

RANCANG BANGUN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO DENGAN PEMANFAATAN ALIRAN ANAK SUNGAI MENGUNAKAN *CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSMISSION*

I Nyoman Lanang Legawa¹, 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 : lqwlanang@gmail.com¹, cokindra@unud.ac.id², janardana@unud.ac.id³

ABSTRAK

Indonesia telah menetapkan target ambisius untuk meningkatkan bauran energi baru dan terbarukan (EBT), Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) menjadi salah satu energi baru dan terbarukan (EBT). Penelitian ini mengembangkan PLTMH dengan memanfaatkan aliran anak sungai Tukad Sengi, Banjar Ganter, Desa Abian Tuwung, menggunakan *Continuously Variable Transmission* (CVT) sebagai transmisi antara turbin dan generator. Debit air sebesar 0,44 m³/s dapat menghasilkan daya hingga 8,580 kW, dan 0,026 m³/s dimanfaatkan untuk menghasilkan daya hidrolis 484,12 watt dan output generator 313,227 watt. Pengujian menunjukkan penurunan kecepatan turbin dari 527,88 rpm menjadi 315,8 rpm (40%), sementara kecepatan generator meningkat dari 315,8 rpm menjadi 1509,8 rpm (378%). Meskipun CVT meningkatkan kecepatan generator, penurunan efisiensi sistem terjadi akibat ketidakmampuan CVT dalam menstabilkan putaran dan *slip* pada v-belt yang dipicu oleh percikan air. Penurunan kecepatan turbin dan torsi yang tidak memadai menunjukkan bahwa penggunaan CVT tidak jauh berbeda dengan sistem *pulley* konvensional.

Kata kunci : Mikrohidro, Transmisi Mekanik, *Continuously Variable Transmission*

ABSTRACT

Indonesia has set ambitious targets to increase the share of renewable energy in its energy mix, with Micro-Hydro Power Plants (PLTMH) being one of the renewable energy solutions. This study focuses on developing a PLTMH utilizing the flow of the Tukad Sengi tributary in Banjar Ganter, Desa Abian Tuwung, employing a *Continuously Variable Transmission* (CVT) as the transmission mechanism between the turbine and generator. A water flow rate of 0.44 m³/s was capable of generating up to 8.580 kW, while a flow rate of 0.026 m³/s was used to produce a hydraulic power of 484.12 watts and a generator output of 313.227 watts. Testing revealed a decrease in turbine speed from 527.88 rpm to 315.8 rpm (40%), while the generator speed increased from 315.8 rpm to 1509.8 rpm (378%). Although the CVT improved generator speed, the system efficiency decreased due to the inability of the CVT to stabilize rotations and the occurrence of v-belt slippage caused by water splashes. The reduction in turbine speed and insufficient torque indicated that the CVT's performance was not significantly different from that of conventional pulley systems.

Key Words : Microhydro, Mechanical Transmission, *Continuously Variable Transmission*

1. PENDAHULUAN

Indonesia telah menetapkan target ambisius untuk meningkatkan bauran energi baru dan terbarukan (EBT) dalam kebijakan nasionalnya. Berdasarkan Kebijakan Energi Nasional (KEN) yang diperbarui dan

didukung oleh Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) 2021-2050, pemerintah menargetkan penggunaan EBT sebesar 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050. Target ini bertujuan untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil

sekaligus mendukung pengurangan emisi karbon secara global sesuai dengan Perjanjian Paris [7] [8]. Dalam konteks ini, pengembangan pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) menjadi salah satu solusi potensial untuk meningkatkan kontribusi energi terbarukan, khususnya di daerah yang memiliki potensi aliran sungai.

Provinsi Bali, sebagai salah satu wilayah dengan tingkat konsumsi energi yang tinggi akibat sektor pariwisata, menghadapi tantangan besar dalam memenuhi kebutuhan energinya. Hingga saat ini, sebagian besar pasokan listrik Bali bergantung pada jaringan listrik interkoneksi Jawa-Bali, yang membuat provinsi ini rentan terhadap gangguan pasokan. Selain itu, Bali juga memiliki potensi sumber daya energi terbarukan, termasuk tenaga air skala kecil seperti mikrohidro. Berdasarkan Rencana Umum Energi Daerah (RUED) Bali, pengembangan PLTMH dianggap sebagai salah satu solusi strategis untuk mengurangi ketergantungan pada sumber energi konvensional serta meningkatkan kemandirian energi [10] [2].

Microhydro Power Plants (PLTMH) merupakan salah satu solusi alternatif untuk pemenuhan kebutuhan energi listrik dengan dampak lingkungan yang minim [4]. Di Indonesia, terdapat banyak sungai dan anak sungai yang berpotensi dikembangkan sebagai sumber pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH). Penelitian ini berfokus pada anak sungai Tukad Sungai yang terletak di Banjar Ganter, Desa Abian Tuwung, Kecamatan Kediri, Tabanan. Pemanfaatan sumber daya ini tidak hanya relevan dari sisi kebutuhan energi, tetapi juga mendukung upaya pelestarian lingkungan karena PLTMH memiliki dampak ekologis yang relatif rendah dibandingkan pembangkit listrik lainnya

Menurut data dari Balai Wilayah Sungai Bali-Penida (2022), rata-rata debit air di anak sungai Tukad Sungai tercatat sebesar 0,44 m³/s [3]. Dimensi fisik sungai, seperti lebar 4,45 meter, luas penampang air 1,71 m², kedalaman 0,35 meter, serta aliran air tercatat memiliki kecepatan sekitar 0,28 m/s, menunjukkan bahwa sungai ini memiliki potensi yang signifikan untuk dijadikan sumber energi. Dengan *head* sebesar 2,1 meter, hasil perhitungan menunjukkan bahwa potensi daya hidrolis yang dapat dihasilkan mencapai 8,580 kW. Menurut Kementerian ESDM, pengklasifikasian Pembangkit Listrik Tenaga Air didasarkan

pada daya yang dihasilkan, dimana mikrohidro berkapasitas > 5 kW sampai dengan 1 MW sehingga, anak sungai Tukad Sungai yang berpotensi dimanfaatkan menjadi PLTMH [6].

Potensi tersebut belum dimanfaatkan dengan baik oleh pihak atau instansi terkait. Mengacu dari ketersediaan potensi debit air menurut data Badan Wilayah Sungai Bali-Penida (2022) tersebut, maka pada penelitian ini akan dimanfaatkan sebesar 0,026 m³/s, dari hasil perhitungan debit air yang dimanfaatkan tersebut berpotensi membangkitkan daya hidrolis berkisaran sebesar 500 watt. Potensi energi ini dapat dimanfaatkan untuk menerangi jalan yang mengarah ke Den Uma Cafe, salah satu destinasi wisata di kawasan tersebut.

Sehubungan dengan hal tersebut, penelitian *capstone* akan dilakukan di anak sungai Tukad Sungai, Banjar Ganter, Desa Abian Tuwung. Data mengenai debit air, *head* atau jatuh air, dan kecepatan rotasi dari turbin (Ns) yang telah diperoleh oleh I Gede Agus Krisna Raharja dan Komang Satria Panduwinata akan digunakan dalam studi lanjutan. Berdasarkan data yang ada, penelitian ini bertujuan untuk merencanakan *Microhydro Power Plants* atau Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) di anak sungai Tukad, Banjar Ganter, Desa Abian Tuwung, dengan menggunakan *Continuously Variable Transmission* (CVT).

Penggunaan teknologi *Continuously Variable Transmission* (CVT) pada sistem PLTMH ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi dan kinerja sistem pembangkit. CVT memungkinkan pengaturan kecepatan dan torsi secara optimal, sehingga memaksimalkan konversi energi hidrolis menjadi energi listrik. Diharapkan melalui penelitian ini, dapat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pengembangan energi terbarukan di wilayah tersebut, sekaligus meningkatkan aksesibilitas dan kenyamanan masyarakat setempat.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH), yang juga dikenal sebagai mikrohidro, merupakan sistem pembangkit listrik berskala kecil yang memanfaatkan energi air dari saluran irigasi, sungai, atau air terjun. Sistem ini terdiri dari tiga komponen utama, yaitu air sebagai sumber energi,

turbin, dan generator [4]. Mikrohidro mengubah energi potensial yang berasal dari jatuhnya air (*head*) menjadi energi listrik, dimana semakin tinggi ketinggian jatuhnya air, semakin besar pula energi yang dapat dihasilkan. Mikrohidro dapat beroperasi dengan ketinggian air yang relatif rendah, menghasilkan energi yang lebih rendah jika dibandingkan dengan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) besar, sehingga peralatan yang digunakan lebih sederhana dan memiliki dampak lingkungan yang lebih kecil. Sistem ini cocok untuk daerah terpencil dan memiliki beberapa keuntungan, seperti biaya rendah, konstruksi sederhana, tidak mencemari lingkungan, dan mendorong pelestarian hutan.

2.2 Kecepatan Putaran Turbin

Perhitungan performa turbin air, kecepatan spesifik menjadi parameter penting yang mempengaruhi efisiensi dan karakteristik operasional turbin dalam berbagai kondisi *head* dan daya. Kecepatan putaran turbin (*N*). Perhitungan dapat dilakukan menggunakan persamaan (1) berikut ini [9]:

$$N = 513,25 \frac{H_{Net}^{0,745}}{\sqrt{P_t}} \quad (1)$$

Kecepatan spesifik turbin (*N_s*), yang merupakan parameter turunan dari kecepatan putaran turbin, dapat dihitung dengan persamaan (2) berikut [9]:

$$N_s = N \times \frac{P_t^{0,5}}{H_{net}^{1,25}} \quad (2)$$

Keterangan:

N = Kecepatan rotasi turbin air dalam satuan rpm

H_{net} = *Head* bersih dalam satuan meter

P_t = Daya turbin dalam satuan watt

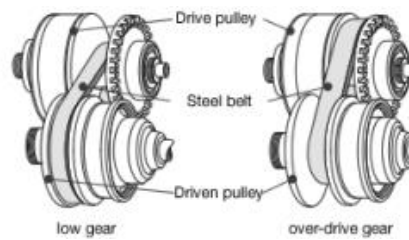
N_s = Spesifik kecepatan rotasi turbin air dalam satuan rpm

2.3 Continuously Variable Transmission

Continuously Variable Transmission (CVT) merupakan sistem yang mentransfer tenaga dari mesin ke roda belakang melalui sabuk yang menghubungkan *drive pulley* dan *driven pulley*, serta bekerja otomatis berdasarkan prinsip gesekan. Berbeda dengan transmisi manual, CVT tidak memerlukan *gearbox* dan tidak memiliki pengunci gigi, sehingga pengendara tidak

perlu mengatur transmisi saat menyesuaikan kecepatan [1].

Optimalitas kinerja CVT tergantung pada desain dan karakteristik mesin, biasanya beroperasi efisien di rentang 2.000 hingga 4.500 RPM. Pada sepeda motor mati. Daya yang dihasilkan oleh tenaga dari poros engkol disalurkan ke roda belakang melalui dua *pulley* yang saling terhubung. oleh sabuk penggerak (*belt*), tanpa memerlukan pemindah gigi. Teknologi CVT memungkinkan penyaluran tenaga yang halus dan efisien, dengan efisiensi mencapai 80-90% [5].



Gambar 1. Konstruksi umum CVT (Sumber : Jones, 2018)

2.3 Pulley

Pulley berfungsi untuk memindahkan daya antara poros dengan bantuan sabuk. Rasio kecepatan dan diameter memiliki hubungan berbanding terbalik. Pemilihan *pulley* yang sesuai sangat penting untuk mencapai rasio kecepatan yang diharapkan. Diameter luar *pulley* berfungsi sebagai alur untuk sabuk, sementara diameter dalam digunakan untuk penampang poros. Material yang sering digunakan untuk membuat *pulley* termasuk besi tuang, baja, aluminium, dan kayu. *Pulley* berbahan besi memiliki faktor gesekan dan karakteristik kontrol yang baik, sedangkan *pulley* baja press cenderung memiliki gesekan lebih rendah namun lebih rentan terhadap keausan [12].

2.4 Sabuk V

Sabuk-V adalah sabuk tak berujung yang terbuat dari karet dengan penampang trapesium dan diperkuat oleh tendon dan tali. Inti dari sabuk umumnya dibuat dari tendon tetoron. *Pulley* yang dipasangkan dengan sabuk-v memiliki penampang berbentuk trapesium. Jenis sabuk ini banyak

digunakan dalam industri karena desainnya memungkinkan sabuk untuk terhimpit dalam jalur *pulley*, yang meningkatkan gesekan dan memungkinkan transmisi torsi yang lebih tinggi sebelum terjadinya *slip*. Sabuk-v dilengkapi dengan serat berkekuatan tinggi, yang bisa terbuat dari serat alami, serat sintetis, atau baja, guna menambah daya tahan dan fleksibilitas saat melilit *pulley*. Pelapis luar sering ditambahkan untuk memperpanjang umur sabuk. Daya yang ditransmisikan oleh sabuk-V tergantung pada beberapa faktor [12]. Panjang keliling sabuk dapat dihitung menggunakan persamaan (3) sebagai berikut:

$$L = 2C + \frac{\pi}{2}(d_p + D_p) + \frac{1}{4C}(d_p + D_p) \quad (3)$$

Keterangan :

- L = Panjang sabuk dalam satuan (milimeter)
- C = Jarak antara poros dalam satuan (milimeter)
- d_p = Diameter *pulley* yang digerakan dalam satuan(milimeter)
- D_p = Diameter *pulley* penggerak dalam satuan (milimeter)

2.5 Transmisi Mekanik

Transmisi mekanik berperan dalam mentransfer daya dari turbin ke generator. Apabila kecepatan putaran turbin sesuai dengan kecepatan putaran generator, transmisi mekanik bisa langsung dihubungkan. Namun, apabila kecepatan kurang sesuai, maka perlu dipasang *pulley* dan sabuk. Perbandingan diameter *pulley* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (4) ini [11] :

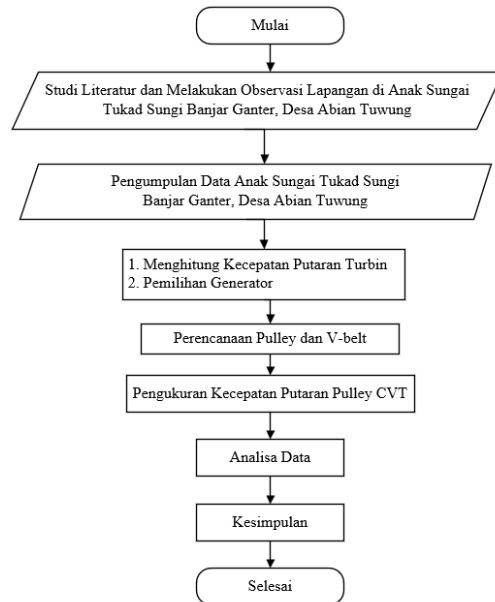
$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} \quad (4)$$

Keterangan :

- n_1 = Kecepatan putaran poros pertama dalam satuan (rpm)
- n_2 = Kecepatan rotasi poros kedua dalam satuan (rpm)
- d_1 = Diameter *pulley* pemutar (milimeter)
- d_2 = Diameter *pulley* yang diputar (milimeter)

3. METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian ini berada di anak sungai Tukad Sungai, Banjar Ganter, Desa Abian Tuwung, Kecamatan Kediri, Kabupaten Tabanan, Provinsi Bali. Selain itu, penelitian ini dilakukan juga pada Laboratorium Konversi Energi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, yang terlibat dalam proses perancangan dan pembangunan PLTMH. Penelitian ini berlangsung dari Oktober 2023 hingga Juni 2024. Gambar 2 memperlihatkan urutan tahap dalam penelitian.



Gambar 2. Urutan Tahap dalam Penelitian

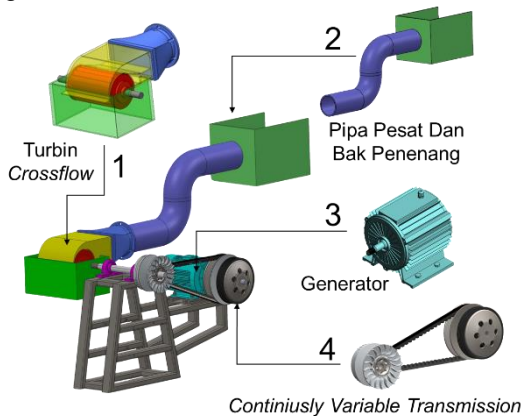
Penelitian diawali dengan kajian pustaka dan pengamatan langsung ke lapangan yakni, di anak sungai Tukad Sungai, Banjar Ganter, Desa Abian Tuwung. Setelah itu, dilakukan pengambilan data mengenai debit air dan *head* sungai. Setelah data dikumpulkan, langkah berikutnya adalah menghitung kecepatan putaran turbin yang dibutuhkan untuk memaksimalkan kinerja sistem. Setelah menghitung kecepatan turbin, dilakukan pemilihan generator yang sesuai untuk menghasilkan energi listrik. Selanjutnya, perencanaan *pulley* dan V-belt diatur untuk memastikan transmisi daya yang efisien antara komponen. Kemudian, dilakukan pengukuran kecepatan putaran pada sistem CVT untuk memastikan kesesuaian dengan perencanaan. Semua

data yang dikumpulkan kemudian dianalisis untuk menarik kesimpulan mengenai efektivitas sistem PLTMH yang dirancang. Proses ini diakhiri dengan penulisan kesimpulan dan penelitian dinyatakan selesai.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perancangan Alat PLTMH

Desain PLTMH ini didasarkan pada informasi data yang diperoleh dari Balai Wilayah Sungai Bali-Penida (2022) serta hasil pengukuran langsung di anak sungai Tukad Sugi, Banjar Ganter, Desa Abian Tuwung. Desain PLTMH dapat diamati pada gambar 3.



Gambar 3. Desain PLTHM

Pada sistem PLTMH, setiap komponen memiliki fungsi yang saling mendukung untuk menghasilkan listrik. Turbin *crossflow* pada nomor 1, berfungsi mengubah energi kinetik dan potensial air menjadi energi mekanik melalui putaran porosnya. Air yang menggerakkan turbin dialirkan melalui pipa pesat dan bak penenang nomor 2, yang berfungsi mengatur aliran air agar stabil dan terarah menuju turbin. Energi mekanik dari turbin kemudian diteruskan ke generator listrik pada nomor 3, melalui *Continuously Variable Transmission* (CVT) pada nomor 4, yang berfungsi sebagai transmisi mekanik untuk menyesuaikan kecepatan putaran turbin dengan kebutuhan generator.

Mengacu dari data yang diperoleh, debit air rata-rata tercatat sebesar 0,44 m³/s, dengan lebar sungai 4,45 m, luas penampang sungai 1,71 m², kedalaman 0,35 m, kecepatan aliran air 0,28 m/s, dan

head 2,1 m, yang menghasilkan potensi daya air sekitar 8,580 kW per bulan.

4.1.1 Kecepatan Putaran Turbin

Kecepatan rotasi turbin dapat ditentukan dengan penerapan rumus (1) yang dapat dilihat dibawah ini ini [9]:

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

$$N = 513,25 \frac{1,99^{0,745}}{\sqrt{5,577}}$$

$$N = 362,86 \text{ rpm}$$

Kecepatan spesifik turbin dapat ditentukan dengan penerapan rumus (2) seperti yang tercantum dibawah ini [9]:

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

$$N_s = 362,86 \times \frac{5,577^{0,5}}{1,99^{1,25}}$$

$$N_s = 362,49 \text{ rpm}$$

Hasil dari perhitungan diatas, didapatkan kecepatan putaran turbin sebesar 362,49 rpm.

4.1.2 Pemilihan Generator

Survei yang dilakukan menunjukkan bahwa Generator Mecc Alternator memiliki hasil yang paling mendekati dari perhitungan pada perencanaan dan ketersediaan generator secara komersial. Generator Mecc Alternator memenuhi kriteria utama untuk PLTMH, dengan frekuensi 50 Hz dan dilengkapi dengan AVR untuk menjaga kestabilan tegangan output. Berikut adalah gambar dan tabel spesifikasi dari Generator Mecc Alternator.



Gambar 4. Generator Mecc Alternator (Sumber : Mototech, 2019)

Tabel 1. Spesifikasi Generator

Model No.	BTP3-1S/4
Prime Output	5,6 kW 7 kVA
Speed	1500 rpm
Numer of Phase	3 Phase
Numer of Pole	4 Pole
Frequency	50 Hz
Efficiency	80%
Output Type	AC Three Phase
Voltage	230/400 V

4.1.3 Perencanaan Pulley dan V-belt CVT

Perhitungan menyatakan bahwa kecepatan putar turbin adalah 362 rpm, sementara kecepatan putar generator mencapai 1500 rpm. Sehingga, diperlukan sistem transmisi mekanik tidak langsung menggunakan pulley dan sabuk. Tenaga dialirkan dari turbin ke generator, dengan kecepatan rotasi pulley yang berbanding terbalik dengan ukuran diameter pulley. Perbandingan antara diameter pulley dapat dihitung menggunakan persamaan (3) berikut [11]:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} \Rightarrow \frac{362}{1500} \Rightarrow \frac{3,62}{15} = \frac{d_2}{d_1}$$

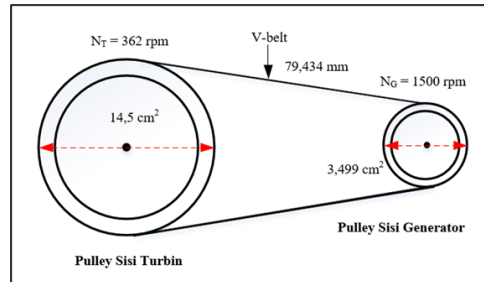
Rasio diameter pulley antara generator dan turbin adalah 15:3,62. Dengan diameter pulley turbin 14,5 cm², kita dapat menghitung diameter pulley untuk generator [11].

$$\begin{aligned} \frac{3,62}{15} &= \frac{d_2}{d_1} \\ 3,62 \times 14,5 \text{ cm}^2 &= 15 \times d_2 \\ d_2 &= \frac{52,49}{15} \\ d_2 &= 3,499 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Dengan jarak antar poros 25,5 cm, panjang v-belt dapat dihitung menggunakan persamaan (3) untuk memastikan agar ruang transmisi mekanik tidak terlalu besar [12].

$$\begin{aligned} L &= 2C + \frac{\pi}{2}(d_p + D_p) + \frac{1}{4C}(d_p + D_p) \\ L &= 2 \times 25,5 + \frac{3,14}{2}(3,499 + 14,5) \\ &\quad + \frac{1}{4 \times 25,5}(3,499 + 14,5) \\ L &= 51 + 28,258 + 0,176 \\ L &= 79,434 \text{ cm} \end{aligned}$$

Hasil dari perhitungan diatas, didapatkan, sabuk yang digunakan memiliki panjang 79,434 cm. Rancangan pulley dan sabuk-v pada PLTMH Anak sungai Tukad Sunngi dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Rancangan Pulley dan Sabuk-v PLTMH Anak Sungai Tukad Sunngi

4.2 Perancangan Prototype PLTMH



Gambar 6. Prototype PLTMH pada Anak Sungai Tukad Sunngi

Realisasi prototype PLTMH terdiri dari bak penenang, pipa pesat, turbin crossflow, CVT, v-belt, generator, dan rangka, seperti terlihat pada gambar 6, yang terpasang di anak sungai Tukad Sunngi Banjar Ganter, Desa Abian Tuwung. Penggunaan bambu sebagai penyangga turbin pada prototype PLTMH adalah solusi sederhana, ekonomis, dan ramah lingkungan yang memanfaatkan material lokal untuk menjaga stabilitas turbin. Dengan kekuatan mekanik yang memadai, bambu cocok untuk pengembangan awal dengan anggaran terbatas.

4.2.1 Kecepatan Putaran Turbin pada Prototype PLTMH

Kecepatan putaran turbin dapat ditentukan menggunakan persamaan (1) sebagai berikut [9]:

$$\begin{aligned} N &= 513,25 \frac{H_{net}^{0,745}}{\sqrt{P_t}} \\ N &= 513,25 \frac{1,9^{0,745}}{\sqrt{0,435708}} \end{aligned}$$

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

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

Kecepatan spesifik turbin dapat ditentukan dengan penerapan rumus (2) berikut ini [9]:

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

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

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

4.2.2 Pemilihan Generator pada Prototype PLTMH



Gambar 7. Generator DORNA (Sumber : Inovasi Hijau)

Survei menunjukkan bahwa Generator DORNA memiliki hasil yang paling mendekati dari perhitungan pada perencanaan dan ketersediaan di pasar. Generator ini memenuhi syarat penting yang harus dipertimbangkan pada pemilihan generator untuk *prototype* Pembangkit Listrik Mikrohidro (PLTMH). Berikut adalah gambar dan tabel spesifikasi dari Generator DORNA.

Tabel 2. Spesifikasi Generator

Model No.	DORNA AC Generator
Prime Output	0,50 kW
Speed	3000 rpm
Torsi	2,37 Nm
Arus	4 A
Frequency	50 Hz
Output Type	AC Three Phase
Voltage	220/380 V
Cos φ	0,8

4.2.3 Perencanaan Pulley dan V-belt CVT pada Prototype PLTMH

Kecepatan turbin yang dirancang adalah 571 rpm, sedangkan generator

memerlukan 3000 rpm. Karena kedua kecepatan tidak sebanding, dibutuhkan sistem transmisi mekanik tidak langsung dengan penggunaan *pulley* dan sabuk sebagai pemidahan daya. Kecepatan rotasi *pulley* berbanding terbalik dengan diameter *pulley*. Perbandingan diameter *pulley* antara turbin dan generator dapat ditentukan dengan rumus (4) berikut ini [11]:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} \Rightarrow \frac{571}{3000} \Rightarrow \frac{5,71}{30} = \frac{d_2}{d_1}$$

Rasio antara diameter *pulley* pada generator dengan diameter *pulley* pada turbin adalah 30:5,71. Dengan diameter *pulley* turbin sebesar 14,5 cm², diameter *pulley* generator dapat dihitung.

$$\frac{5,71}{30} = \frac{d_2}{d_1}$$

$$5,71 \times 14,5 = 30 \times d_2$$

$$d_2 = \frac{82,79}{30}$$

$$d_2 = 2,75 \text{ cm}^2$$

Dengan jarak antar poros 25,5 cm, panjang v-belt dapat dihitung menggunakan persamaan (3) untuk memastikan ruang transmisi mekanik tetap efisien [12].

$$L = 2C + \frac{\pi}{2}(d_p + D_p) + \frac{1}{4C}(d_p + D_p)$$

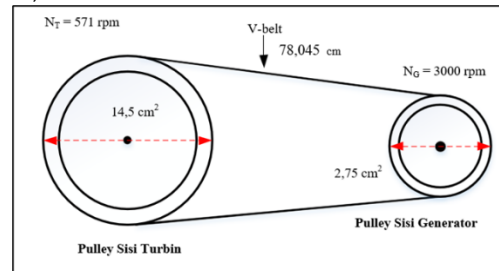
$$L = 2 \times 25,5 + \frac{3,14}{2}(2,75 + 14,5)$$

$$+ \frac{1}{4 \times 25,5}(2,75 + 14,5)$$

$$L = 51 + 27,08 + 0,169$$

$$L = 78,24 \text{ cm}$$

Panjang v-belt yang digunakan adalah 78,24 cm.



Gambar 8. Skema Pulley dan V-belt PLTMH Anak Sungai Tukad Sungai

4.3 CVT Sebagai Transmisi Mekanik Turbin ke Generator

Prototype PLTMH memanfaatkan CVT sebagai transmisi mekanik dari turbin ke generator untuk mengoptimalkan kecepatan putaran, karena *pulley* pada CVT dapat secara otomatis menyesuaikan diameter sesuai dengan perubahan kecepatan. Berikut adalah hasil pengukuran kecepatan putaran yang ditransmisikan oleh CVT. Untuk pengukuran kecepatan putaran turbin baik sebelum maupun sesudah dikopel generator dan kecepatan putaran yang didapat pada generator dapat diperhatikan pada tabel 3 hingga tabel 5 dibawah ini.

Tabel 3. Kecepatan Putaran Turbin Sebelum Dikopel Generator dalam Kondisi Tanpa Beban

No	Putaran Turbin Sebelum Dikopel Generator (rpm)	Rata-Rata (rpm)
1	524,3	527,88
2	528,9	
3	530,6	
4	527,2	
5	528,4	

Tabel 4. Kecepatan Putaran Turbin Sesudah Dikopel Generator dalam Kondisi Tanpa Beban

No	Putaran Turbin Sesudah Dikopel Generator (rpm)	Rata-Rata (rpm)
1	307,8	315,8
2	319,1	
3	323,1	
4	313,1	
5	315,9	

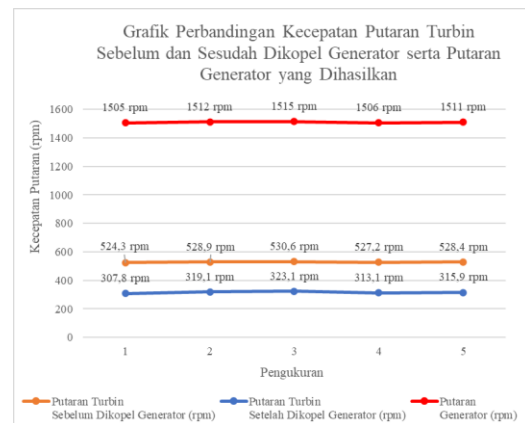
Tabel 5. Kecepatan Putaran Generator dalam Kondisi Tanpa Beban

No	Putaran Generator (rpm)	Rata-Rata (rpm)
1	1505	1509,8
2	1512	
3	1515	
4	1506	
5	1511	

4.4 Analisis Pengaruh CVT Sebagai Transmisi Mekanik Turbin ke Generator

Perbandingan kecepatan putaran turbin sebelum dan sesudah dikopel dengan generator diukur sebanyak lima kali.

Sebelum dikopel, kecepatan turbin relatif konstan sekitar 500 rpm. Setelah dikopel, kecepatan turbin menurun hingga 300 rpm, dengan nilai terendah 307,8 rpm dan tertinggi 323,1 rpm. Penurunan ini terjadi akibat torsi yang diperlukan oleh generator, bobot CVT sebesar 4,20 kg, serta kerugian gesekan antara *pulley* dan v-belt. Setelah dikopel, kecepatan putaran generator rata-rata meningkat menjadi 1509,8 rpm, lebih tinggi dibandingkan turbin karena perbedaan rasio *pulley*. Grafik perbandingan ini dapat diperhatikan pada gambar 9 dibawah.

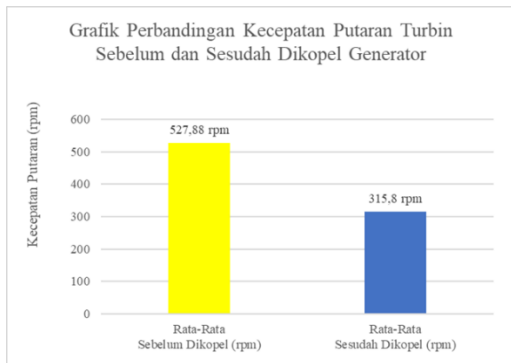


Gambar 9. Grafik Komparasi Kecepatan Putaran Turbin Sebelum dan Setelah Terhubung dengan Generator

Tabel 3 hingga tabel 5 dan gambar 9 menunjukkan pengukuran kecepatan putaran turbin dan generator dilakukan beberapa kali. Kecepatan putaran turbin tertinggi pada saat belum dikopel yakni 530,6 rpm dan sesudah dikopel yakni 323,1 rpm. Rata-rata kecepatan putaran turbin sebelum dikopel sebesar 527,88 rpm dan sesudah dikopel sebesar 315,8 rpm. Terjadi penurunan kecepatan putaran sebesar 212,08 rpm atau 40%. Penurunan kecepatan putaran terjadi karena CVT memiliki berat keseluruhan sebesar 4,2 kg, adanya rugi-rugi gesekan antaran v-belt dengan *pulley* dan beban dari generator tersebut yang dapat mempengaruhi kecepatan putaran. Perbandingan kecepatan rata-rata rotasi turbin sebelum dan setelah terhubung ke generator dapat dilihat pada tabel 6 dan gambar 10.

Tabel 6. Perbandingan Rata-Rata Kecepatan Putaran Turbin Sebelum dan Sesudah Dikopel Generator

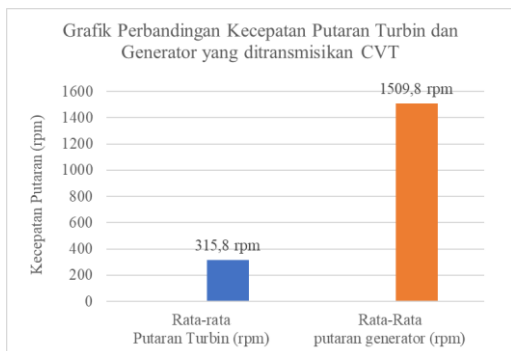
Rata-Rata Sebelum Dikopel (rpm)	Rata-Rata Sesudah Dikopel (rpm)	Persentase Penurunan Kecepatan Putaran
527,88	315,8	-40%



Gambar 10. Grafik Perbandingan Kecepatan Rata-Rata Rotasi Turbin Sebelum dan Setelah Terhubung ke Generator

Tabel 7. Perbandingan Kecepatan Putaran Turbin dan Generator yang ditransmisikan CVT

Rata-Rata Sebelum Dikopel (rpm)	Rata-Rata Sesudah Dikopel (rpm)	Persentase Penurunan Kecepatan Putaran
315,8	1509,8	378%



Gambar 11. Grafik Perbandingan Rata-Rata Kecepatan Putaran Turbin dan Generator yang Ditransmisikan CVT

Tabel 7 dan gambar 11 memperlihatkan perbandingan kecepatan putaran rata-rata antara turbin dan generator yang terhubung melalui CVT.

Rata-rata kecepatan turbin adalah 315,8 rpm, sedangkan generator 1509,8 rpm, dengan peningkatan sebesar 1194 rpm atau 378%. Peningkatan ini disebabkan oleh perbedaan rasio antara *pulley* turbin dan generator, di mana *v*-belt pada *pulley* turbin berdiameter 14,5 cm² dan pada *pulley* generator 2,7 cm².

CVT mulai bekerja pada kecepatan 700 rpm. Saat turbin mencapai 700 rpm, *pulley* turbin melebar dan *v*-belt masuk, membuat *pulley* generator menyempit dan *v*-belt terhimpit keluar. Ini menyebabkan diameter *pulley* turbin mengecil dan diameter *pulley* generator membesar karena bandul yang terlempar keluar. Namun, kinerja CVT kurang optimal akibat faktor seperti tetapnya aliran air ke turbin, kemungkinan *slip* *v*-belt karena air, dan ketidakcapaiannya kecepatan yang dibutuhkan (2000 rpm hingga 4500 rpm). Akibatnya, penggunaan CVT dalam penelitian ini tidak jauh berbeda dari *pulley* penggerak konvensional [4].

Mengacu dari perancangan *pulley* yang dilakukan sebelumnya, perbandingan antara diameter *pulley* turbin dan diameter *pulley* generator menggunakan rumus (4) dibawah ini [11]:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} \Rightarrow \frac{571}{3000} \Rightarrow \frac{5,71}{30} = \frac{d_2}{d_1}$$

Perbandingan diameter *pulley* turbin dan generator adalah 5,71:30. Dengan *pulley* turbin berdiameter 14,5 cm², kita dapat menghitung diameter *pulley* generator.

$$\begin{aligned} \frac{5,71}{30} &= \frac{d_2}{d_1} \\ 5,71 \times 14,5 &= 30 \times d_2 \\ d_2 &= \frac{82,79}{30} \\ d_2 &= 2,75 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Perbedaan rasio antara *pulley* turbin dengan *pulley* generator setelah dilakukan perhitungan sebagai berikut:

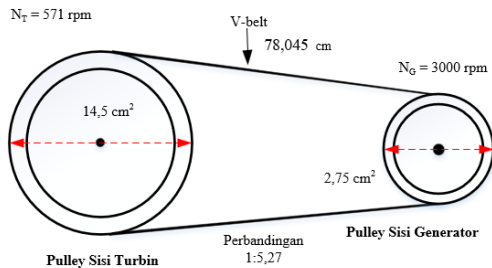
$$\begin{aligned} \frac{\text{Diameter pulley turbin}}{\text{diameter pulley generator}} &= \frac{14,5}{2,75} = 5,27 \\ &\Rightarrow 1:5,27 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan menunjukkan perbandingan 1:5,27. Kecepatan putaran turbin pada perancangan alat PLTMH

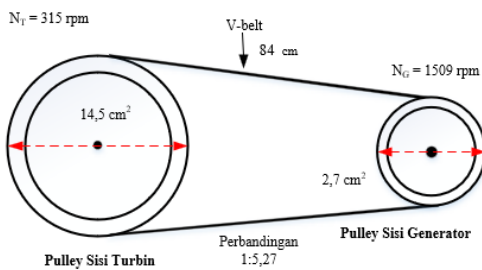
adalah 571 rpm. Dengan perbedaan rasio yang diperoleh, hasilnya adalah sebagai berikut:

Perbandingan rasio = 1:5,27
 $1 \times 571 = 571 \text{ rpm}$
 $5,27 \times 571 = 3009,17 \text{ rpm}$

Berdasarkan perhitungan, CVT seharusnya mentransmisikan putaran 3000 rpm pada pulley generator dan 571 rpm pada pulley turbin. Namun, pada realisasinya, pulley generator hanya mencapai 1509 rpm karena putaran turbin menurun dari 527 rpm menjadi 315 rpm setelah dikopel dengan generator. Beban generator saat beroperasi menyebabkan penurunan kecepatan rotasi turbin. Berikut adalah perbandingan kecepatan putaran turbin antara perancangan dan realisasi.



Gambar 12. Skema Pulley dan V-belt PLTMH Anak Sungai Tukad Sungai Berdasarkan Perhitungan



Gambar 13. Skema Pulley dan V-belt PLTMH Anak Sungai Tukad Sungai Berdasarkan Realisasi

Tabel 8. Perbandingan Kecepatan Putaran Turbin antara Perancangan dengan Realisasi

Kecepatan Putaran Turbin Pada Perancangan (rpm)	Kecepatan Putaran Turbin Pada Realisasi (rpm)	Persentase Penurunan Kecepatan Putaran
571	315	-45%

Tabel 9. Perbandingan Kecepatan Putaran Generator antara Perancangan dengan Realisasi

Kecepatan Putaran Generator Pada Perancangan (rpm)	Kecepatan Putaran Generator Pada Realisasi (rpm)	Persentase Penurunan Kecepatan Putaran
3009	1509	-50%

Gambar 12 dan 13 serta tabel 8 dan 9 menunjukkan kecepatan putaran turbin perancangan sebesar 517 rpm, sedangkan realisasi hanya 315 rpm, mengalami penurunan 202 rpm atau sekitar 40%. Putaran generator pada perancangan mencapai 3009 rpm, tetapi di realisasi hanya 1509 rpm, dengan penurunan 1500 rpm atau sekitar 50%. Efisiensi turbin menurun 45% hingga 50% karena torsi turbin yang kurang untuk memutar generator. Selain itu, CVT kesulitan mempertahankan putaran pada 3000 rpm dan hanya mampu mentransmisikan 1509 rpm, penurunan 50% dari perhitungan teoritis. Penurunan efisiensi CVT disebabkan oleh slip antara v-belt dan pulley akibat air yang mengenai komponen saat prototype beroperasi.

4.5 Kelemahan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa kelemahan terkait dengan CVT sebagai transmisi mekanik dalam sistem. Salah satu kelemahan utama adalah ketidakmampuan CVT untuk menstabilkan putaran turbin dan generator secara efektif. Hal ini dapat mengakibatkan ketidakstabilan kinerja sistem secara keseluruhan.

5. KESIMPULAN

Menurut hasil pembahasan yang telah dilakukan sebelumnya, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Diameter pulley turbin 14,5 cm² dan diameter pulley generator 3,499 cm² dengan panjang v-belt 79,434 cm pada perancangan PLTMH. Untuk prototype PLTMH, diameter pulley turbin 14,5 cm² dan diameter pulley generator 2,75 cm² dengan panjang v-belt 78,24 cm.
2. Penggunaan CVT sebagai transmisi antara turbin dan generator

menyebabkan penurunan kecepatan turbin dari 527,88 rpm menjadi 315,8 rpm (40%) dan penurunan efisiensi sistem.

3. Meskipun kecepatan generator meningkat dari 315,8 rpm menjadi 1509,8 rpm (378%), penurunan kecepatan turbin realisasi dari 517 rpm menjadi 315 rpm (45%) dan dari 3009 rpm menjadi 1509 rpm (50%) menunjukkan torsi turbin yang tidak memadai. ketidakmampuan CVT dalam menstabilkan putaran, diperparah oleh *slip* antara v-belt dan *pulley* akibat percikan air saat operasi, turut berkontribusi pada penurunan efisiensi.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Alfiandi, H. (2017). Tugas Akhir Analisa Sistem *Continously Variabel Transmision* (CVT) Motor Honda Beat PGM-FI 2014. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- [2] Badan Pusat Statistik Bali. (2023). Statistik Energi Bali
- [3] Balai Wilayah Sungai Bali-Penida (2023) Data Tukad Sungai Tahun 2001-2022.
- [4] Hasyim, M. F. (2015). Studi Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Demgan Pemanfaatan Potensi Air di Wonosalam. Universitas Jember.
- [5] James, D.H. (1999). *Automotive Technology: Principles, Diagnosis, and Service*.
- [6] Kementrian ESDM. (2011). Energi Hidro Mikrohidro
- [7] Kementerian ESDM. (2023). Kebijakan Energi Nasional (KEN).
- [8] Kementerian ESDM. (2023). Rencana Umum Energi Nasional (RUEN).
- [9] Layman's Guidebooks. On How To Develop a Small Hydro Site. *Journal Of Energy Saving*. Vol. 1, No. 4, pp 67 150. 1998.
- [10] Pemerintah Provinsi Bali. (2023). Rencana Umum Energi Daerah (RUED) Bali.
- [11] Prayuda, D.A. 2014. "Perencanaan Transmisi Sabuk V dan *Pulley* Pada Pembangkit Listrik Mikrohidro" (skripsi). Tenaga Jember: Universitas Jember.
- [12] Sularso, & Suga, K. (2004). *Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin*. PT. Pradnya Paramita.