18 V maximum output voltage; 0.422 A maximum output current; 10.59 Watts of maximum output power; 0.312 Nm of maximum torque; 8,026% maximum efficiency at load..

Keywords: The Test Result, Microhydro Power Plant, Prototype, Design, Cross-Flow Turbine.

1. PENDAHULUAN

Pembangkit listrik tenaga air yang banyak saat ini dibuat dalam skala besar.

Namun, disisi lain masih banyak sungai-sungai kecil di daerah pemukiman yang terpencil belum di manfaatkan secara

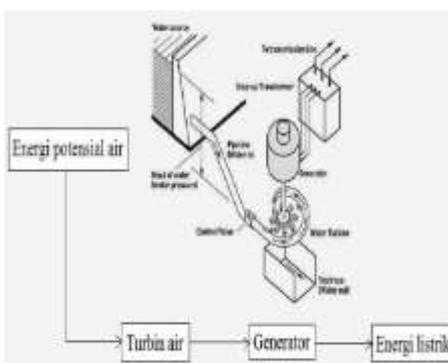
maksimal sebagai alternatif potensi sumber pembangkit listrik. Untuk mengatasi hal ini maka pembangkit listrik dengan skala kecil atau disebut mikro hidro (PLTMH) dapat diaplikasikan. Pemilihan jenis turbin air dalam PLTMH disesuaikan dengan debit air, dan ketinggian terjun air (*head*). Ada beberapa jenis turbin untuk menghasilkan energi listrik yang optimal, salah satunya adalah *Turbin Cross-Flow*. Penggunaan *Turbin Cross-Flow* saat ini telah banyak diaplikasikan khususnya di Bali, berdasarkan data dari Balai Wilayah Sungai (BWS) wilayah Bali Penida pada tahun 2019, debit air rata-rata sungai di Bali adalah $3 \text{ m}^3/\text{s}$ dengan *head* rata-rata sekitar 7 meter [1]. Dimana karakteristik debit dan *head* tersebut sesuai dengan kinerja dari *Turbin Cross-Flow* sehingga sangat cocok untuk diaplikasikan di sungai-sungai di Bali.

Namun, proses pengkajian tentang parameter – parameter yang berpengaruh terhadap kinerja turbin tersebut di lapangan sangatlah sulit diakibatkan dari medan di lapangan yang berat. Maka pada penelitian ini dibuatlah *prototype* pembangkit listrik mikro hidro (PLTMH) menggunakan *Turbin Cross-Flow* untuk mengkaji parameter yang mempengaruhi kinerja Turbin.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH)

Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) memiliki prinsip kerja dengan memanfaatkan beda tinggi *head* dan jumlah debit air per detik yang ada pada aliran atau sungai. Air yang mengalir melalui *intake* diteruskan oleh saluran pembawa hingga *penstock*, kemudian akan memutar poros turbin sehingga menghasilkan energi mekanik. Turbin air akan memutar generator dan menghasilkan energi listrik. [2].

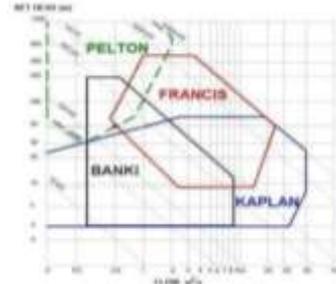


Gambar 1. Gambaran Sistem PLTMH
(Sumber : Apriansyah, 2011)

2.2. Turbin Air

2.2.1 Definisi Turbin Air

Turbin air merupakan mesin yang berputar dimana air bergerak secara relatif ke permukaan tersebut, sehingga menghasilkan gerakan pada mesin. Secara umum turbin air adalah alat yang mengubah energi aliran air menjadi energi mekanik yaitu putaran poros [3].



Gambar 2. Karakteristik Pemilihan Turbin

(Sumber : Harvey, 1993)

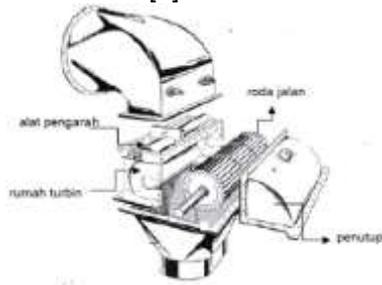
Berdasarkan gambar 2 pemilihan karakteristik turbin air berdasarkan *head* dan debit adalah sebagai berikut :

1. *Head* yang rendah yaitu dibawah 20 m dengan debit air yang sedang maka turbin yang cocok untuk diaplikasikan adalah turbin *Cross-Flow* / Banki.
2. *Head* yang rendah yaitu dibawah 20 m dengan debit air yang besar maka turbin yang cocok untuk diaplikasikan adalah turbin Kaplan.
3. *Head* yang sedang antara 20 m sampai 90 m dengan debit air yang sedang maka turbin yang cocok untuk diaplikasikan adalah turbin Francis.
4. *Head* yang tinggi yakni diatas 90 m dengan debit air yang rendah maka turbin yang cocok untuk diaplikasikan adalah turbin Pelton.

2.3 Turbin Cross-Flow

Turbin Cross-Flow ini merupakan jenis turbin *impuls* dengan tipe aliran radial yang dapat dioperasikan pada debit air sebesar $0,002 \text{ m}^3/\text{s}$ hingga $10 \text{ m}^3/\text{s}$ dan *head* antara 1 m sampai dengan 200 m, turbin ini memiliki potensi yang baik sebagai pembangkit listrik tenaga air untuk kapasitas 5 – 100 kW. Konstruksinya yang sederhana juga memungkinkan untuk

meminimalkan biaya produksinya [4]. Adapun prinsip kerja turbin *cross-flow* adalah ketika air yang masuk kedalam *runner* mengenai sudu dua kali. Tahap pertama atau *first stage*, air mengenai sudu dekat dengan inlet yang menimbulkan torsi sehingga turbin dapat berputar, kemudian air mengenai sudu pada tahap pertama aliran air mengalir secara *axial* menuju tahap kedua dimana air akan mengenai sudu dekat dengan *outlet* turbin sebelum meninggalkan turbin. Sehingga pada keadaan ini air yang mengenai sudu dekat dengan *outlet* turbin [5].



Gambar 3. Turbin *Cross-Flow* (Sumber : Mockmore, 1949)

2.3.1 Persamaan Dalam Menentukan Parameter Desain Turbin *Cross-Flow*

Adapun beberapa rumus matematis dalam perhitungan untuk menentukan parameter dari desain turbin adalah [6]:

1. Kecepatan Pancar Air (V) :

$$V = C \times \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (1)$$

2. Kecepatan Tangensial (u) :

$$u = \frac{V \cos \alpha_1}{2} \quad (2)$$

3. Diameter Luar

$$D = \frac{2,63 \times Q}{L_n \times \sqrt{h}} \quad (3)$$

4. Lebar *Runner* (L) :

$$L = 3,16 \sqrt{\frac{Q}{\sqrt{h}}} \times \frac{1}{D} \quad (4)$$

5. Diameter Dalam *Runner* (D_1):

$$D_1 = \frac{2}{3} \times D \quad (5)$$

Dalam menentukan parameter dimensi sudu *runner* yang akan digunakan agar kinerja dapat maksimal pada

sistem maka perlu dilakukan perancangan dan perhitungan secara teoritis. Adapun beberapa rumus matematis dalam perhitungan untuk menentukan parameter dari dimensi sudu adalah [7].

- a. Lebar Sudu $= l = r - r_1$ (6)

- b. Jarak antar Sudu $= t_1 = 0,175 \times D$ (7)

- c. Jumlah Sudu $n = \frac{\pi \times D}{t_1}$ (8)

2.4 Persamaan Debit, Tekanan, Daya dan Efisiensi

Adapun beberapa rumus matematis dalam perhitungan debit, tekanan, daya dan efisiensi adalah [8]:

1. Debit Air (Q) :

$$Q = \frac{V}{\tau} \quad (9)$$

2. Tekanan hidrostatik ($p_{\text{hidrostatik}}$) :

$$p_{\text{hidrostatik}} = \rho \times g \times h \quad (10)$$

3. Daya Hidrolis (P_H) :

$$P_H = \rho \times g \times Q \times h \quad (11)$$

4. Torsi (T):

$$T = \frac{P}{2\pi \times \frac{N}{60}} \quad (12)$$

5. Efisiensi PLTMH (η_{PLTMH}) :

$$\eta_{\text{PLTMH}} = \frac{P_G}{P_H} \times 100 \% \quad (13)$$

2.5 Konstruksi Perancangan Turbin *Cross-Flow*

Konstruksi dari turbin ini lebih sederhana daripada turbin impuls jenis lainnya. Adapun konstruksi dari turbin *Cross-Flow* adalah sebagai berikut [9]:

1. Rumah Turbin (*Housing*)

Rumah turbin (*housing*) *cross-flow* terbuat dari struktur baja, sehingga kuat dan tahan terhadap benturan dan beku. Fungsi dari rumah turbin (*housing*) adalah sebagai tempat masuk *nozzle* dari pipa pesat menuju ke *runner* turbin [9].

2. Alat Pengarah (*Guide Vane*)

Alat pengarah atau sering juga disebut sebagai *guide vane* berfungsi untuk

mengarahkan aliran air sehingga secara efektif meneruskan energinya ke *blade* atau *runner* turbin. *Guide vane* juga dapat digunakan untuk mengatur kapasitas air yang masuk menuju turbin dengan arah dan kecepatan tertentu sehingga dengan mengatur bukaan *guide vane* dengan tepat maka dapat meningkatkan kinerja dari putaran dari *runner* turbin [9].

3. Roda Jalan (*Runner*)

Roda jalan atau yang sering disebut sebagai *runner* terdiri dari tiga bagian utama yaitu *susu*, *shaft* (poros) dan *disc* yang tersusun menjadi satu kesatuan. *Runner* pada turbin *crossflow* biasanya berbentuk tabung memanjang. Fungsi dari *runner* ini adalah sebagai penggerak mula dari generator yang digunakan untuk membangkitkan energi listrik [9].

4. Penutup

Penutup turbin biasanya terbuat dari plat besi yang kokoh dan dapat menahan tekanan air. Fungsi dari cover penutup ini adalah menjaga agar aliran air tidak keluar dari lintasan turbin [9].

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dimulai dengan proses perancangan dan pembuatan modul turbin pada bulan November 2019 dan dilanjutkan dengan proses pengumpulan data dari hasil pengujian modul pada bulan Januari 2020 yang dilaksanakan di Laboratorium Konversi Energi dan *Workshop* Program Studi Teknik Elektro Universitas Udayana.

3.1 Jenis Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian mengenai perancangan dan pengujian modul Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) dengan Turbin *Crossflow* ini terdiri dari dua jenis data, adapun data yang digunakan pada objek penelitian ini yaitu: data primer dan sekunder. Data primer didapatkan melalui realisasi pemodelan modul PLTMH secara langsung di lapangan berdasarkan hasil perhitungan perancangan sesuai dengan data parameter perencana awal dan hasil pengukuran secara langsung saat proses pengujian *prototype* PLTMH menggunakan turbin *Cross-Flow* pada kondisi tanpa beban dan juga berbeban.

Sedangkan untuk data sekunder diperoleh melalui dari data yang dicari melalui badan instansi dan penelitian-penelitian yang sebelumnya pernah dilakukan yang berhubungan dengan penelitian ini. Pada penelitian ini data sekunder yang digunakan berupa data desain parameter perencana awal dalam perancangan *prototype* PLTMH berdasarkan penyesuaian parameter pada beberapa penelitian - penelitian yang sebelumnya pernah dilakukan dan juga berhubungan dengan penelitian ini.

Selain itu juga, data sekunder yang digunakan merupakan Data debit dan *head* rata-rata sungai di Bali selama 5 tahun terakhir berdasarkan data dari Balai Wilayah Sungai (BWS) wilayah Bali Penida [1] yang digunakan untuk memperkuat latar belakang dari penelitian ini.

Tabel 1. Data Debit dan Head Rata-Rata di Bali Selama 5 Tahun Terakhir

Tahun	Debit (m ³ /s)	Head (m)
2015	4,7	7,354
2016	6,9	7,576
2017	5,4	7,245
2018	4,2	7,357
2019	3,1	7,145

3.2 Tahapan Penelitian

Secara sistematis tahapan penelitian dilakukan dalam tiga tahapan meliputi :

3.2.1 Perancangan dan Pembuatan *Prototype* PLTMH

Berikut merupakan data hasil perencanaan awal dari rancangan sistem PLTMH dan Turbin *Cross-Flow* yang digunakan pada *prototype* sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH).

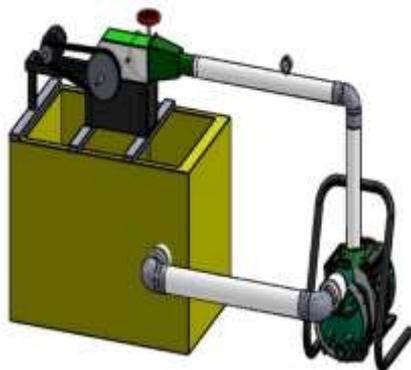
Tabel 2. Data Perencanaan Awal Sistem PLTMH

Parameter	Value
Volume <i>Box Reservoir</i>	0,238 m ³
Panjang Rangka	0,32 meter
Lebar Rangka	0,15 meter
Tinggi Rangka	0,18 meter
Debit Air Pompa	0,0075 m ³ /s

Tabel 3.Data Perencanaan Awal Rancangan Turbin

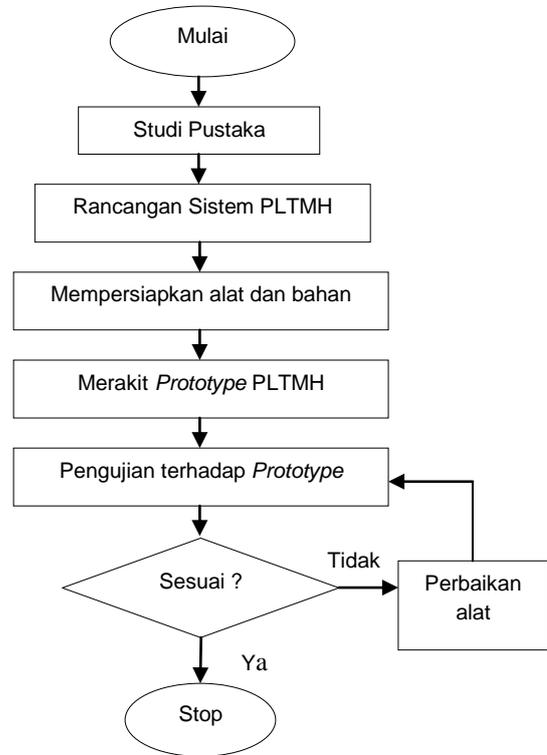
Nama Item	Parameter	Value
Runner	Diameter luar	0,15 meter
	Sudut <i>inlet blade</i>	16°
	Sudut <i>outlet blade</i>	90°
Guide Vane	Lebar <i>guide vane</i>	0,1 meter
	Panjang <i>guide vane</i>	0,1 meter
	Tinggi <i>guide vane</i>	0,067 meter
	Sudut Posisi <i>guide vane</i>	90°
Housing	Panjang <i>Housing</i>	0,55 meter
	Lebar <i>Housing</i>	0,11 meter
	Tinggi <i>Housing</i>	0,12 meter
	Panjang <i>cover bawah</i>	0,16 meter
	Lebar <i>cover bawah</i>	0,11 meter
	Tinggi <i>cover bawah</i>	0,03 meter
Nozzle	Diameter	0,056 meter
	Lebar <i>Nozzle</i>	

Berikut merupakan gambaran dari modul pembangkit listrik mikrohidro menggunakan turbin *Cross-Flow*



Gambar 4. Pemodelan *Prototype* PLTMH

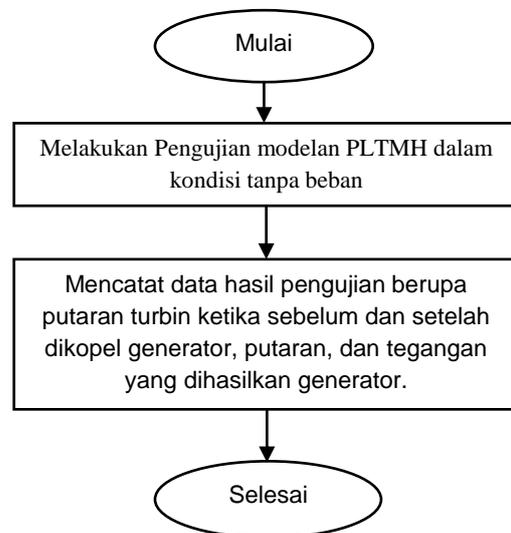
Adapun tahap perancangan dan pembuatan *prototype* adalah sebagai berikut :



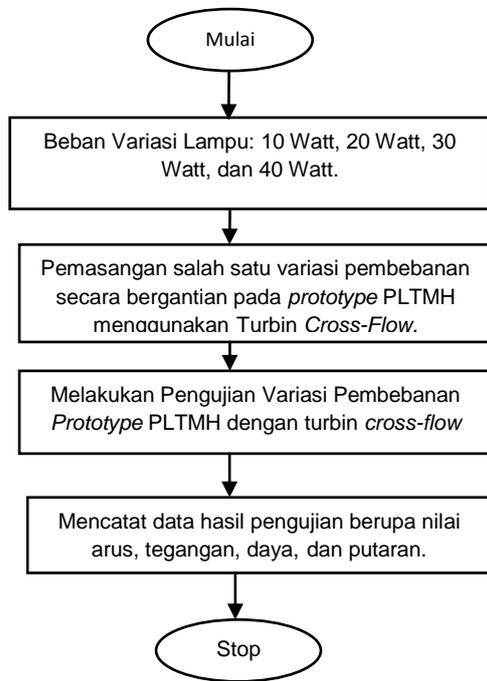
Gambar 5. *Flowchart* Perancangan dan Pembuatan *Prototype* PLTMH

3.2.2 Pengujian Pada Kinerja *Prototype* PLTMH

Adapun tahap pengujian tanpa beban maupun menggunakan pembebanan terhadap kinerja Turbin *Crossflow* pada *prototype* PLTMH adalah sebagai berikut :



Gambar 6. Diagram Alir Pengujian Kinerja *Prototype* PLTMH Menggunakan Turbin *Cross-Flow* Tanpa Beban



Gambar 7. Diagram Alir Pengujian Variasi Pembebanan Terhadap Kinerja *Prototype* PLTMH

Tahap pengujian tanpa beban meliputi pengukuran putaran turbin ketika sebelum dan setelah dikopel dengan generator, putaran, dan tegangan dihasilkan oleh generator saat belum diberikan beban. Pengukuran banyaknya putaran yang dihasilkan oleh turbin dan generator dalam selang waktu satu menit menggunakan tachometer meter dengan cara mengarahkan tachometer ke poros turbin dan generator. Sedangkan untuk pengukuran tegangan dilakukan menggunakan multimeter saat kondisi belum diberikan beban.

Tahapan pengujian variasi pembebanan terhadap kinerja *prototype* PLTMH diawali dengan mempersiapkan semua variasi daya lampu yang akan digunakan. Pengujian masing – masing variasi daya lampu LED dilakukan secara bergantian mulai dari daya lampu 10 Watt, 20 Watt, 30 Watt, dan 40 Watt. Data hasil pengujian yang didapatkan berupa nilai pengukuran putaran turbin, arus, tegangan, daya, putaran, dan torsi pada generator. Pengukuran banyaknya putaran yang

dihasilkan oleh turbin dan generator dalam selang waktu satu menit menggunakan tachometer meter dengan mengarahkan tachometer ke poros turbin dan generator. Sedangkan untuk pengukuran tegangan, arus, dan daya menggunakan multimeter. Pengukuran tegangan dilakukan dengan menggunakan multimeter yang terhubung paralel dengan beban, sedangkan untuk pengukuran nilai arus dilakukan dengan menggunakan Multimeter yang terhubung seri dengan variasi beban. Nilai torsi dari turbin yang sudah dikopel generator didapatkan dengan perhitungan menggunakan persamaan 12. Nilai efisiensi dari PLTMH didapatkan dengan perhitungan menggunakan persamaan 13.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan *Prototype* PLTMH (Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro) menggunakan Turbin *Cross-Flow*.

Perancangan pada pemodelan ini dibagi menjadi 2 bagian yaitu perancangan pemodelan sistem PLTMH dan perancangan Turbin *Cross-Flow*.

Pada perancangan pemodelan sistem PLTMH menggunakan pompa memiliki kapasitas debit air keluaran maksimal sebesar 0,0075 m³/s dengan diasumsikan parameter koefisien *nozzle* yaitu 0,98, Faktor koreksi yaitu 0,087, Sudut masuk air ke *runner* sebesar 16° dan sudut keluar sebesar 90°, Diameter luar *runner* sebesar 0,15 meter, dan lebar diameter *nozzle* adalah 0,056 meter.

Perhitungan untuk menentukan *head* efektif menggunakan pendekatan persamaan menentukan diameter luar *runner* yang sesuai dengan persamaan 3.

$$h = \left[\frac{2,63 \times 0,0075}{0,056 \times 0,15} \right]^2$$

$$= 5,682 \text{ meter dibulatkan } 6 \text{ meter}$$

Perhitungan untuk menentukan kecepatan pancar air menggunakan persamaan 1.

$$V_1 = 0,98 \times \sqrt[3]{2 \times 9,8 \times 6}$$

$$= 10,63 \text{ m/s}$$

Perhitungan untuk menentukan kecepatan keliling masuk air ke turbin pada sistem PLTMH menggunakan persamaan 2.

$$u = \frac{10,63 \times \cos 16^\circ}{2} = 10,22 \text{ m/s}$$

Berikut merupakan data hasil perencanaan berdasarkan perhitungan dari perancangan pada *prototype* sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH).

Tabel 4. Data Perancangan Sistem PLTMH

Parameter	Value
Volume Box Reservoir	0,238 m ³
Kapasitas Debit Air	0,0075 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 Keliling Masuk Air	10,22 m/s

Berikut hasil perhitungan perancangan Turbin *Cross-Flow* :

Perhitungan untuk menentukan ukuran diameter dalam menggunakan persamaan 5.

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

Perhitungan untuk menentukan ukuran lebar *runner* / panjang *blade* menggunakan persamaan 4.

$$L = 3,16 \times \frac{0,007 \text{ m}^3/\text{s}}{\sqrt[3]{6 \text{ meter}}} \times \frac{1}{0,10 \text{ meter}} = 0,103 \text{ meter}$$

Perhitungan untuk menentukan ukuran jarak antar sudu menggunakan persamaan 7.

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

Perhitungan untuk menentukan ukuran lebar sudu pada *runner* turbin menggunakan persamaan 6.

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

Perhitungan untuk menentukan jumlah sudu pada *runner* turbin menggunakan persamaan 8.

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

Pada tabel 4 berisikan data hasil perancangan berdasarkan perhitungan dari rancangan Turbin *Cross-Flow* yang digunakan pada modul sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH).

Tabel 5. 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 merupakan realisasi dari *prototype* Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) yang telah dibuat adalah sebagai berikut.



Gambar 8. Realiasi Sistem PLTMH Secara Keseluruhan

4.2 Pengujian Pemodelan PLTMH (Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro) Menggunakan Turbin *Cross-Flow*

Adapun pengujian pada pemodelan PLTMH meliputi :

4.2.1 Pengujian Pemodelan PLTMH dengan Menggunakan Turbin

Cross-Flow Dalam Keadaan Tanpa Beban

Parameter dalam pengujian ini adalah pengukuran putaran turbin dan generator beserta pengukuran tegangan maksimal yang dihasilkan oleh generator ketika belum terhubung dengan beban. Hasil pengukuran rata-rata dari parameter-parameter pada pengujian pemodelan PLTMH dalam kondisi tanpa beban dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 6. Hasil Rata-Rata Pengujian Pemodelan PLTMH Dalam Keadaan Tanpa Beban

Putaran (rpm)		Generator	Tegangan Generator (V)
Turbin			
Sebelum Dikopel	Setelah Dikopel		
574,6	489	3309,2	36,52

Berdasarkan tabel 5 yang merupakan hasil rata-rata pengujian pemodelan PLTMH dalam keadaan tanpa beban tersebut, didapatkan hasil pengukuran jumlah putaran yang dihasilkan oleh turbin adalah 574,6 rpm ketika belum dikopel oleh generator dan 489 rpm ketika setelah dikopel oleh generator. Jumlah putaran yang dihasilkan oleh generator adalah 3309,2 rpm, dan tegangan yang dihasilkan generator adalah 36,52 V.

4.2.2 Pengujian Pemodelan PLTMH dengan Menggunakan Turbin Cross-Flow Dalam Keadaan Berbeban

Parameter dalam pengujian ini adalah pengukuran putaran turbin, putaran tegangan, arus, dan daya. Hasil pengukuran rata-rata dari setiap parameter-parameter pada pengujian pemodelan PLTMH dalam kondisi beban.

Tabel 7. Hasil Rata-Rata Pengujian Pemodelan PLTMH Dalam Keadaan Berbeban

Daya Lampu (Watt)	Putaran		Output Generator		
	Turbin (rpm)	Generator (rpm)	V	I	W

10	386,4	2584,4	28,18	0,16	4,68
20	371,6	2486,2	27,68	0,24	6,8
30	340,6	2373,8	26,8	0,32	8,63
40	323,4	2313,2	25,1	0,42	10,6

Berdasarkan tabel 6 yang merupakan hasil rata-rata pengujian pemodelan PLTMH dalam keadaan berbeban, didapatkan jumlah putaran tertinggi yang dihasilkan oleh turbin dan generator terjadi ketika pengukuran dengan variasi beban lampu LED 10 Watt yaitu sebesar 386,4 rpm untuk putaran turbin dan 2584,4 rpm untuk putaran generator.

Berdasarkan tabel 6 juga didapatkan tegangan tertinggi yang dihasilkan oleh generator terjadi pada ketika pengukuran variasi beban lampu LED 10 Watt yaitu sebesar 28,18 V, sementara hasil rata-rata pengukuran didapatkan arus dan daya tertinggi dihasilkan oleh generator pada ketika pengukuran variasi beban lampu LED 40 Watt, yaitu sebesar 0,422 A untuk arus dan 10,584 Watt untuk daya yang dihasilkan oleh generator.

Berdasarkan tabel 6 tersebut juga diketahui meningkatnya pembebanan yang diberikan pada generator akan menyebabkan penurunan tegangan yang dihasilkan oleh generator. Hal ini disebabkan karena munculnya reaksi jangkar yang menyebabkan *drop* pada tegangan terminal generator.

Sedangkan, dari tabel 6 tersebut juga diketahui meningkatnya pembebanan yang diberikan pada generator akan menyebabkan meningkatnya arus dan daya output yang dihasilkan oleh generator. Hal ini disebabkan dari ketika tegangan output generator akan menurun maka arus beban dan daya output generator akan meningkat. Hal ini disebabkan karena daya *output* generator dipengaruhi bertambahnya torsi pada generator yang timbul akibat reaksi jangkar pada generator dan juga dipengaruhi arus beban yang meningkat.

4.2.3 Perhitungan Hasil Pengujian Pemodelan PLTMH dengan Menggunakan Turbin Cross-Flow

Pada pengukuran yang dilakukan pada pengujian PLTMH terhadap variasi pembebanan yang berbeda didapatkan

hasil perhitungan torsi dan efisiensi sistem PLTMH.

Tabel 8. Hasil Perhitungan Torsi Terhadap Variasi Pembebanan Lampu

No	Pembebanan (Watt)	Torsi (Nm)
1	10	0,116
2	20	0,175
3	30	0,242
4	40	0,312

Berdasarkan tabel 7 yang merupakan hasil perhitungan terhadap variasi perubahan pembebanan tersebut, dapat dilihat bahwa hasil perhitungan nilai rata-rata torsi turbin tertinggi adalah sebesar 0,312 Nm ketika perhitungan pengukuran pembebanan saat menggunakan lampu 40 Watt, sementara hasil perhitungan nilai rata-rata torsi turbin terkecil adalah sebesar 0,116 Nm pada saat perhitungan pengukuran pembebanan menggunakan lampu 10 Watt.

Tabel 9. Hasil Perhitungan Efisiensi Sistem PLTMH

No	Variasi Beban (Watt)	Daya Input (Watt)	Daya Output (Watt)	Efisiensi Sistem PLTMH (%)
1	10	127	4,68	3,37
2	20	127	6,809	5,36
3	30	127	8,63	6,795
4	40	127	10,568	8,32

Berdasarkan tabel 8 yang merupakan hasil perhitungan efisiensi Sistem PLTMH tersebut, didapatkan hasil perhitungan untuk nilai efisiensi turbin tertinggi mencapai nilai 8,32% ketika perhitungan pengukuran pada saat pembebanan menggunakan lampu 40 Watt, sementara hasil perhitungan nilai efisiensi terendah adalah sebesar 3,37 % ketika perhitungan pengukuran pada saat pembebanan menggunakan lampu 10 Watt.

V. KESIMPULAN

Simpulan yang dapat diambil berdasarkan hasil pembahasan yang telah dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Desain turbin *cross-flow* untuk ketinggian efektif sebesar 6 meter

dengan kecepatan mutlak air menuju turbin sebesar 10,63 m/s dan kecepatan keliling masuk air ke turbin sebesar 10,22 m/s. Berdasarkan hasil perhitungan parameter turbin *cross-flow* didapatkan ukuran diameter luar *runner* 0,15 meter, diameter dalam *runner* 0,1 meter, lebar *runner* 0,1 meter dengan jarak antar sudu 0,026 meter, lebar sudu 0,025 meter dan jumlah sudu 18 buah.

2. Hasil pengujian didapatkan hasil 574,6 rpm putaran turbin sebelum dikopel generator; 489 rpm putaran turbin setelah dikopel generator; 3309,2 rpm putaran turbin, tegangan *output* 36,52 V pada saat tanpa beban, serta 386,4 rpm putaran turbin maksimal; 2584,4 rpm putaran generator maksimal; 28,18 V tegangan *ouput* maksimal; 0,422 A arus *output* maksimal; 10,59 Watt daya *output* maksimal; 0,312 N/m torsi maksimal; 8,026 % efisiensi maksimal pada keadaan berbeban.

VI. SARAN

Saran yang diberikan dari hasil penelitian adalah sebagai berikut :

1. Dalam membuat konstruksi turbin hendak dibuat menggunakan peralatan yang lebih mendukung dan memiliki tingkat kepresisian tinggi sehingga nantinya didapatkan kinerja turbin yang lebih maksimal.
2. Dibutuhkan penelitian yang lebih spesifik pengaruh pembebanan generator terhadap kinerja dari pemodelan PLTMH pada penelitian selanjutnya.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abdiana, P. 2019. Laporan Rekapitulasi *Debit - Head* Rata-Rata Di Bali Selama 5 Tahun Terakhir: Denpasar: Balai Wilayah Sungai (BWS) Bali Penida.
- [2] Apriansyah, F. 2011. Rancang Bangun Sistem Pembangkit Listrik Mikrohidro (PLTMH) Pada Pipa Saluran Pembuangan Air Hujan Vertikal. *e-Proceeding of Engineering* : Vol.3, No.1.
- [3] Achmad, B. 2017. Merancang dan Mengimplementasi Modul Praktikum Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro di Jurusan Teknik Elektro dan Komputer Universitas Udayana.

- Jurusan Teknik Elektro dan Komputer
Fakultas Teknik, Universitas Udayana.
- [4] Harvey, A. 1993. *Microhydro Design Manual : A Guide to Small-Scale Water Power Schemes*. London : Intermediate Technology Publications. ISBN : 85339-103-4.
- [5] Mockmore, C. A., Merryfield, Fred (1949). *The Banki Water Turbine*. Corvallis: Bulletin Series No. 25.
- [6] Purga, A K. 2019. "Rancang Bangun Turbin Aliran Silang (*Crossflow*) Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) di Sungai Desa Talang.
- [7] Sitompul, R. 2011. *Teknologi Energi Terbarukan Yang Tepat Untuk Aplikasi Di Masyarakat Perdesaan*. Jakarta : PNPM Mandiri.
- [8] Jasa, L. 2016. *A New Design of Banki's Water Turbine Model for Pico Hydro in Tabanan Bali*. ICSGTEIS , ISBN : 978-1-5090-2690-6, Volume- 4.
- [9] Zar, W. T. 2019. *Design, Construction And Performance Test Of Cross-Flow Turbine*. *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, ISSN: 2320-2092, Volume- 4.