

ANALISIS POTENSI DAYA LISTRIK PADA PLTMH ALIRAN ANAK SUNGAI TUKAD SUNGI MENGGUNAKAN TURBIN CROSSFLOW

I Gede Agus Krisna Raharja¹, Cokorde Gede Indra Partha², I Gusti Ngurah Janardana³

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

^{2,3}Dosen Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana
Kampus Bukit, Jl.Raya Kampus Unud Jimbaran, Kuta Selatan, Badung, Bali 80361

Email : gede04437@gmail.com¹, cokindra@unud.ac.id², janardana@unud.ac.id³

ABSTRAK

Penelitian ini mengevaluasi potensi daya listrik dan kecepatan putaran turbin yang dihasilkan dari aliran anak sungai Tukad Sungai untuk digunakan dalam Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) dengan menggunakan turbin crossflow. penelitian ini menghitung daya listrik potensial yang dapat dihasilkan serta menilai performa kecepatan putaran turbin dalam menghasilkan daya optimal. Data kuantitatif diperoleh melalui pengukuran debit air dan kecepatan putaran turbin dalam berbagai kondisi beban. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dari potensi debit air 0,44 m³/s, hanya 0,026 m³/s yang digunakan, menghasilkan daya hidrolis sebesar 484,12 watt dan daya output generator mencapai 313,227 watt. Putaran turbin menunjukkan penurunan ketika terhubung dengan generator, yang mempengaruhi output listrik sistem secara keseluruhan. Meskipun hasil daya listrik tercapai, efisiensi sistem masih memerlukan peningkatan untuk memenuhi standar kebutuhan energi penerangan jalan yang direncanakan.

Kata Kunci: Mikrohidro, Tukad Sungai, turbin crossflow, daya listrik, efisiensi

ABSTRACT

This study evaluates the potential electrical power and turbine rotation speed generated from the flow of the Tukad Sungai tributary to be used in a Microhydro Power Plant (PLTMH) using a crossflow turbine. This study calculates the potential electrical power that can be generated and assesses the performance of the turbine rotation speed in producing optimal power. Quantitative data were obtained by measuring water discharge and turbine rotation speed under various load conditions. The results showed that from the potential water discharge of 0.44 m³/s, only 0.026 m³/s was used, producing a hydraulic power of 484.12 watts and a generator output power of 313.227 watts. The turbine rotation showed a decrease when connected to the generator, which affected the overall electrical output of the system. Although the electrical power output was achieved, the efficiency of the system still needs to be improved to meet the planned street lighting energy needs.

Keywords: Microhydro, Tukad Sungai, crossflow turbine, electrical power, efficiency

1. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki potensi besar dalam pengembangan energi terbarukan, terutama energi yang bersumber dari air. Salah satu teknologi yang memanfaatkan potensi ini adalah pembangkit listrik tenaga mikro hidro (PLTMH). Teknologi ini bekerja dengan mengubah aliran air dari sungai atau saluran irigasi menjadi energi listrik

melalui pemanfaatan perbedaan tinggi air (head) dan aliran keluar (outflow). PLTMH menjadi salah satu alternatif yang menjanjikan untuk penggunaan energi terbarukan.

Jenis energi ini dinilai ramah lingkungan, efisien dan cocok untuk memenuhi kebutuhan listrik di daerah yang masih langka energinya, terutama di pedesaan.

Sebagai tujuan wisata internasional, Bali menghadapi peningkatan kebutuhan energi. Meningkatnya populasi penduduk, aktivitas ekonomi dan industri pariwisata memberikan tekanan besar pada pasokan energi. Hingga saat ini, sebagian besar kebutuhan energi Bali masih mengandalkan bahan bakar fosil yang didatangkan dari luar daerah. Ketergantungan ini menjadikan Bali rentan terhadap fluktuasi harga dan permasalahan keberlanjutan. Oleh karena itu, pengembangan energi terbarukan sangatlah penting [1].

Salah satu sumber energi terbarukan yang potensial adalah pemanfaatan aliran sungai untuk pembangkit listrik tenaga air (PLTA) skala kecil. Beberapa sungai besar di Bali, seperti Tukad Ayung dan Tukad Unda, memiliki potensi yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik. Pengembangan sumber daya ini mendukung visi Bali untuk mewujudkan pulau yang lebih mandiri energi dan ramah lingkungan.

Meskipun demikian, terdapat sejumlah tantangan yang perlu diatasi, seperti keterbatasan infrastruktur, potensi dampak terhadap lingkungan, serta kebutuhan akan sinergi antar pihak terkait. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang komprehensif guna mengidentifikasi potensi, menentukan teknologi yang sesuai, dan merancang strategi mitigasi sehingga pemanfaatan sumber daya air dapat dilakukan secara optimal tanpa merusak keseimbangan lingkungan [2].

Anak sungai Tukad Sungai, yang terletak di Banjar Ganter, Desa Abian Tuwung, Kecamatan Kediri, Kabupaten Tabanan, menjadi salah satu sumber daya alam dengan potensi besar untuk dikembangkan sebagai PLTMH. Menurut data dari Balai Wilayah Sungai Bali-Penida (2022), debit air di anak sungai Tukad Sungai mencapai rata-rata 0,44 m³/s dengan perbedaan ketinggian air (head) yang memungkinkan untuk konversi energi potensial air menjadi energi mekanik [3]. Pemanfaatan ini bertujuan tidak hanya untuk menghasilkan listrik, tetapi juga mendukung penyediaan energi penerangan jalan di sekitar area anak sungai, seperti menuju lokasi *Den Uma Cafe* yang belum memiliki penerangan.

Penelitian ini difokuskan pada perancangan dan pengujian PLTMH dengan turbin crossflow, penelitian ini tidak hanya mengeksplorasi potensi daya listrik dari debit aliran air di anak sungai Tukad Sungai, tetapi juga menganalisis performa turbin crossflow dalam menghasilkan daya yang konsisten dan efisien. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan tentang bagaimana sumber daya air skala kecil dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan listrik di daerah pedesaan serta menjadi referensi dalam pengembangan PLTMH pada lokasi-lokasi potensial lainnya.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) merupakan sistem pembangkit listrik berskala kecil yang menggunakan energi air dari aliran sungai, irigasi, atau air terjun. Teknologi ini bekerja dengan mengandalkan perbedaan ketinggian air (head) serta jumlah debit air untuk menghasilkan energi listrik. Komponen utama PLTMH meliputi sumber air, turbin, dan generator. Prinsip kerjanya adalah mengonversi energi potensial air yang jatuh menjadi energi mekanik untuk menggerakkan turbin, lalu diubah menjadi listrik oleh generator. PLTMH bisa beroperasi pada tinggi air rendah (misalnya, 2,5 meter menghasilkan 400 watt), sehingga cocok untuk daerah terpencil dan tidak merusak lingkungan. Keuntungan PLTMH: Murah karena menggunakan energi alam, sederhana, cocok untuk daerah terpencil, ramah lingkungan, dapat dikombinasikan dengan program lain (misalnya, irigasi) [4]. Berikut merupakan skematik dari Pembangkit Listrik Tenaga *Micro Hydro* [5]:

1. Intake (Pintu Air)

Intake berfungsi untuk mengalirkan air dari sumber, seperti sungai, ke sistem PLTMH. Komponen ini biasanya dilengkapi dengan saringan guna mencegah material seperti batu atau daun masuk yang dapat mengganggu operasional.

2. Penstock (Pipa Pesat)

Pipa pesat adalah jalur bertekanan tinggi yang membawa air dari bak penenang menuju turbin. Material pipa

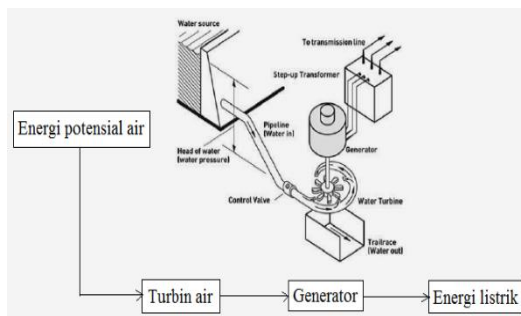
biasanya terbuat dari baja atau PVC dengan desain yang mampu menahan tekanan tinggi dari air.

3. Turbine (Turbin)

Air bertekanan yang dialirkan melalui pipa pesat memutar turbin, mengubah energi kinetik air menjadi energi mekanik. Jenis turbin yang digunakan, seperti Pelton, Crossflow, atau Francis, dipilih berdasarkan tinggi jatuh (head) dan volume air. Komponen ini berfungsi mengubah energi mekanik dari turbin menjadi energi listrik.

4. Tailrace (Saluran Pembuangan)

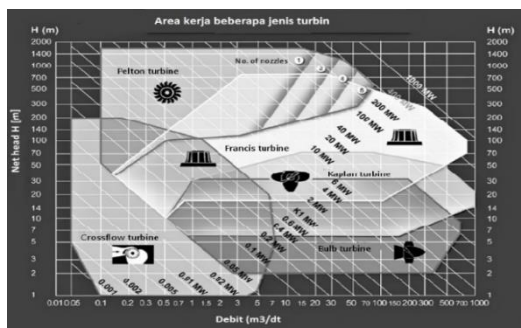
Air yang telah melewati turbin dialirkan kembali ke sumber air melalui saluran pembuangan. [6].



Gambar 1. Skema PLTMH

2.2 Pemilihan Turbin

Pemilihan turbin merupakan komponen penting dalam pembangunan PLTMH, hal yang perlu diperhatikan dalam pemilihan turbin itu adalah ketinggian jatuh air (*head*) dan debit air.



Gambar 2. Grafik Pemilihan turbin
(Sumber : [5])

Grafik di atas menunjukkan jenis turbin yang sesuai untuk digunakan berdasarkan head dan debit suatu sungai. Beberapa jenis turbin yang tercantum dalam grafik tersebut

meliputi propeller, Kaplan, Francis, Pelton, serta turbin lainnya. Grafik ini juga dapat digunakan untuk memperkirakan daya listrik yang dihasilkan berdasarkan kombinasi head dan debit sungai yang tersedia [5].

Secara umum, karakteristik turbin air dapat dinyatakan dalam beberapa konstanta sebagai berikut :

1. Daya Tersedia Turbin

Menghitung daya yang tersedia pada turbin dapat menggunakan persamaan sebagai berikut [4] :

$$P_h = \rho \times g \times Q \times H_{net} \quad (1)$$

Keterangan :

P_h = Daya Tersedia (Watt)

ρ = Massa jenis air (1.000 kg/m³)

H_{net} = Head net (m)

g = Percepatan gravitasi (m/s²)

2. Daya Keluaran Turbin

Faktor-faktor yang menentukan daya pada turbin air meliputi debit air, massa jenis air, percepatan gravitasi, tinggi jatuh air (*head*), dan efisiensi turbin. Besarnya daya keluaran turbin dapat dihitung menggunakan rumus berikut [4] :

$$P_t = \rho \times g \times Q \times H_{net} \times \eta \quad (2)$$

Keterangan :

P_t = Daya turbin (Watt)

ρ = Massa jenis air (1.000 kg/m³)

H_{net} = Head net (m)

g = Percepatan gravitasi (m/s²)

η = Efisiensi turbin (0,3-0,9)

3. Potensi Daya Dibangkitkan

Menghitung potensi daya yang dapat dibangkitkan dapat menggunakan persamaan sebagai berikut [4] :

$$P = P_h \cdot \eta_t \cdot \eta_g \quad (3)$$

Keterangan :

P = Potensi Daya Dibangkitkan (w)

P_h = Daya Tersedia Pada Turbin (w)

η_t = Efisiensi Turbin

η_g = Efisiensi Generator

4. Kecepatan Turbin

Kecepatan spesifik dapat dihitung dengan mengetahui kecepatan putaran turbin dengan persamaan sebagai berikut [4]:

$$N = 513,25 \frac{H_{Net}^{0,745}}{\sqrt{P_t}} \quad (4)$$

Kecepatan spesifik turbin dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut [4]:

$$N_s = N \times \frac{P_t^{0,5}}{H_{net}^{1,25}} \quad (5)$$

Keterangan:

N = Kecepatan putaran turbin air (rpm)

H_{net} = Head net (m)

P_t = Daya turbin (Watt)

N_s = Kecepatan putaran spesifik turbin air (rpm)

2.3 Turbin Crossflow

Turbin Crossflow (aliran silang) merupakan jenis turbin aliran radial atmosfer, yang bekerja pada tekanan atmosfer. Turbin ini tidak memerlukan seal-seal kedap suara, sehingga proses perakitannya menjadi lebih sederhana. Ketinggian jatuh air yang cocok untuk turbin ini berkisar antara 4 hingga 100 meter, dengan tingkat efisiensi mencapai 80% hingga 90% [6]

2.4 Perencanaan Turbin Crossflow

Parameter Parameter pada turbin Crossflow dapat dirancang dengan menggunakan rumus-rumus berikut [7] :

1) Luas Runner Turbin

Diameter runner dapat ditentukan melalui perhitungan luas runner, yang dihitung berdasarkan prinsip kontinuitas. Prinsip ini menyatakan bahwa debit dapat diperoleh dengan menghitung luas penampang dan kecepatan fluida. Dari prinsip tersebut, diperoleh persamaan berikut.

(6) luas runner sebagai berikut : [7]

$$LD_1 = \frac{2,63 \cdot Q}{\sqrt{H_n}} \quad (6)$$

Keterangan :

L = Lebar runner turbin (m)

D_1 = Diameter luar runner (m)

Q = Debit aliran (m³/s)

H_n = Head net (m)

2) Panjang Sudu Runner Turbin

Panjang sudu runner turbin air dapat dihitung menggunakan persamaan (7) sebagai berikut : [7]

$$L = \frac{Q \times N}{50 \times H_n} \quad (7)$$

Keterangan :

L = Panjang sudu (m)

Q = Debit air (m³/s)

N = Kecepatan putaran turbin (rpm)

H_{net} = Head net (m)

3) Diameter Luar Runner Turbin

Diameter luar runner turbin dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut : [7]

$$D_1 = 2,63 \frac{Q}{L \cdot \sqrt{H_n}} \quad (8)$$

Keterangan :

D_1 = Diameter luar runner (m)

Q = Debit aliran (m³/s)

H_n = Head Net (m)

4) Diameter Dalam Runner Turbin

Diameter dalam runner turbin dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut : [7]

$$D_2 = \frac{2}{3} \times D_1 \quad (9)$$

Keterangan :

D_2 = Diameter dalam runner (m)

D_1 = Diameter luar runner (m)

5) Jarak Antar Sudu Runner Turbin

Jarak antar sudu runner turbin dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut : [7]

$$K = 0,174 \times D_1 \quad (10)$$

Keterangan :

K = Jarak Antar Sudu

D_1 = Diameter luar runner (m)

6) Jumlah Sudu Runner Turbin

Menentukan jumlah sudu *runner* turbin dapat menggunakan persamaan sebagai berikut : [7]

$$N = \frac{\pi \cdot D_1}{K} \quad (11)$$

Keterangan :

N = Jumlah Sudu *Runner* Turbin
 D_1 = Diameter luar *runner* (m)
 K = Jarak Antar Sudu

7) Lebar Sudu *Runner* Turbin

Lebar sudu pada *runner* turbin air dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\alpha = 0,17 \times D_1 \quad (12)$$

Keterangan :

α = Lebar sudu (cm)
 D_1 = Diameter luar *runner* (cm)

8) Ketebalan Sudu *Runner* Turbin

Menentukan ketebalan sudu *runner* turbin dapat menggunakan persamaan sebagai berikut : [7]

$$S_1 = K \times D_1 \quad (13)$$

Keterangan :

S_1 = Ketebalan Sudu
 K = Jarak Antar Sudu
 D_1 = Diameter luar *runner* (m)

9) Jarak Antar Sudu Pada Diameter Dalam

Menentukan jarak antara sudu turbin pada diameter dalam dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

Jarak Antar Sudu Diameter Dalam

$$= \frac{\text{Keliling Lingkaran}}{\text{Jumlah Sudu}} \quad (14)$$

10) Ketebalan Semburan *Nozzel*

Menentukan ketebalan semburan *nozzel* dapat menggunakan persamaan sebagai berikut [7] :

$$M = 0,23 \frac{Q}{L \cdot \sqrt{H_n}} \quad (15)$$

Keterangan :

M = Ketebalan Semburan *Nozzel*
 Q = Debit aliran (m³/s)
 H_n = *Head Net* (m)

L = Panjang Sudu *Runner* Turbin (m)

11) Jari-Jari Kelengkungan Sudu

Jari-jari kelengkungan sudu pada turbin air dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut [5] :

$$r_c = 0,163 \times D_1 \quad (16)$$

Keterangan :

r_c = Jari-jari kelengkungan sudu
 D_1 = Diameter luar *runner* (cm)

12) Torsi

Torsi pada turbin air dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut : [5]

$$T = \frac{P_t}{2\pi \frac{N}{60}} \quad (17)$$

Keterangan :

T = Torsi (Nm)
 P_t = Daya turbin (watt)
 N = Kecepatan putaran turbin air (rpm)

2.5 Flood Method

Metode *flood* digunakan pada aliran sungai yang lurus dan tidak banyak halangan. Pengukuran dilakukan dengan benda apung yang mengikuti arus, lalu dihitung kecepatan rata-ratanya sepanjang jarak tertentu. Kecepatan air dikoreksi dengan faktor sesuai kondisi sungai.[8]

Tabel 1. Faktor koreksi *Flood method*.

Kondisi Sungai/Saluran	Faktor Koreksi
Saluran beton, persegi Panjang, mulus	0,85
Sungai luas, tenang, aliran bebas ($A > 10 \text{ m}^2$)	0,75
Sungai dangkal, aliran bebas ($A > 10 \text{ m}^2$)	0,65
Dangkal ($A > 5 \text{ m}^2$), aliran turbulen	0,45
Sangat dangkal ($< 0,2 \text{ m}$), aliran turbulen	0,25

(Sumber : *Manual book micro hydro development*, 2005)

Mengukur debit air (Q) dengan currentmeter adalah metode umum karena mudah digunakan dan memiliki kesalahan kecil. Faktor koreksi diabaikan saat menggunakan currentmeter, sehingga debit air dapat dihitung dengan persamaan (18): [9]

$$Q = V_a \times A \quad (18)$$

Keterangan :

Q = Debit air (m^3/s)

V_a = Kecepatan aliran air (m/s)

A = Luas penampang sungai (m^2)

Diketahui bahwa dalam mencari debit air dibutuhkan kecepatan air rata-rata dan juga kecepatan air, maka dari itu kecepatan air rata-rata dan kecepatan air dapat dicari menggunakan persamaan (19) (20): [9]

$$V_f = \frac{m}{s} \quad (19)$$

Keterangan :

V_f = Kecepatan air rata-rata (m/s)

m = Jarak pengukuran (m)

s = Waktu pengukuran (s)

$$V_a = V_f \times C \quad (20)$$

Keterangan :

V_a = Kecepatan air (m/s)

V_f = Kecepatan air rata-rata (m/s)

C = Faktor koreksi

Berdasarkan dalam mencari debit air juga dibutuhkan luas penampang maka dari itu untuk luas penampang dapat dicari menggunakan persamaan (21): [9]

$$A = l \times d \quad (21)$$

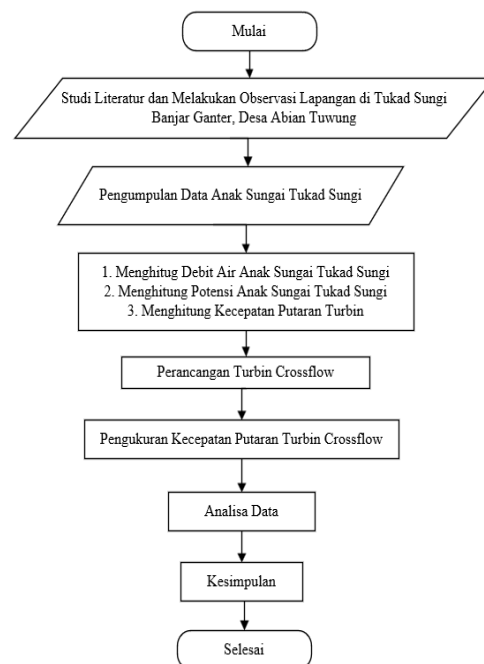
Keterangan :

A = Luas penampang sungai (m^2)

l = Lebar sungai (m)

d = Kedalaman rata-rata sungai (m)

Setelah itu, dilakukan pengumpulan data dari anak sungai yang meliputi pengukuran debit air, estimasi potensi energi yang dapat dihasilkan, dan kecepatan putaran turbin yang diharapkan. Data hasil pengukuran dianalisis untuk menilai efisiensi dan kinerja turbin, yang kemudian digunakan sebagai dasar untuk menyusun kesimpulan dari penelitian ini. Seluruh proses penelitian ditutup dengan dokumentasi hasil serta evaluasi akhir untuk mengidentifikasi potensi pengembangan teknologi turbin pada aliran air di lokasi yang diteliti. Gambar 2 menunjukkan tahapan penelitian.



Gambar 3. Tahapan Penelitian

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini berlokasi di anak sungai Tukad Sungai, Banjar Ganter, Desa Abian Tuwung, Kecamatan Kediri, Kabupaten Tabanan, Provinsi Bali. Penelitian ini, juga dilaksanakan di Lab Konversi Energi Teknik Elektro, Universitas Udayana dalam proses rancang bangun PLTMH tersebut. Penelitian ini dilakukan pada bulan Oktober 2023 hingga bulan Juni 2024.

Diagram alur di atas menggambarkan tahapan penelitian untuk merancang dan mengukur kinerja turbin *crossflow* di Sungai Tukad, Banjar Ganter, Desa Abian Tuwung.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perancangan Alat PLTMH

4.1.1 Prediksi Debit Air

Debit air anak sungai Tukad Sungai Untuk menghitung debit air di anak sungai Tukad Sungai, diperlukan luas penampang sungai dan kecepatan aliran airnya. Luas penampang sungai didapatkan menggunakan persamaan berikut.

$$A = \frac{1}{2} \times (\text{lebar atas} \times \text{lebar bawah}) \times \text{kedalaman sungai}$$

$$A = \frac{1}{2} \times (4,45 \times 2,20) \times 0,35$$

$$A = \frac{1}{2} 1,71 \text{ m}^2$$

1. Kecepatan Aliran Air

Kecepatan aliran dihitung dengan membagi jarak tempuh benda apung dengan waktu tempuhnya:

$$V_f = \frac{\text{jarak}}{\text{waktu}}$$

$$V_f = \frac{17,5}{28}$$

$$V_f = 0,625 \text{ m/s}$$

2. Faktor koreksi kecepatan air

Karena kecepatan di permukaan lebih besar daripada kecepatan rata-rata aliran, kita gunakan faktor koreksi (C). Kecepatan rata-rata aliran (V_a) dihitung dengan:

$$V_a = V_f \times C$$

$$V_a = 0,625 \times 0,45$$

$$V_a = 0,281 \text{ m/s}$$

3. Debit air

Debit air diperoleh dengan mengalikan luas penampang air (A) dengan kecepatan rata-rata aliran:

$$Q = \text{luas penampang air} \times \text{kecepatan air}$$

$$Q = 1,71 \times 0,281$$

$$Q = 0,47 \text{ m}^3/\text{s}$$

Sehingga didapatkan debit air anak sungai Tukad Sungai sebesar $0,47 \text{ m}^3/\text{s}$. hal tersebut tidak jauh berbeda dengan data yang diberikan Badan Wilayah Sungai Bali-Penida (2022) yakni debit rata-rata sebesar $0,44 \text{ m}^3/\text{s}$ perbulan.

4.1.2 Potensi

Potensi daya listrik yang dapat dihasilkan dari Anak Sungai Tukad Sungai. Daya tersedia pada turbin (P_h) dihitung dengan rumus:

$$P_h = \rho \times g \times Q \times H_{net}$$

Di mana ρ adalah massa jenis air (1000 kg/m^3), g adalah percepatan gravitasi ($9,8 \text{ m/s}^2$), Q adalah debit aliran air ($0,44 \text{ m}^3/\text{s}$), dan H_{net} adalah tinggi jatuh air ($1,99 \text{ m}$).

Dengan memasukkan nilai-nilai tersebut, kita memperoleh:

$$P_h = 1000 \times 9,8 \times 0,44 \times 1,99$$

$$P_h = 8580,88 \text{ Watt} \rightarrow 8,580 \text{ kW}$$

Persamaan ini mencerminkan potensi energi yang dapat dihasilkan oleh turbin berdasarkan parameter fisik yang ada, yaitu kekuatan gravitasi dan volume air yang mengalir.

Setelah mengetahui daya tersedia, perlu menghitung daya keluaran dari turbin (P_t). Ini dilakukan dengan mempertimbangkan efisiensi turbin, dinyatakan dalam persamaan:

$$P_t = P_h \times \eta$$

Dengan (η) adalah efisiensi turbin yang diasumsikan 65% (0,65). Dengan menghitung daya keluaran, kita mendapatkan:

$$P_t = 8580,88 \times 0,65$$

$$P_t = 5577,572 \text{ Watt} \rightarrow 5,577 \text{ kW}$$

Persamaan diatas menunjukan bahwa aliran Anak Sungai Tukad Sungai memiliki potensi daya listrik sebesar $5577,572 \text{ watt}$ atau sekitar $5,577 \text{ kW}$. Berdasarkan klasifikasi *hydropower*, potensi tersebut termasuk dalam mikrohidro yakni berkisar 5-100 kW. Dari perhitungan diatas, menunjukkan bahwa meskipun daya yang tersedia cukup besar, efisiensi turbin mempengaruhi berapa banyak daya yang dapat dimanfaatkan. Kehilangan daya ini bisa terjadi akibat berbagai faktor seperti efisiensi turbin, efisiensi transmisi dan efisiensi dari generator.

4.2 Perancangan Prototype PLTMH

4.2.1 Debit Air Digunakan Pada Prototype PLTMH

Perancangan *prototype* PLTMH didasarkan pada nilai debit sebesar $0,026 \text{ m}^3/\text{s}$ dan nilai $Head_{net}$ sebesar $2,1 \text{ m}$ serta daya yang ditargetkan untuk dibangkitkan sebesar 500 watt . Debit air yang digunakan berdasarkan perhitungan berikut :

$$P_h = \rho \times g \times Q \times H_{net}$$

$$500 \text{ Watt} = 1000 \times 9,8 \times Q \times 1,9$$

$$500 \text{ Watt} = 18620 \times Q$$

$$500 \text{ Watt} = 18620 Q$$

$$Q = \frac{500}{18620}$$

$$Q = 0,026 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.2.2 Potensi Daya Listrik Anak Sungai Tukad Sungi Pada Prototype PLTMH

1. Daya tersedia Turbin

Daya tersedia pada turbin dapat ditentukan menggunakan persamaan 1 sebagai berikut (Penche, 1998):

$$P_h = \rho \times g \times Q \times H_{net}$$

$$P_h = 1000 \times 9,8 \times 0,026 \times 1,9$$

$$P_h = 484,12 \text{ Watt}$$

2. Daya Keluaran Turbin

Daya keluaran dari turbin dapat ditentukan menggunakan persamaan 2 sebagai berikut (Penche, 1998):

$$P_t = \rho \times g \times Q \times H_{net} \times \eta$$

$$P_t = P_h \times \eta$$

$$P_t = 484,12 \times 0,90$$

$$P_t = 435,708 \text{ watt}$$

3. Kecepatan Putaran Turbin

Kecepatan putaran turbin dapat ditentukan menggunakan persamaan 4 sebagai berikut :

$$N = 513,25 \frac{H_{net}^{0,745}}{\sqrt{P_t}}$$

$$N = 513,25 \frac{1,9^{0,745}}{\sqrt{0,435708}}$$

$$N = 513,25 \times \frac{1,613}{2,1}$$

$$N = 571,334 \text{ rpm}$$

Menghitung kecepatan spesifik turbin dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$N_s = N \times \frac{P_t^{0,5}}{H_{net}^{1,25}}$$

$$N_s = 1254,351 \times \frac{0,435708^{0,5}}{1,9^{1,25}}$$

$$N_s = 371,171 \text{ rpm}$$

4.2.3 Perancangan Turbin Crossflow Prototype PLTMH

Desain turbin Crossflow didasarkan pada ukuran runner dan nozzle turbin. Dimensi yang perlu ditentukan mencakup lebar runner, luas runner, diameter luar dan dalam runner, kecepatan aliran maksimum pada runner, jarak antar sudu, ketebalan semburan nozzle, radius kelengkungan sudu, serta jumlah sudu [9].

1. Luas Runner Turbin

Menentukan luas runner turbin dapat ditentukan menggunakan persamaan 6 sebagai berikut :

$$LD_1 = \frac{2,63 \times Q}{\sqrt{H_{net}}}$$

$$LD_1 = \frac{2,63 \times 0,026}{\sqrt{1,9}}$$

$$LD_1 = 0,049 \text{ m}^2 \rightarrow 4,9 \text{ cm}^2$$

2. Panjang Sudu Runner Turbin

Panjang sudu runner turbin dapat ditentukan menggunakan persamaan 7 sebagai berikut :

$$L = \frac{Q \times N}{50 \times H_{net}}$$

$$L = \frac{0,026 \times 1254}{50 \times 1,9}$$

$$L = 0,34 \text{ m} \rightarrow 34 \text{ cm}$$

3. Diameter Luar Turbin

Menentukan diameter luar turbin dapat menggunakan persamaan 8 sebagai berikut:

$$D_1 = 2,63 \times \frac{Q}{L \sqrt{H_{net}}}$$

$$D_1 = 2,63 \times \frac{0,026}{0,34 \times \sqrt{1,9}}$$

$$D_1 = 0,145 \text{ m}^2 \rightarrow 14,5 \text{ cm}^2$$

4. Diameter Dalam Turbin

Menentukan diameter dalam turbin dapat menggunakan persamaan 9 sebagai berikut :

$$D_2 = \frac{2}{3} \times D_1$$

$$D_2 = \frac{2}{3} \times 0,145$$

$$D_2 = 0,096 \text{ m}^2 \rightarrow 9,6 \text{ cm}^2$$

5. Jarak Antar Sudu Runner Turbin

Jarak antar sudu dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 10 sebagai berikut :

$$\begin{aligned} K &= 0,174 \times D_1 \\ K &= 0,174 \times 0,145 \\ K &= 0,025 \text{ m} \rightarrow 2,5 \text{ cm} \end{aligned}$$

6. Jumlah Sudu Runner Turbin

Jumlah sudu dari runner turbin dapat ditentukan menggunakan persamaan 11 sebagai berikut :

$$\begin{aligned} N &= \frac{\pi \times D_1}{K} \\ N &= \frac{3,14 \times 0,145}{0,025} \\ N &= 18,21 \rightarrow 18 \text{ sudu} \end{aligned}$$

7. Lebar Sudu Runner Turbin

Lebar sudu runner turbin dapat ditentukan menggunakan persamaan 12 sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \alpha &= 0,17 \times D_1 \\ \alpha &= 0,17 \times 0,145 \\ \alpha &= 0,024 \text{ m} \rightarrow 2,4 \text{ cm} \end{aligned}$$

8. Ketebalan Sudu

Ketebalan sudu runner dapat ditentukan menggunakan persamaan 13 sebagai berikut :

$$\begin{aligned} S_1 &= K \times D_1 \\ S_1 &= 0,0087 \times 14,5 \\ S_1 &= 0,126 \text{ cm} \rightarrow 1,26 \text{ mm} \end{aligned}$$

9. Jarak Antar Sudu Diameter Dalam

Untuk menentukan jarak antar sudu pada diameter dalam, dapat dapat ditentukan dengan persamaan 14 sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Keliling lingkaran} &= 2 \times \pi \times r \\ \text{Keliling lingkaran} &= 2 \times 3,14 \times 4,8 \\ \text{Keliling lingkaran} &= 30,144 \text{ cm} \end{aligned}$$

Setelah didapat keliling dari diameter dalam, maka jarak antar sudu sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Jarak antar sudu diameter dalam} &= \frac{\text{Keliling lingkaran}}{\text{Jumlah sudu}} \\ \text{Jarak antar sudu diameter dalam} &= \frac{30,144}{18} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jarak antar sudu diameter dalam} &= 1,67 \text{ cm} \end{aligned}$$

10. Ketebalan Semburan Nozzel

Ketebalan semburan nozzel dapat ditentukan dengan persamaan 15 sebagai berikut:

$$\begin{aligned} M &= 0,23 \frac{Q}{L \times \sqrt{H_{net}}} \\ M &= 0,23 \frac{0,026}{0,34 \times \sqrt{1,9}} \\ M &= 0,23 \times 0,055 \\ M &= 0,012 \text{ m} \rightarrow 1,2 \text{ cm} \end{aligned}$$

11. Jari-Jari Kelengkungan Sudu Runner Turbin

Jari-jari kelengkungan sudu runner turbin dapat ditentukan menggunakan persamaan 16 sebagai berikut :

$$\begin{aligned} r_1 &= 0,163 \times D_1 \\ r_1 &= 0,163 \times 0,145 \\ r_1 &= 0,023 \text{ m} \rightarrow 2,3 \text{ cm} \end{aligned}$$

12. Torsi Turbin

Torsi turbin dapat ditentukan menggunakan persamaan 17 sebagai berikut :

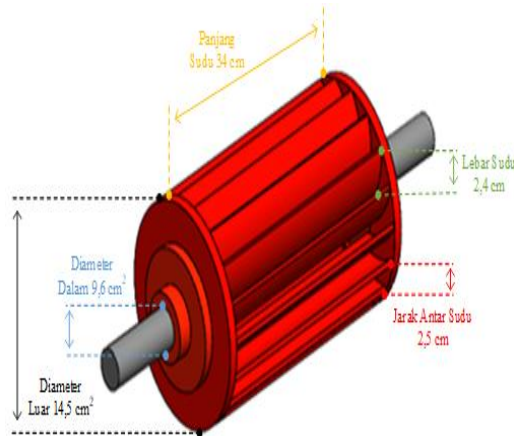
$$\begin{aligned} T &= \frac{P_t}{2\pi \frac{N}{60}} \\ T &= \frac{435,708 \text{ Watt}}{2 \times 3,14 \frac{571,351}{60}} \\ T &= 7,28 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Tabel 3. Spesifikasi Turbin Crossflow

Spesifikasi Turbin Crossflow	
Daya Turbin	435,708 Watt
Putaran Turbin	571,334 rpm
Kecepatan Spesifik Putaran Turbin	371,171 rpm
Head Net	1,9 m
Debit Aliran	0,026 m ³ /s
Effisiensi Turbin	90%
Posisi Poros	Horizontal
Sudut Serang	34°
Torsi Turbin	3,319 Nm

Tabel 4. Karakteristik Runner Turbin Crossflow

Karakteristik <i>Runner Turbin Crossflow</i>	
Diameter Luar	14,5 cm ²
Diameter Dalam	9,6 cm ²
Jumlah Sudu	18 sudu
Jarak Antar Sudu	2,5 cm
Lebar Sudu	2,4 cm
Panjang Sudu	34 cm
Jari-Jari Kelengkungan Sudu	2,3 cm



Gambar 5. Rancangan *Runner Turbin Crossflow* Pada *Prototype PLTMH*

3.1 Analisis Potensi Daya Listrik Anak Sungai Tukad Sungai

Daya tersedia pada turbin (P_h) dihitung dengan rumus:

$$P_h = \rho \times g \times Q \times H_{net}$$

Dengan ρ adalah massa jenis air (1000 kg/m³), g adalah percepatan gravitasi (9,8 m/s²), Q adalah debit aliran air (0,44 m³/s), dan H_{net} adalah tinggi jatuh air (1,99 m). Dengan memasukkan nilai-nilai tersebut, kita memperoleh:

$$P_h = 1000 \times 9,8 \times 0,44 \times 1,99$$

$$P_h = 8580,88 \text{ Watt} \rightarrow 8,58 \text{ kW}$$

Persamaan ini mencerminkan potensi energi yang dapat dihasilkan oleh turbin berdasarkan parameter fisik yang ada, yaitu kekuatan gravitasi dan volume air yang mengalir.

Setelah mengetahui daya tersedia, kita juga perlu menghitung daya keluaran dari turbin (P_t). Ini dilakukan dengan

mempertimbangkan efisiensi turbin, dinyatakan dalam persamaan:

$$P_t = P_h \times \eta$$

Dengan (η) adalah efisiensi turbin yang diasumsikan 65% (0,65). Dengan menghitung daya keluaran, kita mendapatkan:

$$P_t = 8580,88 \times 0,65$$

$$P_t = 5577,572 \text{ Watt} \rightarrow 5,57 \text{ kW}$$

Persamaan diatas menunjukkan bahwa aliran Anak Sungai Tukad Sungai memiliki potensi daya listrik sebesar 5577,57 watt atau sekitar 5,57 kW. Berdasarkan klasifikasi *hydropower*, potensi tersebut termasuk dalam mikrohidro yakni berkisar 5-100 kW. Dari perhitungan diatas, menunjukkan bahwa meskipun daya yang tersedia cukup besar, efisiensi turbin mempengaruhi berapa banyak daya yang dapat dimanfaatkan. Kehilangan daya ini bisa terjadi akibat berbagai faktor seperti efisiensi turbin, efisiensi transmisi dan efisiensi dari generator.

3.2 Analisis Putaran Turbin

Pengukuran kecepatan putaran turbin pada *prototype* Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) merupakan langkah penting dalam proses evaluasi kinerja sistem. Kecepatan turbin diukur untuk memastikan bahwa turbin berputar sesuai dengan kecepatan yang dirancang, yang berpengaruh langsung pada efisiensi dan stabilitas pembangkit. Pengukuran dilakukan menggunakan *tachometer* yang diarahkan ke poros turbin. Dengan memastikan kecepatan turbin sesuai dengan spesifikasi, dapat dipastikan bahwa energi yang dihasilkan akan optimal dan sistem dapat beroperasi dengan aman dan efisien. Adapun hasil pengukuran dari putaran turbin adalah sebagai berikut.

Tabel 5. Hasil Pengukuran Kecepatan Putaran Turbin Sebelum dan Sesudah Dikopel Generator

No.	Putaran Turbin Sebelum Dikopel Generator (rpm)	Rata-Rata (rpm)	Putaran Turbin Setelah Dikopel Generator (rpm)	Rata-Rata (rpm)
1	524,3	527,88	307,8	315,8
2	528,9		319,1	
3	530,6		323,1	
4	527,2		313,1	
5	528,4		315,9	

Data pada tabel 5 menunjukkan bahwa terjadi perubahan kecepatan putaran turbin sebelum dikopel generator dengan sesudah dikopel generator. Kecepatan putaran turbin sebelum dikopel generator, rata-rata diperoleh 527,88 rpm, sedangkan pada saat dikopel generator, kecepatan rata-rata sebesar 315,8 rpm. Penurunan kecepatan itu terjadi karena, ketika turbin dan generator dikopel, generator mulai mengonsumsi energi mekanik dari turbin untuk menghasilkan energi listrik serta adanya rugi-rugi gesekan antara *pulley* dengan *v-belt* saat mentransmisikan energi mekanik.



Gambar 6. Proses Pengukuran Kecepatan Turbin



Gambar 7. Hasil Pengukuran Turbin

5. KESIMPULAN

Anak sungai Tukad Sungai memiliki potensi daya listrik 5,298 kW dengan debit air rata-rata 0,44 m³/s per-bulan. Pemanfaatan debit 0,026 m³/s dapat menghasilkan daya 313,277 W dan putaran turbin 571,171 rpm. Namun, setelah dikopel dengan generator, putaran rata-rata turbin turun menjadi 315,8 rpm dari 527,88 rpm, menunjukkan penurunan kecepatan akibat beban generator.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air. (2019). "Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Air Skala Kecil di Wilayah Bali." *Jurnal Sumber Daya Air*, 35(2), 101-114.
- [2] Badan Pusat Statistik Bali. (2022). *Data Statistik Wilayah Bali: Kependudukan dan Energi*. Denpasar: BPS Bali.
- [3] Balai Wilayah Sungai Bali-Penida (2023) Data Tukad Sungai Tahun 2001-2022.
- [4] Sutrisno, A. (2018). *Energi Terbarukan: Mikrohidro*. Jakarta: Pustaka Energi.
- [5] Hasyim, M. F. (2015). *Studi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Dengan Pemanfaatan Potensi Air di Wonosalam*. Universitas Jember.
- [6] Gerico, P. (2020). Studi Perencanaan Pembangkit Listrik Minihidro (PLTMH) Di Sungai Lae Pinang Dan Sungai Sumonggo Kabupaten Humbang Hasunduta. Universitas Sumatra Utara.
- [7] Mockmore, C. . (1949). *The Banki Water Turbine*. Engineering Experiment Station Oregon State System of Higher Education.
- [8] Putra, I. K. O. P., Giriantari, I. A. D., Setiawan, I. N. (2023). Studi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Pada Saluran Irigasi Desa Angantaka Abiansemal Badung. *Jurnal SPEKTRUM*, Vol.10, No, Halaman 1-10.
- [9] Mockmore, C. . (1949). *The Banki Water Turbine*. Engineering Experiment Station Oregon State System of Higher education.