PERANCANGAN PEMBANGKIT LISTRIK HIBRIDA TENAGA SURYA DAN PIKOHIDRO MENGGUNAKAN TURBIN *ARCHIMEDES SCREW*

Rangga Adi Saputra[1], Abdul Syakur[1], Ajub Ajulian Zahra Macrina[1]

[1]Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

E-mail: rangga@students.undip.ac.id

Unit usaha perikanan skala kecil di Desa Kalongan saat ini menghadapi permasalahan kurangnya suplai kelistrikan, terutama untuk kebutuhan penerangan untuk operasional harian. Lokasi ini memiliki potensi energi terbarukan (EBT) berupa energi matahari dan air yang belum termanfaatkan. Tugas akhir ini merancang sistem pembangkit listrik hibrida tenaga surya dan pikohidro menggunakan turbin Archimedes Screw untuk kondisi head rendah sebagai solusinya. Turbin dirancang berdasarkan studi literatur dan dimodelkan dengan SolidWorks, menghasilkan 6 ulir, pitch 11 cm, radius luar 6 cm, radius dalam 3 cm, dan panjang 70 cm, dengan rasio transmisi pulley untuk generator AC 3 fasa. Pengujian PLTS pada sudut 10°, 15°, dan 20° menunjukkan sudut 20° menghasilkan daya paling optimal dan konsisten berdasarkan iradiasi rata-rata tertinggi (840,89 W/m² dan 829,38 W/m²) pada kedua hari pengujian. Efisiensi SCC MPPT sebesar 94,12% dan 94,41% dengan MAPE 2,96% dan 2,68% menunjukkan kinerja sistem optimal. Hasil pengukuran karakteristik pengisian baterai menunjukkan profil Constant Current-Constant Voltage (CC-CV), mengindikasikan baterai dan MPPT bekerja optimal.

Kata kunci: Pembangkit Listrik Hibrida, Pikohidro, Turbin Archimedes Screw, PLTS

Abstract

Small-scale fishery businesses in Kalongan Village currently face challenges regarding insufficient electrical supply, particularly for daily lighting requirements. This location possesses untapped potential for renewable energy, specifically solar and water power. This project designs a hybrid solar and pico-hydro power generation system using an Archimedes Screw turbine for low-head conditions. The turbine was modeled with SolidWorks based on literature parameters, resulting in 6 helical turns, pitch 11 cm, outer radius 6 cm, inner radius 3 cm, and total length 70 cm. Testing at panel tilt angles of 10°, 15°, and 20° showed that 20° produced the most optimal output based on the highest average irradiance of 840.89 W/m² and 829.38 W/m² on both test days. SCC MPPT efficiency averaged 94.12% and 94.41% with MAPE of 2.96% and 2.68%. Battery charging characteristics confirmed a Constant Current-Constant Voltage (CC-CV) profile, indicating optimal battery and MPPT operation.

Keywords: Hybrid Power Generation, Picohydro, Archimedes Screw Turbine, Solar PV System,

1. Pendahuluan

Unit usaha perikanan skala kecil di Desa Kalongan, Ungaran, Jawa Tengah saat ini menghadapi permasalahan kurangnya suplai kelistrikan, terutama untuk kebutuhan penerangan dalam mendukung operasional hariannya. lokasi tersebut telah tersuplai listrik namun hanya untuk beberapa pemanfaatan beban yang secara keseluruhan masih kurang memadai. Di sisi lain, lokasi tersebut memiliki potensi energi baru terbarukan (EBT) yang dapat dimanfaatkan, yakni berupa aliran air sungai di sekitar lokasi tersebut dan energi sinar matahari yang memadai sepanjang tahun.

Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida (PLTH) yang menggabungkan sistem PLTS dan PLTPh merupakan solusi yang relevan untuk kondisi kawasan wisata dengan potensi dua sumber energi terbarukan tersebut. Sistem hibrida ini memungkinkan pemanfaatan energi matahari secara optimal pada siang hari, sementara energi air mengalir dapat dimanfaatkan secara kontinu untuk mendukung keandalan sistem [1][2]. Turbin Archimedes Screw dipilih sebagai komponen utama PLTPh karena lemampuannya beroperasi pada kondisi *head* rendah yang sesuai dengan karakteristik aliran air di lokasi kawasan wisata tersebut. Jenis turbin ini juga memiliki keunggulan berupa konstruksi yang sederhana, efisiensi yang baik pada berbagai kondisi debit, serta ramah lingkungan karena tidak menghalangi migrasi ikan dan organisme air [3].

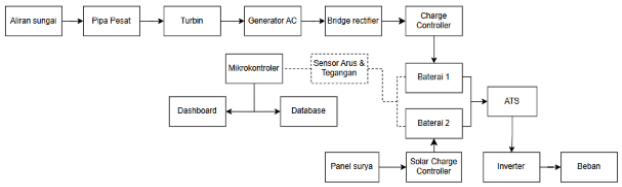
Pada sisi PLTS, optimasi sudut kemiringan panel surya menjadi faktor penting dalam memaksimalkan penyerapan iradiasi matahari. Pemasangan panel surya dengan sudut kemiringan yang tepat (*fixed tilt angle*) dapat meningkatkan daya keluaran secara signifikan tanpa memerlukan mekanisme pelacak matahari yang kompleks [4]. Solar Charge Controller (SCC) tipe MPPT (Maximum Power Point Tracking) juga memainkan peran krusial

dalam mengoptimalkan konversi daya dari panel surya ke baterai [5].Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji sistem pembangkit listrik hibrida PLTS-PLTPh menggunakan turbin Archimedes Screw untuk kondisi *head* rendah, dengan mengevaluasi kinerja masing-masing subsistem meliputi optimasi sudut kemiringan panel surya, efisiensi SCC MPPT, karakteristik pengisian baterai, serta kinerja inverter berdasarkan standar SPLN No. 72 Tahun 1978 tentang batasan *voltage drop* yang diizinkan yaitu 5% [6].

2. Metode

2.1. Perancangan Umum Pembangkit Listrik Hibrida Tenaga Surya dan Pikohidro

Tugas akhir ini merancang Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida (PLTH) dengan memanfaatkan dua sumber energi terbarukan, yaitu tenaga surya dan pikohidro. Energi dari panel surya dimanfaatkan pada saat kondisi cuaca cerah di siang hari, sementara energi dari sistem pikohidro digunakan untuk menjaga kontinuitas suplai listrik saat malam hari atau ketika intensitas cahaya matahari rendah. Tahapan perancangan sistem PLTH ini secara umum dapat dilihat pada Gambar 1

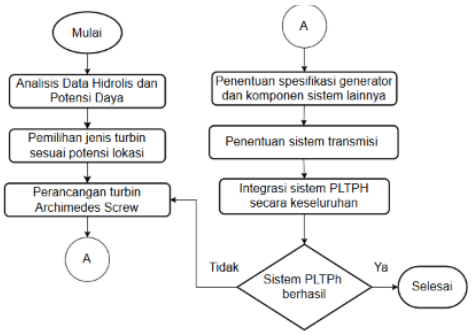


Gambar 1. Konfigurasi umum sistem PLTH

Gambar 1 merupakan tahapan perancangan sistem pembangkit listrik tenaga hibrida (PLTH) yang terdiri dari Sub-Sistem Pembangkitan, Sub-Sistem Kontrol dan Monitoring, serta Sub-Sistem *Automatic Transfer Switch* (ATS). Tahapan dimulai dari pengumpulan data kebutuhan beban, potensi sumber energi terbarukan, dan standar teknis, dilanjutkan perancangan dan pemilihan komponen pada masing-masing sub-sistem, serta simulasi dan pengujian untuk mengevaluasi kemampuan pembangkitan daya, monitoring tegangan dan arus, dan keandalan mekanisme perpindahan sumber pada ATS.

2.2. Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPh)

Metode perancangan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Pikohidro (PLTPh) disusun sebagai acuan kerja yang sistematis. Proses perancangan diawali dengan observasi dan analisis potensi lokasi, dilanjut dengan pemilihhan jenis turbin sesuai analisis potensi hingga sistem berhasil secara keseluruhan setelah melalui proses pengujian, sebagaimana dijelaskan pada Gambar 2



Gambar 2. Diagram alir perancangan PLTPh

2.2.1. Perhitungan Kebutuhan Energi Harian

Beban yang akan digunakan sebagai bentuk pemanfaatan sistem PLTS dan PLTPh adalah beban penerangan lampu LED strip 5 meter dengan lama pemakaian 12 jam/hari, total energi dihitung dengan persamaan 1

$$E_L = P_L \times t \times 1{,}25 \quad (1)$$

$$E_L = \left(4{,}5\frac{\text{W}}{\text{m}} \times 10\ \text{m}\right) \times 12\frac{\text{h}}{\text{hari}} \times 1{,}25 = 648\frac{\text{Wh}}{\text{hari}}$$

Keterangan:
E_L = Total energi harian (Wh /hari)
P_L = Daya beban (W)
t = lama pemakaian (h/hari)

2.2.2. Analisis Data Hidrolis dan Potensi Daya

Perancangan turbin *Archimedes screw* diawali dengan pengukuran *head* dan debit melalui metode pengukuran langsung pada beberapa titik penampang sungai untuk mengantisipasi ketidakteraturan kontur. Diperoleh *head* sebesar () Data pengukuran disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data pengukuran kedalaman dan lebar sungai

Titik Pengukuran	Kedalaman (m)	Lebar (m)
1	0,35	0,80
2	0,33	0,85
3	0,28	0,85
Rata-rata	0,32	0,83

Dari Tabel 1. maka diperoleh nilai luas permukaan sungai rata-rata dengan persamaan 2.[7].

$$\text{A}_{\text{avg}} = \text{K}_{\text{avg}} \times \text{L}_{\text{avg}} \quad (2)$$

$$\text{A}_{\text{avg}} = 0{,}32\ \text{m} \times 0{,}83\ \text{m}$$

$$\text{A}_{\text{avg}} = 0{,}27\ \text{m}^2$$

Keterangan:
A_{avg} = Luas permukaan air rata-rata (m^2)
K_{avg} = Kedalaman sungai rata-rata (m/s)
L_{avg} = lebar sungai rata-rata (m)
Panjang aliran sungai pengukuran adalah 1,33m. Nilai volume air dapat dihitung dengan persamaan 3 [7].

$$V = A_{avg} \times P \quad (3)$$
$$V = 0{,}27\ m^2 \times 1{,}33\ m$$
$$V = 0{,}36\ m^3$$

Keterangan:
V = volume fluida (m^3)
A_{avg} = Luas permukaan air rata-rata (m^2)
P = Panjang aliran sungai pengukuran (m)

Maka, debit air diperoleh dengan persamaan 4. sebagai berikut [8].

$$Q = \frac{V}{t_{avg}} \times 0{,}85 \quad (4)$$
$$Q = \frac{0{,}36\ m^3}{1{,}68} \times 0{,}85$$
$$Q = 0{,}18\ m^3/s$$

Keterangan:
Q = debit aliran air (m^3/s)
V = volume fluida (m^3)
t = waktu (s)

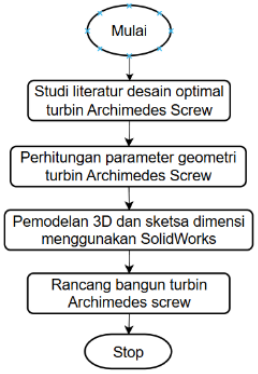
Daya hidrolis dihitung untuk menganalisis potensi hidrolis aliran sungai, nilainya dihitung dengan persamaan 5 [8].

$$P_H = p\ g\ Q\ h \quad (5)$$
$$P_H = 1000\frac{kg}{m^3} \times 9{,}81\frac{m}{s^2} \times 0{,}18\frac{m^3}{s} \times 0{,}3m$$
$$P_H = 52{,}97\ W$$

Keterangan:
P_H = Daya hidrolis (W)
p = Massa jenis air (1000 kg/m^3)
g = gaya gravitasi bumi (9,81 m/s^2)
Q = Debit air (m^3/s)
h = tinggi jatuh air (m)

2.2.3. Perancangan Turbin Archimedes Screw

Diagram alir seperti pada Gambar 3. dirancang sebagai acuan perancangan turbin Archimedes Screw. Turbin Archimedes screw merupakan turbin PLTPh dengan karakteristik *head rendah* dengan sudu turbin berbentuk helix mengitari *body* silindernya [9].



Gambar 3. Diagram alir perancangan turbin archimedes screw

Turbin archimedes screw dirancang berdasarkan parameter optimal dari penelitian terdahulu oleh Chris Rorres [10]. Berikut parameternya.

A. Justifikasi Jumlah Sudu Turbin

Jumlah sudu yang dipilih adalah 1 sudu dikarenakan kemudahannya dalam proses fabrikasi serta penelitian terdahulu oleh Agung Maolana dkk. [11] menemukan bahwa jumlah sudu 1 paling optimal

B. Penentuan Sudut Inklinasi Turbin

Sudut inklinasi yang diimplementasikan adalah 22°, kemudian diperoleh nilai konstanta inklinasi K sebagai acuan perancangan parameter geometri lainnya dengan persamaan 6.

$$K = \tan\theta \quad (6)$$
$$K = \tan 22^o$$
$$K = 0{,}404$$

Keterangan:
K = Konstanta inklinasi turbin
θ = sudut inklinasi turbin

C. Perancangan Radius Sudu Turbin

Nilai jari jari dalam (Ri) yang dirancang adalah 3cm, maka diameter dalam yang menjadi *body* turbinnya adalah 6 cm. Nilainya dihitung dengan persamaan 7.

$$R_o = \frac{Ri}{p} \quad (7)$$
$$R_o = \frac{3\ cm}{0{,}5}$$
$$R_o = 6cm$$

Keterangan:
p = rasio radius (nilainya 0,5)
Ri = radius dalam sudu turbin (cm)
Ro = radius luar sudu turbin (cm)

D. Perancangan *Pitch* Sudu Turbin

Nilai *pitch* (Λ) sudu dirancang dengan nilai *pitch ratio* (λ) yang optimal hasil riset oleh Chris Rorres [10] . Nilai *pitch ratio* (λ) optimal untuk jumlah sudu 1 adalah 0,1285. Maka, nilai *pitch*-nya dihitung dengan persamaan 8.

$$\Lambda = \frac{2\pi R_o \lambda}{K} \quad (8)$$

$$\Lambda = \frac{2\pi(6\text{cm})(0{,}1285)}{0{,}404}$$

$$\Lambda = 11 \text{ cm}$$

Keterangan:
Λ = *Pitch* sudu
Ro = radius luar sudu (cm)
λ = rasio *pitch*
K = konstanta inklinasi

E. Jumlah Ulir dan Panjang *Body* Turbin

Jumlah ulir yang dirancang adalah sebanyak 6 ulir hal ini dikarenakan jumlah ulir semakin banyak maka akan semakin banyak volume air yang terperangkap yang pada akhirnya akan memberikan torsi yang lebih besar. Namun, perlu dipertimbangkan juga beban turbin agar dapat diputar. Panjang total dapat dihitung dengan persamaan 9.

$$\mathrm{L} = \mathrm{N_{ulir}} \times \Lambda \quad (9)$$

$$\mathrm{L} = (6 \times 11 \text{ cm}) + 2\text{cm dop kiri} + 2 \text{ cm dop kanan}$$

$$\mathrm{L} = 70\ cm$$

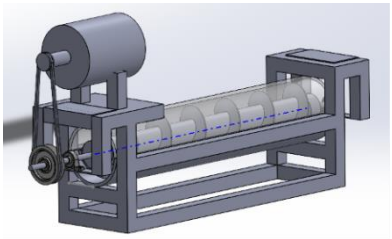
Keterangan:
L = Total panjang *body* turbin (cm)
N_{ulir} = Jumlah uliran sudu turbin
Λ = *Pitch* sudu

F. Perancangan Struktur Penyangga (*Frame*)

Perancangan desain struktur penyangga didasari oleh dimensi turbin sehingga dimensi frame akan menyesuaikan ukuran atau dimensi turbin. Tabel 2. Merupakan rangkuman hasil perancangan turbin Archimedes screw serta Gambar 4. merupakan desain turbin menggunakan aplikasi SolidWorks

Tabel 2. Rangkuman perancangan turbin Archimedes screw

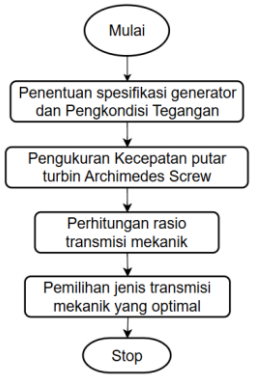
No	Data Perancangan	Keterangan
1.	Jumlah sudu turbin	1 Sudu
2.	Sudut inklinasi turbin	22º
3.	Radius dalam turbin	3 cm
4.	Radius luar turbin	6 cm
5.	Tinggi sudu ulir	3 cm
6.	Ketebalan sudu ulir	0,2 cm
7.	*Pitch* Sudu Turbin (Λ)	11 cm
8.	Total Jumlah Lilitan ulir	6 ulir
9.	Panjang Poros Turbin (L)	70 cm
10.	Material turbin	Pipa PVC
11.	Material *frame*	Hollow galvanis
12.	Dimensi frame (PxLxT)	(70 x 20 x 26,5) cm
13.	Diameter dalam dan luar pipa cover	12,5 cm dan 14 cm
14.	*clearance gap*	0,25 cm



Gambar 4. Desain turbin Archimedes screw dengan SolidWorks

2.2.4. Perancangan Sistem Konversi Energi dan Transmisi Mekanik

Gambar 5. merupakan diagram alir perancangan sistem konversi energi dan transmisi mekanik



Gambar 5. Diagram alir perancangan sistem konversi energi dan transmisi mekanik

A. Penentuan Spesifikasi Generator dan Pengkondisi Tegangan

Generator adalah mesin listrik yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik (AC/DC), berdasarkan hukum Faraday: penghantar yang berputar memotong garis gaya magnet sehingga menimbulkan GGL [12] . Generator yang digunakan adalah motor servo AC UTECH 2000II dengan spesifikasi pada Tabel 3.

Tabel 3. Spesifikasi generator UTECH 2000II

No	Data Spesifikasi	Keterangan
1.	Tegangan	200 – 240 V
2.	Kecepatan	3000 rpm
3.	Daya	550 W
4.	Torsi	0,18 kg.m

Generator tersebut bertipe tegangan AC 3 fasa, maka diperlukan *full wave bridge rectifier* 3 fasa. *Full wave bridge rectifier* 3 fasa merupakan rangkaian penyearah yang bertujuan mengonversi tegangan dan arus bolak balik (AC) menjadi arus searah (DC) [13]. Spesifikasi *full bridge rectifier* 3 fasa yang digunakan tertera pada Tabel 4.

Tabel 4. Spesifikasi modul 3 *phase full wave bridge rectifier*

No	Data Spesifikasi	Keterangan
1.	Tipe	MDS100A1200V
2.	Arus maksimal	100 A
3.	Tegangan Maksimal	1200 V
4.	Temperature kerja maksimal	150^{o}C
5.	Dimensi	80x40x21 mm

Hasil keluaran Tegangan DC dari modul *rectifier* akan melalui modul *charge controller* MPPT dengan fitur DC-DC converter sebagai regulator tegangan. Berikut spesifikasinya terlampir pada Tabel 5.

Tabel 5. Spesifikasi MPPT EPEVER Tracer 4210AN

NO	Data Spesifikasi	Keterangan
1.	Arus	40 A
2.	Tegangan Sistem	12V/24V DC
3.	*Max PV Voltage*	100 V
4.	Rating Daya	520W(12V) 1040W(24V)

B. Perancangan Sistem Transmisi Mekanik

Sistem transmisi mekanik pada PLTPh ini terdiri dari tiga komponen utama yang saling berkaitan, yaitu *pulley* dan v-belt sebagai penerus putaran, poros (*shaft*) sebagai penghubung antar komponen, serta *bearing* dan *pillow block* sebagai penopang dan pendukung kestabilan sistem transmisi secara keseluruhan.

1. *Pulley* dan v-belt

Pulley merupakan komponen transmisi daya mekanik dari komponen penggerak menuju komponen yang akan digerakkan [14].

2. Poros (*shaft*)

Poros merupakan suatu komponen berputar yang umumnya berpenampang lingkaran dimana terpasang komponen-komponen mekanik lainnya seperti *pulley*, V-belt, turbin, dan juga bearing beserta bantalannya (*pillow block*) [15].

3. *Bearing* dan *Pillow Block*

Bearing dan bantalan (*pillow block*) merupakan komponen yang menumpu poros (*shaft*) dengan pembebanan radial [16].

Sistem transmisi dirancang agar putaran turbin mampu menghasilkan daya yang aman bagi baterai dan MPPT. Pengujian *generator open circuit* dilakukan untuk mengetahui gradien volt/rpm dengan data pada Tabel 6.

Tabel 6. Data karakteristik generator *open circuit*

NO	RPM Generator	Tegangan DC (V)
1	2297	87,5
2	4962	191,4

Dari Tabel 6. di atas, diperoleh nilai gradien volt/rpm melalui persamaan 10.

$$m = \frac{V_{DC2} - V_{DC1}}{RPM_2 - RPM_1} \quad (10)$$

$$m = \frac{(191{,}4 - 87{,}5)\ \text{volt}}{(4962 - 2297)\ \text{rpm}}$$

$$m = 0{,}039\ \text{volt/rpm}$$

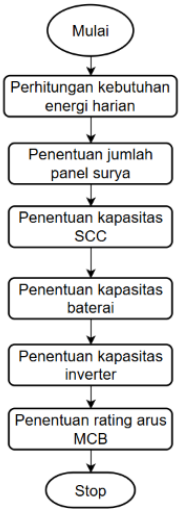
Keterangan:
m = gradien kecepatan per rpm (volt/rpm)
V_{DC2} = Tegangan DC Tinggi
V_{DC1} = Tegangan DC Rendah
RPM_2 = Kecepatan Putar RPM Tinggi
RPM_1 = Kecepatan Putar RPM Rendah

Rentang tegangan kerja yang aman ditentukan untuk mengetahui secara teoritis berapa RPM target Nilai rentang tegangannya adalah 15VDC – 100 VDC. Maka secara teoritis bila tegangan ini di kalikan dengan volt/rpm maka didapat rentang RPM kerja yaitu

$$385\ \text{RPM} \leq \text{RPM Generator} \leq 2564\ \text{RPM}$$

2.3. Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Perancangan PLTS dilakukan melalui beberapa tahapan atau langkah. Hal ini untuk memastikan bahwa sistem PLTS yang diaplikasikan memenuhi kebutuhan beban sistem. Gambar 6. merupakan diagram alir perancangan PLTS sebagai acuan merancang PLTS



Gambar 6. Diagram alir perancangan sistem PLTS

2.3.1. Penentuan Jumlah Panel Surya

Jumlah panel surya dirancang berdasarkan kebutuhan energi harian serta bergantung pada daya *peak* panel yang dihasilkan serta lama waktu PSH yaitu 5 jam. Nilainya dihitung dengan persamaan 11. Spesifikasi panel surya yang digunakan terlampir pada Tabel 7.

Tabel 7. Spesifikasi panel surya MY SOLAR

NO	Spesifikasi	Keterangan
1.	Cell Type	*Polycrystalline silicon*
2.	Daya Maksimum (Pmax)	150 Wp
3.	Tegangan Maksimum (Vmp)	18,6 V
4.	Arus Maksimum (Imp)	8,06 A
5.	Tegangan *Open Circuit* (Voc)	22,8 V
6.	Arus *Short Circuit* (Isc)	9,21 A
7.	Temperatur kerja	-45ºC - +80ºC
8.	Dimensi (PxLxT)	(1340 x 670 x 35) mm

$$N_{panel} = \frac{E_L}{P_{Panel} \times PSH} \quad (11)$$
$$N_{panel} = \frac{648\ \text{Wh/hari}}{150\ Wattpeak \times 5\ \text{Jam/hari}}$$
$$N_{panel} = 0{,}96\ \text{Panel} \approx 1\ \text{Panel}$$

Keterangan:
E_L = Total energi harian (Wh /hari)
P_{Panel} = Daya panel surya (Wattpeak)
PSH = Waktu daya puncak matahari

2.3.2. Penentuan Spesifikasi SCC

Kapasitas SCC ditentukan berdasarkan arus tertinggi panel surya, sehingga SCC mampu bekerja normal. Kapasitas arus SCC dihitung dengan persamaan 12. Spesifikasi SCC terlampir pada Tabel 8.

$$I_{SCC} = I_{SC} \times \text{N Panel paralel} \times 1{,}25 \quad (12)$$
$$I_{SCC} = 9{,}21\ \text{A} \times 1 \times 1{,}25 = 11{,}5125\ \text{A}$$

Keterangan:
Iscc = Arus SCC (A)
Isc = Arus hubung singkat panel (A)
Npanel paralel = jumlah paralel panel
1,25 = Faktor kompensasi

Tabel 8. Spesifikasi SCC MPPT EPEVER *Tracer* 2210AN

NO	Spesifikasi	Keterangan
1.	Arus	20 A
2.	Tegangan	12V/24V DC
3.	*Max PV Voltage*	100 V
4.	*Rating* Daya	260W(12V) / 520W(24V)

2.3.3. Penentuan Spesifikasi Baterai

Kapasitas baterai ditentukan berdasarkan total kebutuhan energi harian (Wh) serta seberapa besar *Depth of Discharge* (DoD) baterai. Nilainya dihitung dengan persamaan 13. Spesifikasi baterai tertera pada Tabel 9.

$$C_b = \frac{\text{Wh}}{V_{bat} \times \text{DoD}} \quad (13)$$
$$C_b = \frac{648\ \text{Ah}}{12\text{V} \times 0{,}6} = 90\ \text{Ah}$$

Tabel 9. Spesifikasi baterai VOZ VA12-100

NO	Spesifikasi Teknis	Keterangan
1.	Jenis Baterai	VRLA
2.	Kapasitas	100 Ah
3.	Tegangan nominal	12 V
4.	Tegangan c*ycle use*	14,4-15,0 V
5.	Tegangan *standby use*	13,5-13,8 V

2.3.4. Penentuan Spesifikasi Inverter

Kapasitas inverter ditentukan berdasarkan daya maksimum (Pmaks) beban dan ditambahkan 25% margin untuk faktor keamanan. Kapasitasnya dihitung dengan persamaan 14. Spesifikasi inverter tertera pada Tabel 10.

$$P_{inverter} = P_{maks} \times 1{,}25 \quad (14)$$
$$P_{inverter} = 45\ Watt \times 1{,}25 = 56{,}25\ Watt$$

Tabel 10. Spesifikasi inverter suoer SAA-500N

NO	Spesifikasi Teknis	Keterangan
1.	Daya Terukur	500 Watt
2.	Tegangan Masukan	12 VDC
3.	Tegangan Keluaran	230 VAC
4.	Daya Maksimum	1000 Watt

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengujian Sistem PLTPh

Pengujian sistem PLTPh dilakukan untuk memastikan seluruh komponen bekerja optimal dan menghasilkan daya yang aman bagi baterai serta perangkat MPPT. Metode pengujian meliputi beberapa pengujian berikut:

3.1.1. Pengujian Kecepatan Putaran Turbin tanpa Generator

Pengujian putaran turbin tanpa generator dilakukan untuk mengetahui rpm turbin, sebagai pembanding data open circuit guna menentukan rasio pulley optimal. Hasil disajikan pada Tabel 11.

Tabel 11. Hasil pengujian RPM turbin tanpa generator

Waktu (WIB)	Kecepatan Putaran (RPM)		Diameter Pulley (cm)	
	Turbin	Target	Generator	Turbin
10:40	331,8			6,03
10:45	339,8			5,89
10:50	337			5,93
10:55	321,9			6,21
11:00	341,2			5,86
11:05	332,3			6,02
11:10	335,7	400	5	5,96
11:15	329,3			6,07
11:20	331,5			6,03
11:25	330,6			6,05
11:30	327,8			6,10
11:35	333,5			6,00
11:40	330,9			6,04
Rata[2]	**332,56**	400	5	**6,01**

Hasil pengukuran RPM turbin dapat dihitung nilai rata-ratanya dengan persamaan 15

$$\mathrm{RPM}_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \mathrm{RPM_i}}{n} \qquad (15)$$

Keterangan:
RPMavg = RPM rata-rata turbin
RPMi = Hasil pengukuran RPM turbin ke i
n = jumlah data pengukuran

Nilai rata rata rpm turbin digunakan untuk menghitung ukuran diameter *pullley* turbin melalui persamaan 16. dengan diameter pulley generator bawaan 5 cm:

$$DP_{turbin_rancang} = \left(\frac{n_{gen}}{n_{turbin}} DP_{gen}\right) \times 1{,}25 \qquad (16)$$

$$DP_{turbin_rancang} = \left(\frac{400\ \mathrm{RPM}}{332{,}56\ RPM} 5\ cm\right) \times 1{,}25$$

$$DP_{turbin_rancang} = 7{,}51\ \mathrm{cm} \approx 7{,}5\ \mathrm{cm}$$

Diameter *pulley* turbin minimal secara teoritis adalah 7,5 cm untuk tegangan pengisian 15 VDC. Namun, *pulley* 10 cm digunakan agar putaran generator sesuai RPM kerja yang diinginkan dan tidak berlebihan..

3.1.2. Pengujian Turbin dan Generator

Pengujian putaran turbin-generator dilakukan untuk mengetahui pengaruh penyambungan generator terhadap kecepatan putar turbin Archimedes screw serta tegangan dan arus DC output bridge rectifier, dengan hasil disajikan pada Tabel 12.

Tabel 12. Hasil pengujian putaran turbin dan generator

Rasio transmisi	Kecepatan Putaran (RPM)		Tegangan DC (V)		Arus DC (A)	
	Turbin	Generator	*Rectifier*	Baterai	*Rectifier*	Baterai
1:1	220	220	8,14	12,5	0	0
1:1	227,3	227,3	8,00	12,5	0	0
1:1	234,5	234,5	8,17	12,5	0	0
1:1	236	236	8,16	12,5	0	0
1:1	229,1	229,1	8,05	12,5	0	0
1:1	235,5	235,5	8,15	12,5	0	0
1:1	237,1	237,1	8,26	12,5	0	0
1:1	237,3	237,3	8,22	12,5	0	0
1:1	232,3	232,3	8,18	12,5	0	0
1:1	236,7	236,7	8,26	12,5	0	0
Rata-rata	232,58	232,58	8,16	12,5	0	0

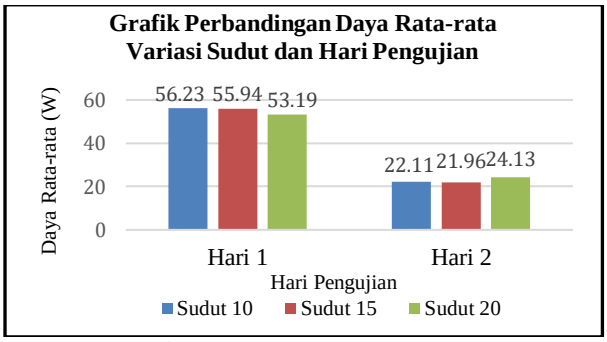
Hasil pengujian menunjukkan turbin dan generator PLTPh mampu menghasilkan putaran dan tegangan secara konsisten, dengan rata-rata kecepatan putar 232,58 RPM dan tegangan DC *rectifier* 8,16 V, namun arus pengisian pada sisi *rectifier* maupun baterai tercatat 0 A pada seluruh pengujian.

Belum tercapainya pengisian baterai ini terjadi karena tegangan keluaran sistem belum melampaui tegangan baterai (12,5 V), sehingga arus tidak dapat mengalir meskipun *boost converter* telah terpasang. Rendahnya tegangan tersebut disebabkan oleh penurunan debit air di lokasi pengujian dibandingkan kondisi survei awal, yang mengurangi torsi dan daya mekanik turbin meskipun RPM tetap mendekati nilai desain. Dengan demikian, kendala pengisian baterai ini bukan disebabkan oleh malafungsi komponen elektronik, melainkan oleh keterbatasan debit air sebagai sumber energi primer sistem PLTPh.

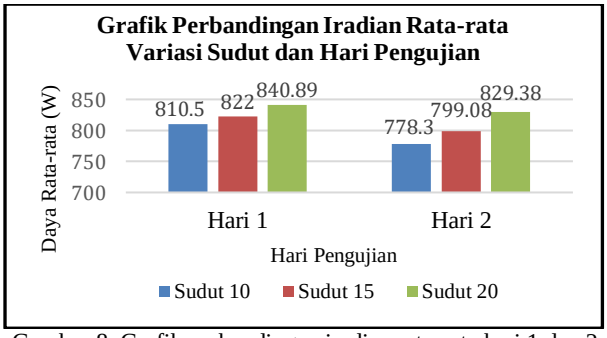
3.2. Pengujian Sistem PLTS

3.2.1 Pengujian Sudut Kemiringan Panel

Pengujian karakteristik panel surya terhadap sudut kemiringan dilakukan untuk mengetahui pengaruh sudut terhadap 10º,15º. dan 20º terhadap *output* panel. Diperoleh bahwa sudut 20º menghasilkan potensi keluaran daya terbaik dengan peroleh data seperti pada Tabel. 13. Hasil perbandingan daya rata-rata dan iradian rata-rata dari pengujian tersebut dapat dianalisis melalui Gambar 7 dan Gambar 8



Gambar 7. Grafik perbandingan daya rata-rata variasi sudut



Gambar 8. Grafik perbandingan iradian rata-rata hari 1 dan 2

Berdasarkan Gambar 7. dan Gambar 8 Sudut kemiringan 20° ditetapkan sebagai sudut optimal karena konsistensi pola iradiasi matahari dan kemampuan panel dalam menangkap cahaya dengan perbedaan rata-rata daya antar sudut yang kecil.

Tabel 13. Data pengujian sudut kemiringan 20° hari ke-1

Waktu (WIB)	Kondisi	Iradian (W/m^2)	Suhu (°C)
10:00	Cerah	843,6	50
10:30	Cerah	897,3	52,8
11:00	Cerah	901,1	54,3
11:30	Cerah	937,3	56,4
12:00	Cerah	956,3	56,8
12:30	Cerah	941,8	56,0
13:00	Cerah	887,5	59,5
13:30	Cerah	876,0	55,3
14:00	Cerah	801,0	52,6
14:30	Cerah	652,5	51,8
15:00	Cerah	555,4	46,7
Rata-rata		**840,89**	**53,84**

Tabel 13. Lanjutan

Waktu (WIB)	Panel Surya		Baterai	
	Vmp (V)	Imp (A)	Vbat (V)	Icharging (A)
10:00	15,27	2,25	14,18	2,74
10:30	14,42	3,17	13,39	1,53
11:00	15,06	4,59	13,90	4,85
11:30	14,21	4,67	13,21	4,86
12:00	15,14	4,33	13,97	4,58
12:30	15,24	3,95	13,46	4,52
13:00	15,28	4,13	14,15	4,28
13:30	15,52	3,83	14,36	3,98
14:00	16,79	2,21	14,32	2,47
14:30	14,99	3,09	13,89	3,25
15:00	14,44	2,62	13,51	2,79
Rata^2	**15,12**	**3,53**	**13,85**	**3,62**

3.2.2. Pengujian & Analisis Performa Panel

Pengujian dilakukan dengan membandingkan daya maksimum hasil pengukuran terhadap spesifikasi STC 150 Wp untuk menganalisis *power losses* panel surya pada Tabel 14.

Tabel 14. Nilai *losses* daya maksimum sudut kemiringan 20°

Waktu (WIB)	Kondisi	Daya Maksimum (W)			*Losses* Daya (W)	
		Spek	Hari 1	Hari 2	Hari 1	Hari 2
10:00	Cerah		34,36		115,64	
10:30	Cerah		45,71		104,29	
11:00	Cerah		69,13	23,46	80,87	126,54
11:30	Cerah		66,36	23,53	83,64	126,47
12:00	Cerah		65,56	25,30	84,44	124,70
12:30	Cerah	150	60,20	20,60	89,80	129,40
13:00	Cerah		63,11	20,13	86,89	129,87
13:30	Cerah		59,44	20,10	90,56	129,90
14:00	Cerah		37,11	20,53	112,89	129,47
14:30	Cerah		46,32	19,80	103,68	130,20
15:00	Cerah		37,83	18,68	112,17	131,32
Rata-rata			**53,19**	**21,35**	**96,81**	**128,65**

Daya aktual panel surya hanya berkisar 18,68–69,13 W, jauh di bawah spesifikasi 150 Wp. Dengan rata-rata *losses* mencapai 96,81–128,65 W akibat fluktuasi radiasi dan suhu, efisiensi panel dapat dihitung dengan Persamaan 17.

$$\eta_{\text{panel}} = \left(\frac{53{,}19\ \text{W}}{840{,}89\ \text{W/m}^2 \times 0{,}8978\ m^2}\right) \times 100\% \quad (17)$$

$$\eta_{\text{panel}} = 7{,}05\ \%$$

3.2.3. Pengujian & Analisis Efisiensi MPPT

Analisis performa SCC MPPT dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas konversi daya dari panel surya ke baterai, Data hasil pengujian disajikan pada Tabel 15.

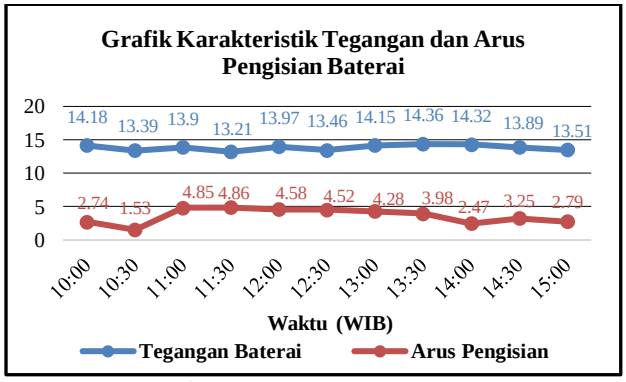
Tabel 15. Hasil pengujian efisiensi SCC MPPT

Waktu (WIB)	P*charge* (W)		Efisiensi MPPT (%)			Nilai Error MPPT (%)	
	Hari 1	Hari 2	Spek	Hari 1	Hari 2	Hari 1	Hari 2
10:00	38,85			113,09		16,6	
10:30	20,49	21,70		44,82		53,8	
11:00	67,42	20,97		97,53	89,37	0,54	7,87
11:30	64,20	22,07		96,74	93,80	0,26	3,30
12:00	63,98	24,01		97,60	94,92	0,62	2,14
12:30	60,84	20,18	97	101,07	97,97	4,19	1,00
13:00	60,56	18,93		95,97	94,03	1,06	3,06
13:30	57,15	19,18		96,15	95,43	0,88	1,62
14:00	35,37	20,19		95,32	98,33	1,73	1,38
14:30	45,14	19,06		97,46	96,23	0,47	0,79
15:00	37,69	16,73		99,63	89,56	2,71	7,67
Rata^2	**50,15**	**20,30**	**97**	**94,12**	**94,41**	**2,96**	**2,68**

Berdasarkan Tabel 15, efisiensi MPPT rata-rata sebesar 9,41% dan 4,41%, dengan nilai MAPE masing-masing 2,96% dan 2,68%. Perbedaan kinerja dipengaruhi oleh variasi suhu dan radiasi matahari dan terdapat transien.

3.2.4. Pengujian Pengisian Daya Baterai

Pengujian karakteristik *charging* baterai dilakukan untuk mengetahui perubahan tegangan baterai (Vbat) dan arus pengisian (Icharging) yang menjadi indikator fungsi baterai. Data pengujian disajikan dalam Gambar 9.



Gambar 9. Grafik karakteristik tegangan dan arus baterai

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengintegrasikan sistem PLTH dengan turbin *Archimedes Screw* dan PLTS pada sudut kemiringan optimal 20°, dengan rasio transmisi *pulley* 1:1 yang bekerja baik secara mekanis, serta sistem SCC MPPT yang efektif mendukung pengisian baterai 12V melalui profil *Constant Current-Constant Voltage* pada efisiensi 94%. Namun, pada sisi PLTPh, tegangan DC yang dihasilkan (rata-rata 8,16 V) belum mampu melampaui tegangan baterai (12,5 V) akibat penurunan debit air di lokasi pengujian, sehingga PLTPh belum dapat berkontribusi dalam pengisian baterai pada kondisi tersebut. Kondisi ini menegaskan peran PLTS sebagai sumber energi utama dalam sistem hibrida, sementara kontribusi PLTPh bergantung pada ketersediaan debit air yang optimal.

Referensi

[1] A. S. Alhusain, "Tantangan, kendala dan upaya pembangunan infrastruktur listrik di provinsi riau dan provinsi sulawesi selatan," *Kajian*, vol. 24, no. 4, hal. 261–279, 2019, [Daring]. Tersedia pada: http://makassar.

[2] B. A. Bhayo, H. H. Al-Kayiem, S. I. U. Gilani, dan F. B. Ismail, "Power management optimization of hybrid solar photovoltaic-battery integrated with pumped-hydro-storage system for standalone electricity generation," *Energy Convers. Manag.*, vol. 215, hal. 112942, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112942.

[3] I. G. W. Putra, A. I. Weking, dan L. Jasa, "Analisa pengaruh tekanan air terhadap kinerja pltmh dengan menggunakan turbin archimedes screw," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 17, no. 3, hal. 385, 2018, doi: 10.24843/mite.2018.v17i03.p13.

[4] R. Xu, K. Ni, Y. Hu, J. Si, H. Wen, dan D. Yu, "Analysis of the optimum tilt angle for a soiled PV panel," *Energy Convers. Manag.*, vol. 148, hal. 100–109, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.05.058.

[5] P. Widyantoro, R. Sirait, dan A. Musafa, "MPPT System Using Incremental Conductance for Solar Cell in Normal and Partial Shading Conditions," in *EECSI*, 2019, hal. 18–20.

[6] Afriditus, M. I. Arsyad, dan Z. Abidin, "Perhitungan rugi-rugi daya dan energi listrik pada jaringan tegangan menengah 20 kV PT PLN (persero) ULP Nanga Pinoh," *J. Electr. Eng. Energy, Inf. Technol.*, 2022.

[7] I. Hauteas, J. J. Messakh, dan P. G. Tamelan, "Kajian debit aliran kali liliba kota kupang, di daerah semi-arid menggunakan alat apung dan alat flow meter," *J. Batakarang*, vol. 2, no. 2, hal. 1–59, 2021.

[8] I. G. N. Saputra, L. Jasa, dan I. W. A. Wijaya, "Pengaruh jumlah sudu pada prototype pltmh dengan menggunakan turbin pelton terhadap efisiensi yang dihasilkan," *SPEKTRUM*, vol. 7, no. 4, hal. 161–172, 2020.

[9] A. Lashofer, W. Hawle, I. Kampel, F. Kaltenberger, dan B. Pelikan, "State of technology and design guidelines for the archimedes screw turbine," 2012.

[10] C. Rorres, "The turn of the screw: optimal design of an archimedes screw," 2000.

[11] A. Maolana, F. L. Sanjaya, dan A. Suprihadi, "Uji pengaruh variasi sudu turbin pada sudut kemiringan poros 15 derajat terhadap daya dan efisiensi turbin archimedes," *J. Mech. Eng.*, vol. 13, no. 1, 2024.

[12] M. Irfan, E. Erwin, dan S. Wiyono, "Perancangan permanent magnet synchronous generator sultan wind turbine V-5," vol. 3, hal. 131–142, 2021.

[13] D. W. Hart, *Power Electronics*. McGraw-Hill, 2011.

[14] H. Mahmudi, "Analisa perhitungan pulley dan v-belt pada sistem transmisi mesin pencacah," *J. Mesin Nusant.*, vol. 4, no. 1, hal. 40–46, 2021.

[15] F. Ibriza dan E. Wiseno, "Perancangan poros pada mesin pengurai limbah kelapa muda," *J. Inov. Penelit.*, vol. 2, no. 12, hal. 4179–4186, 2022.

[16] M. Handani dan N. S. B. Muhadi, "Pengujian dan pengukuran getaran simulator bearing dengan konstruksi tumpuan fleksibel pada arah sumbu z," 2022.