

RANCANG BANGUN DAN UJI KINERJA PLTMH DENGAN TURBIN ARCHIMEDES SCREW VERTIKAL PADA SUMBER ALIRAN AIR KANAL

Iqbal Reza Pradana[✉], Rizki Nurilyas Ahmad¹, Hasyim Asyari¹, Tindyo Prasetyo¹

¹ Universitas Muhammadiyah Surakarta, Jl. A. Yani Tromol Pos 1, Pabelan, Kartasura, Sukoharjo, Indonesia

[✉] Email korespondensi: d400210068@student.ums.ac.id

Abstrak. Peningkatan kebutuhan daya listrik di masyarakat mendorong pengembangan energi terbarukan, salah satunya melalui pemanfaatan aliran air untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji sistem PLTMH menggunakan turbin *Archimedes Screw* yang dipasang secara vertikal pada saluran air kanal. Turbin ini dirancang untuk memanfaatkan energi potensial air dengan *head* rendah, yang kemudian dikonversi menjadi energi mekanik dan selanjutnya menjadi energi listrik melalui generator DC. Pengujian dilakukan untuk mengetahui torsi dan RPM turbin menggunakan alat ukur *Dynamic Torque Meter* (DYN200), serta mengevaluasi tegangan, arus, dan daya pada generator, baterai, dan beban menggunakan sensor INA219. Seluruh data pemantauan ditampilkan melalui LCD dan *Web Server* berbasis ESP32 dalam mode Access Point. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan daya listrik secara stabil, dengan rata-rata tegangan dari generator sebesar 12,09 V, daya pengisian baterai sebesar 10,31 W, dan daya pada beban sebesar 7,95 W. Sistem monitoring bekerja dengan baik, memungkinkan pemantauan *real-time* tanpa koneksi internet. Kesimpulannya, PLTMH dengan turbin *Archimedes Screw* vertikal layak diterapkan untuk daerah terpencil yang belum banyak distribusi listrik dari PLN. Disarankan agar panjang turbin dibuat lebih dari 50 cm, karena semakin panjang turbin, maka torsi dan RPM yang dihasilkan akan semakin besar, sehingga daya listrik yang dihasilkan pun lebih optimal.

.Kata kunci: PLTMH, *Archimedes Screw* Vertikal, Energi Terbarukan, Sensor INA219, *Dynamic Torque Meter* (DYN200).



PENDAHULUAN

Peningkatan konsumsi serta krisisnya kebutuhan energi listrik di masyarakat, berdampak pada berkurangnya energi konvensional berupa bahan bakar fosil seperti batu bara, gas alam dan minyak bumi. Berkurangnya energi konvensional dapat memberikan efek negatif bagi ekosistem dan lingkungan dalam waktu jangka panjang (Setyono & Kiono, 2021). Pengembangan energi terbarukan menjadi salah satu solusi untuk mengurangi penggunaan energi konvensional dengan memanfaatkan tenaga air sebagai sumber energi terbarukan yang potensial. Kurangnya pemanfaatan energi air secara optimal menjadi peluang besar untuk dikembangkan menjadi sumber energi listrik yang berkelanjutan (Tria Melati et al., 2022). Pemanfaatan energi ini sangat relevan untuk memenuhi kebutuhan listrik di daerah terpencil dan pedesaan, di mana akses terhadap jaringan listrik masih terbatas. Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) dapat mendukung ketahanan energi nasional dan meningkatkan kesejahteraan masyarakat di wilayah yang belum terjangkau listrik (Wijaya *et al.*, 2021).

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) adalah suatu pembangkit listrik skala kecil yang menggunakan tenaga air sebagai penggerakannya, misalnya dari saluran irigasi, sungai atau air terjun alam, dengan cara memanfaatkan tinggi terjunnya dan jumlah debit airnya (Wibawa & Lutfy, 2020). Salah satu komponen penting pada PLTMH adalah generator yang digunakan untuk merubah energi mekanik menjadi energi listrik. Dalam penelitian ini generator yang digunakan adalah generator jenis *direct current* (DC) yang mempunyai prinsip induksi elektromagnetik, dimana ketika kumparan dalam medan magnet berputar akan timbul gerak gaya listrik (GGL) (Ardiyatmoko, 2021).

Komponen penting yang digunakan selain generator yaitu turbin, di mana untuk menghasilkan energi listrik yang maksimal dalam perencanaan harus memperhatikan beberapa faktor, salah satunya adalah perhitungan dimensi dan sudut pada turbin. Pada penelitian ini, jenis turbin yang digunakan adalah turbin *Archimedes Screw* (turbin ulir) yang dikenal cocok untuk aliran air dengan head rendah. Turbin ini bekerja dengan memanfaatkan tekanan air yang mengalir melalui bilah-bilah ulir, di mana tekanan tersebut akan berkurang seiring dengan melambatnya kecepatan aliran akibat adanya hambatan dari bilah (Erinofiardi et al., 2022). Dengan desain yang tepat, turbin *Archimedes Screw* tidak hanya mampu memanfaatkan potensi energi dari aliran air yang relatif lambat, tetapi juga dapat menjaga efisiensi konversi energi dalam kondisi debit dan head yang minim, sehingga sangat ideal untuk digunakan pada sistem mikrohidro di daerah terpencil (Karim et al., 2021).



Penelitian ini bertujuan untuk menguji efisiensi turbin *Archimedes Screw* yang dipasang secara vertikal dengan sudut 90° dalam menghasilkan daya mekanik dan listrik. Turbin ini bekerja dengan memanfaatkan aliran air yang masuk ke dalam struktur berbentuk ulir (*blade screw*), kemudian mendorong poros sehingga turbin berputar dan menghasilkan energi mekanik, yang selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik (Weking & Sudarmojo, 2019). Penelitian ini berfokus pada pengukuran efisiensi dan daya listrik yang dihasilkan oleh sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) dengan turbin *Archimedes Screw* Vertikal di aliran air kanal.

Untuk memonitoring kinerja turbin, digunakan *Dynamic Torque Meter* (DYN 200) untuk mengukur torsi dan kecepatan putaran (RPM), sehingga dapat diketahui daya mekanik yang dihasilkan. Selain itu, tegangan, arus, dan daya listrik dapat dimonitoring menggunakan sensor INA219. Sistem ini juga dilengkapi dengan *monitoring* yang memanfaatkan *Web Server* berbasis *Access Point*. Data dari berbagai sensor seperti tegangan, arus, dan daya listrik akan diproses oleh mikrokontroler ESP32. Mikrokontroler ini berfungsi untuk mengolah dan menyajikan data secara *real-time* melalui halaman web yang dihosting langsung oleh ESP32, sehingga kinerja sistem dapat dipantau langsung melalui *smartphone* atau perangkat lain yang terhubung ke jaringan *Access Point* lokal dari ESP32, tanpa memerlukan koneksi internet.

METODE

2.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan dan menganalisis berbagai sumber referensi, seperti jurnal ilmiah, buku, makalah, serta informasi dari internet yang relevan dengan topik tugas akhir. Studi ini mencakup pembahasan mengenai turbin *Archimedes Screw* pada PLTMH, termasuk pengaruh sudut kemiringan pemasangan turbin terhadap kinerja sistem. Selain itu, pengaruh jumlah blade dan sudut kemiringan blade pada turbin *Archimedes Screw*, yang berperan dalam efisiensi konversi energi air menjadi tenaga mekanik. Studi ini juga membahas penggunaan generator DC dalam sistem PLTMH serta implementasi monitoring menggunakan *Blynk* untuk memantau tegangan, arus, RPM, dan daya secara *real-time*. Dengan sistem ini, PLTMH dapat beroperasi lebih efisien dan mudah dipantau dari jarak jauh.

2.1.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian yang dilakukan oleh (Situmorang, 2022) pada tahun 2022 dengan judul. Analisis Kinerja Turbin Ulir Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro Dengan Variasi Sudut Kemiringan Poros menyimpulkan bahwa sudut kemiringan poros pada turbin *Archimedes Screw* (turbin ulir) berpengaruh terhadap daya listrik yang dihasilkan. Penelitian ini menggunakan empat variasi sudut kemiringan poros yaitu 32° , 37° , 42° , dan



47° dengan debit air 0,013 m³/s. Berdasarkan penelitian Manotar J. Situmorang, sudut kemiringan turbin ulir yang memberikan efisiensi tertinggi adalah 47°, dengan tingkat efisiensi mencapai 37,5%. Hal ini disebabkan oleh aliran air yang mengalir dengan optimal pada sudut tersebut, sehingga mampu memberikan dorongan maksimal pada bilah turbin dan meningkatkan konversi energi. Sebaliknya, sudut kemiringan 37° menghasilkan efisiensi terendah, yaitu 34%. Pada sudut ini, aliran air kurang optimal dalam mendorong bilah turbin, sehingga konversi energi menjadi kurang maksimal. Dari hasil ini, dapat disimpulkan bahwa sudut kemiringan poros memainkan peran penting dalam menentukan efisiensi turbin ulir pada PLTMH.

Analisa Pengaruh Kemiringan Head Dan Variasi Sudut Blade Turbin Ulir Terhadap Kinerja PLTMH merupakan penelitian dari (Wahyu Indra Wedanta et al., 2021), penelitian ini membahas bagaimana sudut kemiringan head dan variasi sudut blade pada turbin ulir mempengaruhi kinerja PLTMH. Pengaruh kemiringan *head* yaitu semakin besar kemiringan head, semakin tinggi tekanan dan kecepatan air, yang berkontribusi pada peningkatan putaran turbin dan daya output. Namun, jika sudut terlalu besar (>40°), air tidak lagi mengenai bagian aktif turbin secara optimal sehingga putaran dan daya menurun. Dari hasil pengujian sudut *head* 40° dan sudut *blade* 28° merupakan konfigurasi terbaik menghasilkan putaran turbin (sebelum dikopel) 596 rpm, putaran turbin (setelah dikopel) 304 rpm, daya *output* 11,08 W, tegangan (tanpa beban) 101,8 V, tegangan (dengan beban 40 W) 74,4 V, torsi 0,3492 Nm, serta efisiensi 14,28%. Sudut *blade* mempengaruhi efisiensi turbin dalam menangkap energi dari aliran air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sudut *blade* 28° memberikan hasil terbaik dalam hal putaran turbin, torsi, dan daya output.

2.2 Observasi Tempat Pengujian

Observasi langsung dilakukan di saluran air kanal Dusun II, Wadung Getas, Kec. Wonosari, Kabupaten Klaten, untuk mengumpulkan data terkait sistem PLTMH dengan turbin *Archimedes Screw* vertikal. Pengamatan difokuskan pada karakteristik aliran air, terutama debit air yang mengalir serta ketinggian permukaan air, yang menjadi faktor penting dalam menentukan performa turbin dan efisiensi sistem pembangkit listrik. Data yang diperoleh dari observasi ini nantinya akan digunakan sebagai dasar perhitungan dan analisis lebih lanjut dalam penelitian.





Gambar 1. Tempat Pengujian

2.2.1 Data Awal Debit Air

Tabel 1. Data Debit Air

Uji Ke -	Waktu (detik)	Debit (liter/detik)	Debit air (m ³ /s)
1	1.45	2.069	0.002069
2	1.54	1.948	0.001948
3	1.51	1.987	0.001987
4	1.55	1.935	0.001935
5	1.65	1.818	0.001818
6	1.48	2.027	0.002027
7	1.37	2.190	0.002190
8	1.18	2.542	0.002542
9	1.15	2.609	0.002609
10	1.20	2.500	0.002500
Rata-rata	1,408	2.163	0.002163

Tabel 1, menunjukkan hasil pengukuran waktu yang diperlukan untuk mengisi ember berkapasitas 3 liter sebagai metode untuk mengetahui debit aliran air di lokasi penelitian. Pengukuran dilakukan sebanyak 10 kali guna memperoleh nilai yang stabil. Pengambilan data dilakukan dengan menampung air dari aliran yang jatuh bebas setelah melewati saluran masuk (*intake*). Debit dihitung berdasarkan waktu pengisian ember yang ditempatkan tepat di bawah titik jatuhnya air (*housing hardware*). Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 1, waktu tercepat untuk mengisi ember terjadi pada uji ke-9 yaitu 1,15 detik, sedangkan waktu terlama terjadi pada uji ke-5 yaitu 1,65 detik. Rata-rata waktu pengisian dari seluruh pengujian adalah 1,408 detik, yang



menggambarkan karakteristik aliran dengan kecepatan yang relatif besar. Debit air dihitung berdasarkan volume ember yang tetap sebesar 3 liter dengan menggunakan persamaan (1).

$$Q = \frac{v}{t} \quad (1)$$

Di mana :

Q = debit air (m³/detik)

V = volume air yang mengalir (liter)

T = waktu yang dibutuhkan (detik)

2.2.2 Data Awal Pengujian Turbin

Tabel 2. Pengujian Turbin

Uji Ke -	Debit (liter/detik)	Debit air (m ³ /s)	Kecepatan Turbin (RPM)
1	2.069	0.002069	378
2	1.948	0.001948	308
3	1.987	0.001987	345
4	1.935	0.001935	335
5	1.818	0.001818	221
6	2.027	0.002027	353
7	2.190	0.002190	389
8	2.542	0.002542	461
9	2.609	0.002609	483
10	2.500	0.002500	427
Rata-rata	2.163 L/s	0.00216 m ³ /s	370 RPM

Tabel 2 hasil pengujian awal turbin berdasarkan debit air dan kecepatan putar turbin. Rata-rata debit yang tercatat adalah 2,163 liter/detik atau 0,002163 m³/s, dengan rata-rata kecepatan turbin sebesar 370 RPM. Data menunjukkan adanya hubungan linier positif antara debit dan RPM; semakin besar debit, semakin tinggi putaran turbin. Sebagai contoh, pada debit 1,818 L/s, turbin berputar 221 RPM, sedangkan pada debit 2,609 L/s, RPM meningkat menjadi 483. Pengujian turbin ini bertujuan untuk menentukan rasio pulley yang akan digunakan, sehingga putaran turbin dapat disesuaikan secara optimal dengan kebutuhan sistem penggerak generator.



2.2.3 Data Awal Pengujian Generator

Tabel 3. Pengujian Generator Tanpa Beban

Uji Ke -	Kecepatan Generator (RPM)	Tegangan (V)	Arus (A)
1	125.9	6.26	0.00
2	325	11.4	0.00
3	501.5	20.7	0.00
4	776.1	44.6	0.00
5	1014	63.2	0.00
6	1562	90.2	0.00
7	1803	104.2	0.00
8	2013	124.2	0.00
9	2487	153.9	0.00
Rata-rata	1180,7 RPM	68,3 V	0.00 A

Tabel 3 menampilkan hasil pengujian generator tanpa beban berdasarkan variasi kecepatan putar dan tegangan keluaran. Hasil menunjukkan bahwa tegangan meningkat seiring bertambahnya RPM. Pada 125,9 RPM, tegangan tercatat 6,26 V, sedangkan pada 2487 RPM mencapai 153,9 V. Arus tetap nol karena tidak ada beban terhubung. Rata-rata kecepatan putar selama pengujian adalah 1180,7 RPM, dengan rata-rata tegangan 68,3 V.

Tabel 4. Pengujian Generator Tanpa Beban

Uji Ke -	Kecepatan Generator (RPM)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
1	151.1	5,27	0.12	0,63
2	306	5.74	0.13	0,74
3	507.4	6.09	0.16	0,97
4	731.2	7.09	0.2	1,41
5	1037	7.11	0.3	2,13
6	1512	7.95	0.45	3,57
7	1819	8.18	0.55	4,49
8	2117	9.20	0.65	5,98
9	2446	12.81	0.83	10,63
Rata-rata	1074,8 RPM	7,83 V	0,38 A	3.40 W

Tabel 4, menunjukkan hasil pengujian generator dengan kondisi berbeban, di mana kecepatan putar, tegangan, dan arus diukur untuk mengetahui performa keluaran sistem. Hasil menunjukkan bahwa tegangan maupun arus meningkat seiring bertambahnya kecepatan putaran. Pada kecepatan rendah 151,1 RPM, tegangan tercatat



5,27 V dengan arus 0,12 A, sementara pada kecepatan tertinggi 2446 RPM, tegangan meningkat menjadi 12,81 V dengan arus 0,83 A. Rata-rata kecepatan putar selama pengujian adalah 1074,8 RPM, dengan rata-rata tegangan 7,83 V dan arus 0,38 A. Dari hasil pengujian berbeban, daya listrik yang dihasilkan meningkat secara signifikan seiring dengan bertambahnya kecepatan putaran generator. Pada kecepatan 151,1 RPM, daya yang dihasilkan tercatat sebesar 0,63 W, sedangkan pada 2446 RPM meningkat menjadi 10,63 W. Daya listrik tersebut dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$P = V \times I \quad (2)$$

Di mana :

P = daya listrik (Watt)

V = tegangan listrik (Volt)

I = arus listrik (Ampere)

Rasio pulley ditentukan berdasarkan perbandingan antara putaran generator dan turbin, sebagaimana dinyatakan dalam Persamaan (3).

$$\text{Rasio Pulley} = \frac{\text{RPM Generator Load}}{\text{RPM Turbin}} \quad (3)$$

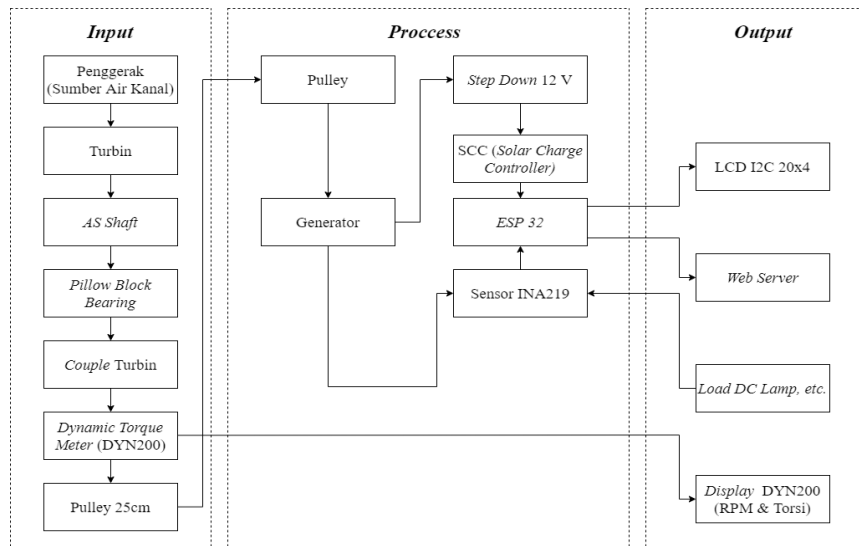
2.3 Perancangan Sistem PLTMH

Langkah awal dalam penelitian ini adalah mengidentifikasi dan mencatat alat serta bahan yang diperlukan untuk mendukung pembuatan dan perakitan sistem PLTMH. Perancangan sistem dilakukan berdasarkan skema desain yang telah dirancang, dengan turbin *Archimedes Screw* sebagai komponen utama untuk mengonversi energi air menjadi energi mekanik, serta generator DC sebagai perangkat pembangkit listriknya. Selain itu, merancang sistem elektronika yang berfungsi untuk memonitoring parameter keluaran PLTMH, seperti tegangan, arus, daya, torsi dan kecepatan putaran turbin, bertujuan untuk memastikan kinerja PLTMH berjalan optimal serta mempermudah proses analisis dan evaluasi.

2.3.1 Diagram Blok Sistem

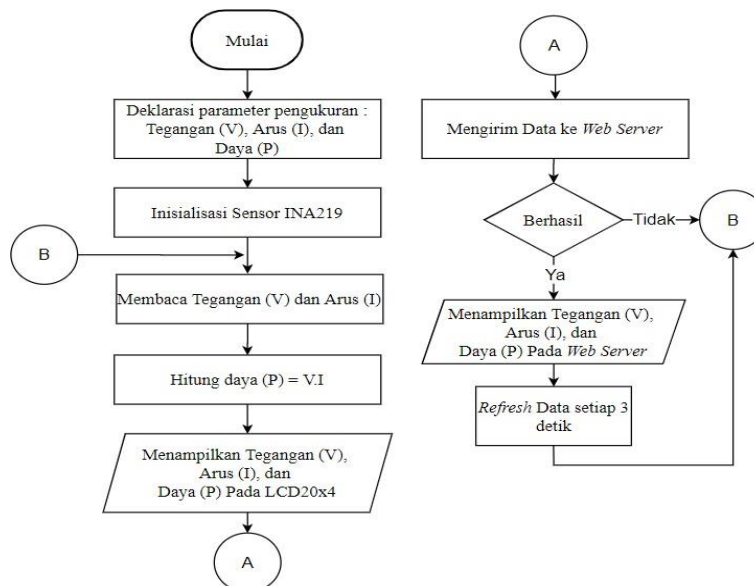
Rancangan sistem PLTMH merupakan alur kerja pembangkitan listrik dari energi kinetik air. Sistem terdiri dari tujuh komponen *input* utama, yaitu turbin, *AS shaft*, *pillow block bearing*, *couple turbin*, *Dynamic Torque Meter (DYN200)*, dan pulley. Energi mekanik dari aliran air diteruskan ke generator untuk menghasilkan listrik, kemudian distabilkan dan dialirkan melalui *Solar Charge Controller (SCC)* ke beban dan baterai. Parameter listrik seperti tegangan, arus, dan daya dipantau menggunakan sensor INA219 dan ditampilkan secara *real-time* melalui LCD 20x4 serta tampilan pada *Web Server*. Torsi dan RPM dari turbin dimonitor menggunakan display dari DYN200.





Gambar 2. Blok Diagram Sistem

Flowchart Gambar 3. Menunjukkan alur kerja sistem *monitoring* daya listrik menggunakan sensor INA219 dan ESP32 sebagai *Web Server* berbasis *Access Point*. Proses dimulai dengan inialisasi parameter tegangan (V), arus (I), dan daya (P), kemudian sensor INA219 membaca nilai tegangan dan arus. Daya dihitung menggunakan rumus Persamaan (2), lalu data dikirim ke *Web Server*. Jika pengiriman berhasil, data ditampilkan dalam halaman *web* yang diakses melalui jaringan lokal ESP32. Tampilan diperbarui otomatis setiap dua detik, memungkinkan pemantauan sistem secara real-time melalui perangkat yang terhubung ke *Access Point*.



Gambar 3. Flowchart/Diagram Alir Program



2.3.2 Perancangan Hardware

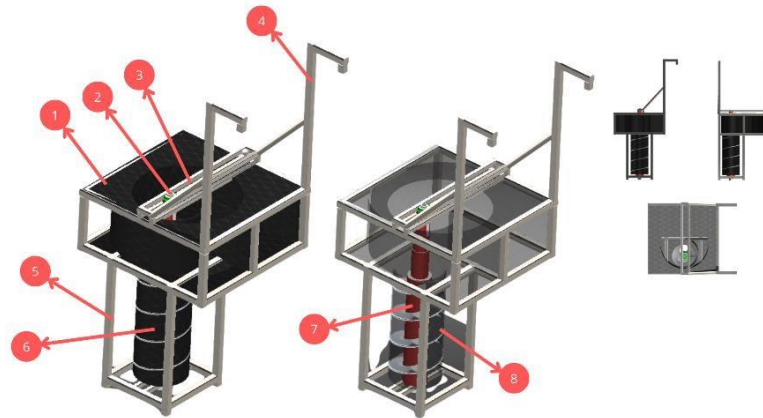
a) Alat dan bahan

Tabel 5. Perancangan Hardware

Alat dan Bahan	Jumlah
Generator DC 30 W	1
<i>Solar Charge Controller</i>	1
MCB DC 3A	3
LCD I2C 20x4	1
Sensor INA219	3
ESP 32 WROOM32	1
Kabel NYAF 1.5mm ²	Secukupnya
Step Down 12 V	1
Boost Converter MT3608	1
AS Shaft	1
Pillow Block Bearing	3
Pipa Besi	1
Plat Besi	Secukupnya
Pulley	1
PVC Foam	Secukupnya
Pipa PVC 8" 70cm	1
Coupling DYN200	1
Kabel USB	1
Panel BOX	1
Dynamic Torque Meter DYN200	1
PCB Lubang	1
PCB Cetak	1



b) Perancangan Design Hardware



Gambar 4. Pencetakan PCB dan Perancangan Sistem Elektrikal

Keterangan:

- 1) PVC Foam lapisan rangka turbin
- 2) *Pillow Block Bearing*
- 3) Dudukan *pillow block bearing, as shaft, dan dynamic torque meter DYN200*
- 4) Palang rangka
- 5) Dudukan *housing turbin*
- 6) *Housing PVC*
- 7) *AS Shaft*
- 8) Ulir turbin

c) Perancangan Mekanik

Perancangan mekanik dimulai dengan merakit rangka turbin dari bahan *PVC foam* sebagai penopang utama. *Pillow block bearing* dipasang untuk menopang *AS shaft* dan menjaga kestabilan putaran turbin saat terkena aliran air. *AS shaft* dihubungkan ke ulir turbin dan ditempatkan dalam *housing PVC* yang dirancang tahan air. Komponen seperti *bearing, AS shaft, dan dynamic torque meter DYN200* dipasang pada dudukan yang telah disiapkan di rangka. Semua bagian dirakit sesuai desain untuk memastikan sistem dapat bekerja stabil dan mendukung proses konversi energi serta pengukuran data secara akurat.

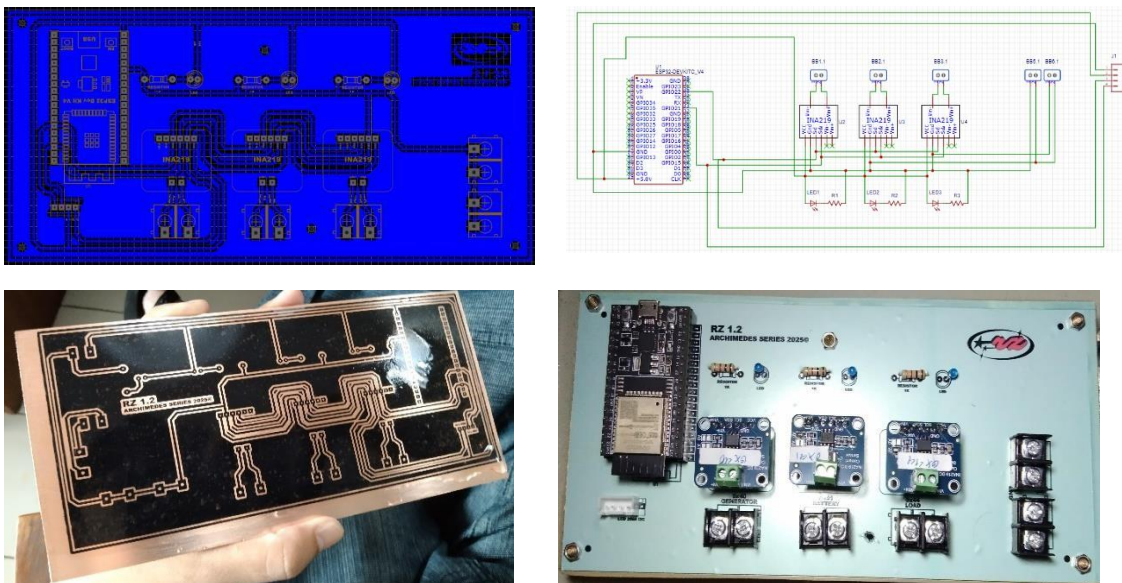




Gambar 5. Perancangan Mekanik

d) Perancangan Sistem Elektrikal

Perancangan sistem elektrikal dilakukan dengan menyusun skematik rangkaian di EasyEDA, yang kemudian dilanjutkan dengan pembuatan *layout* PCB. Skematik ini mencakup koneksi antara ESP32, tiga sensor INA219, terminal *input/output*, serta komponen pendukung seperti resistor dan konektor. Desain PCB dibuat agar seluruh rangkaian lebih rapi, minim kabel, dan mudah dirakit. PCB ini juga memudahkan integrasi sensor arus dan tegangan ke mikrokontroler, serta mempercepat proses perawatan sistem PLTMH secara keseluruhan. Desain PCB mencakup mikrokontroler ESP32, tiga sensor INA219 untuk pemantauan tegangan dan arus, serta koneksi ke beban, baterai, dan generator. Setelah proses desain selesai, PCB dicetak dan telah berhasil direalisasikan sesuai layout yang dirancang. PCB ini digunakan sebagai pusat kontrol dan monitoring pada sistem PLTMH.

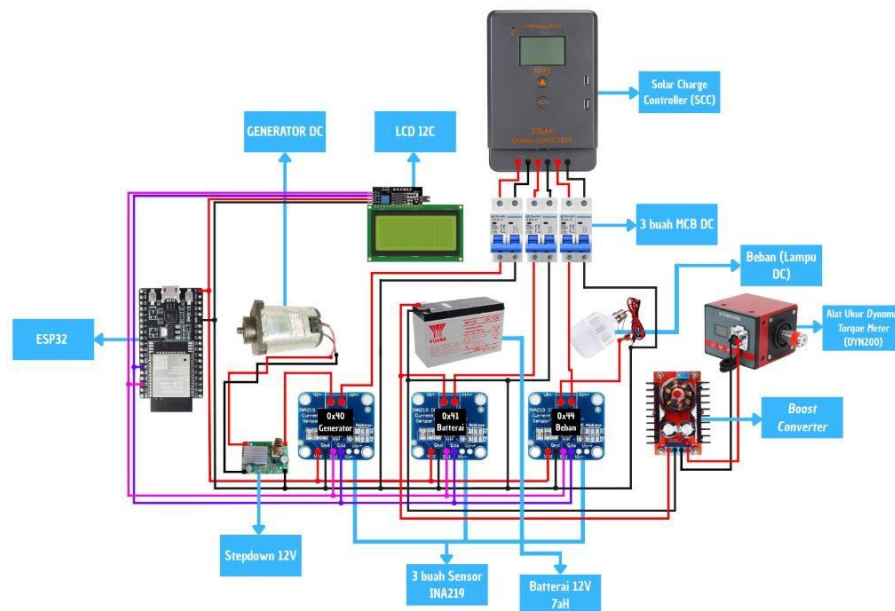


Gambar 6. Pencetakan PCB dan Perancangan Sistem Elektrikal



e) Wiring Sistem

Gambar 7 wiring sistem menunjukkan keseluruhan hubungan antar komponen dalam sistem PLTMH ini. Generator DC dihubungkan ke *Solar Charge Controller* (SCC) melalui sensor INA219 pertama (alamat 0x40) untuk memantau tegangan, arus, dan daya keluaran generator. Jalur berikutnya dari SCC menuju baterai juga dipantau oleh sensor INA219 kedua (alamat 0x41), lalu aliran listrik dari SCC ke beban dipantau oleh sensor INA219 ketiga (alamat 0x44). Semua sensor ini terhubung ke mikrokontroler ESP32 melalui komunikasi I2C. ESP32 juga dihubungkan ke LCD I2C 20x4 sebagai tampilan lokal, serta terhubung ke WiFi untuk mengirim data ke aplikasi Blynk secara real-time. Sistem juga dilengkapi dengan step-down converter 12V untuk menyesuaikan tegangan ke rangkaian elektronik, serta sensor RPM dan torsi (DYN200) yang dihubungkan langsung ke poros turbin.



Gambar 7. Wiring Sistem

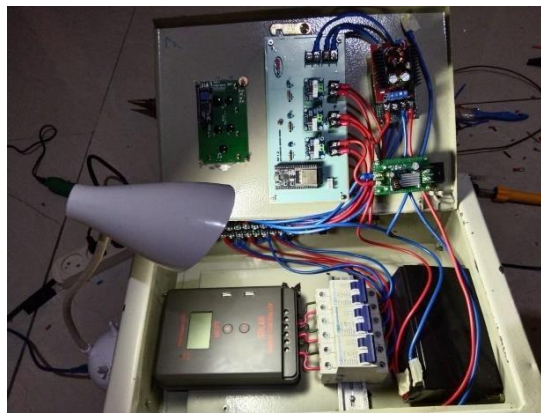
HASIL

3.1 Implementasi *Hardware*

Proses implementasi *hardware* dilakukan langsung di saluran air kanal yang terletak di Dusun II, Wadung Getas, Kecamatan Wonosari, Kabupaten Klaten. Pada tahap ini, sistem yang sudah dirancang sebelumnya mulai diuji coba di lapangan. Tujuannya adalah untuk melihat bagaimana turbin bekerja saat terkena aliran air secara langsung. Fokus utama uji coba awal ini adalah untuk mengetahui berapa putaran turbin (RPM) yang dihasilkan dari debit air yang ada. Nilai RPM ini nantinya akan digunakan sebagai acuan untuk



menentukan perbandingan pulley yang paling sesuai agar generator bisa menghasilkan tegangan secara maksimal.



Gambar 8. Implementasi *Hardware*

3.2 Script Program

Setelah *hardware* selesai dipasang di lapangan, langkah selanjutnya adalah menyusun program pada Gambar 9 untuk memantau parameter seperti tegangan, arus, dan daya listrik. Menggunakan ESP32, *script* ditulis untuk membaca data dari sensor-sensor tersebut, lalu menampilkannya melalui LCD dan *Web Server*. Penyusunan program dilakukan secara bertahap, mulai dari pembacaan sensor, pengolahan data, hingga pengiriman ke antarmuka pengguna. Seluruh kode disesuaikan dengan kebutuhan sistem agar dapat berjalan secara stabil dan responsif terhadap kondisi di lapangan.



WEB_SERVER_FIX	WEB_SERVER_FIX
<pre> 1 /***** LIBRARY *****/ 2 #include <Wire.h> 3 #include <LiquidCrystal_I2C.h> 4 #include <Adafruit_INA219.h> 5 #include <math.h> 6 #include <WiFi.h> 7 #include <WebServer.h> 8 9 /***** OBJECT *****/ 10 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4); 11 Adafruit_INA219 ina219_1(0x40); // Generator ke SCC 12 Adafruit_INA219 ina219_2(0x41); // SCC ke Baterai 13 Adafruit_INA219 ina219_3(0x44); // SCC ke Beban 14 WebServer server(80); 15 16 /***** ACCESS POINT CONFIG *****/ 17 const char *ssid = "PLTMH_AP"; 18 const char *password = "12345678"; 19 20 /***** DATA *****/ 21 unsigned long previousMillis = 0; 22 const long interval = 3000; // 3 detik 23 int channelIndex = 0; 24 25 float volt1, curr1, power1; 26 float volt2, curr2, power2; 27 float volt3, curr3, power3; </pre>	<pre> 29 /***** SETUP *****/ 30 void setup() { 31 Serial.begin(115200); 32 Wire.begin(21, 22); // ESP32 SDA = 21, SCL = 22 33 34 if (!ina219_1.begin()) { Serial.println("INA219 CH1 gagal"); while (1); } 35 if (!ina219_2.begin()) { Serial.println("INA219 CH2 gagal"); while (1); } 36 if (!ina219_3.begin()) { Serial.println("INA219 CH3 gagal"); while (1); } 37 38 lcd.init(); 39 lcd.backlight(); 40 lcd.setCursor(2, 1); 41 lcd.print("Monitoring ELTMH"); 42 delay(2000); 43 lcd.clear(); 44 45 // Setup Access Point 46 WiFi.softAP(ssid, password); 47 IPAddress IP = WiFi.softAPIP(); 48 Serial.print("AP IP Address: "); Serial.println(IP); 49 50 // Web Server route 51 server.on("/", handleRoot); 52 server.begin(); 53 } </pre>
<pre> 55 /***** LOOP *****/ 56 void loop() { 57 server.handleClient(); 58 59 unsigned long currentMillis = millis(); 60 if (currentMillis - previousMillis >= interval) { 61 previousMillis = currentMillis; 62 63 // Baca sensor 64 volt1 = ina219_1.getBusVoltage_V(); 65 curr1 = fabs(ina219_1.getCurrent_mA() * 5) / 1000.0; 66 power1 = volt1 * curr1; 67 68 volt2 = ina219_2.getBusVoltage_V(); 69 curr2 = fabs(ina219_2.getCurrent_mA() * 1.455) / 1000.0; 70 power2 = volt2 * curr2; 71 72 volt3 = ina219_3.getBusVoltage_V(); 73 curr3 = fabs(ina219_3.getCurrent_mA() * 1.6) / 1000.0; 74 power3 = volt3 * curr3; 75 76 // LCD tampilan bergilir 77 String label = (channelIndex == 0) ? "Gen" : (channelIndex == 1) ? "Batt" : "Load"; 78 float v = (channelIndex == 0) ? volt1 : (channelIndex == 1) ? volt2 : volt3; 79 float c = (channelIndex == 0) ? curr1 : (channelIndex == 1) ? curr2 : curr3; 80 float p = (channelIndex == 0) ? power1 : (channelIndex == 1) ? power2 : power3; 81 82 lcd.clear(); 83 lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("SCC Connect => " + label); 84 lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("Tegangan : "); lcd.print(v, 2); lcd.print(" V"); 85 lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("Arus : "); lcd.print(c, 2); lcd.print(" A"); 86 lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("Daya : "); lcd.print(p, 2); lcd.print(" W"); 87 88 channelIndex = (channelIndex + 1) % 3; 89 } 90 } 91 </pre>	

Gambar 9. Script Program

3.3 Tampilan Web Server

Pembacaan tegangan dan arus dilakukan menggunakan sensor INA219 yang terhubung ke mikrokontroler melalui protokol I2C. Data dari tiga channel yaitu generator, baterai, dan beban diproses lalu ditampilkan secara langsung di LCD. Selain itu, mikrokontroler ESP32 juga mengirimkan data tersebut ke Web Server yang berjalan dalam mode *access point*. Dengan menghubungkan perangkat seperti smartphone ke jaringan ESP32 dan membuka alamat IP 192.168.4.1, pengguna dapat memantau data *real-time* tanpa memerlukan koneksi *internet*.





Monitoring PLTMH (Access Point Mode)

Channel	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
Generator	12.08	0.12	1.47
Baterai	12.18	0.85	10.37
Beban	11.98	0.67	8.08

Gambar 10. Tampilan Web Server

3.4 Pengujian Nilai Sensor INA219 terhadap Nilai Multi Meter

3.4.1 Generator

Tabel 6. Pengujian Nilai Tegangan Sensor INA219 (1) terhadap Nilai Tegangan Multi Meter

Uji Ke -	RPM	Tegangan (V) Sensor INA219	Tegangan (V) Clamp Meter	Presentase Error (%)
1	1352	12.15 V	12.18 V	0.246%
2	1320	12.12 V	12.01 V	0.916%
3	1280	12.09 V	12.09 V	0.00%
4	1275	12.08 V	12.05 V	0.249%
5	1265	12.07 V	12.10 V	0.248%
Rata-rata		12.10 V	12.08 V	0.332%
Akurasi (%)		99.67%		

Berdasarkan Tabel 6, hasil pengukuran tegangan menggunakan sensor INA219 dibandingkan dengan clamp meter menunjukkan selisih yang sangat kecil. Rata-rata tegangan yang terukur oleh sensor adalah 12,10 V, sedangkan clamp meter menunjukkan 12,08 V. Selisih ini menghasilkan rata-rata error sebesar 0,332%, sehingga akurasi sensor mencapai 99,67%.



Tabel 7. Pengujian Nilai Arus Sensor INA219 (1) terhadap Nilai Arus Clamp Meter

Uji Ke -	Arus (A) Sensor INA219	Arus (A) <i>Clamp</i> Meter	Presentase Error (%)
1	0.15 A	0.06 A	150.0%
2	0.15 A	0.11 A	36.36%
3	0.09 A	0.08 A	12.50%
4	0.09 A	0.08 A	12.50%
5	0.04 A	0.07 A	42.86%
Rata-rata	0.104 A	0.08 A	
Rata-rata <i>Error</i> (%)		50,84%	
Akurasi (%)		49.16%	

Tabel 7, menunjukkan hasil pengujian nilai arus dari sensor INA219 dibandingkan dengan *Clamp Meter* sebagai alat ukur referensi. Dari lima kali pengujian, terlihat bahwa nilai arus yang terbaca oleh INA219 cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan nilai arus dari *Clamp Meter*. Hal ini menghasilkan persentase error yang cukup besar, terutama pada uji pertama yang mencapai 150%. Meskipun pada uji ketiga dan keempat error turun menjadi 12.5%, rata-rata error keseluruhan masih cukup tinggi, yaitu sebesar 50.84%. Rata-rata nilai arus yang terbaca oleh sensor INA219 adalah 0.104 A, sedangkan nilai rata-rata dari *Clamp Meter* hanya 0.08 A. Akurasi sensor berdasarkan pengujian ini hanya sebesar 49.16%, yang menunjukkan bahwa INA219 memiliki deviasi yang cukup besar dalam pengukuran arus pada rentang nilai rendah.

3.4.2 Baterai

Tabel 8. Pengujian Nilai Tegangan Sensor INA219 (2) terhadap Nilai Tegangan Multi Meter

Uji Ke -	Tegangan (V) Sensor INA219	Tegangan (V) <i>Clamp</i> Meter	Presentase Error (%)
1	12.38 V	12.39 V	0.08%
2	12.32 V	12.34 V	0.162%
3	12.31 V	12.33 V	0.162%
4	12.30 V	12.32 V	0.16%
5	12.29 V	12.31 V	0.16%
Rata-rata	12.32 V	12.338 V	



Rata-rata <i>Error</i> (%)	0.145%
Akurasi (%)	9.855%.

Hasil pengukuran tegangan menggunakan sensor INA219 dibandingkan dengan *Clamp Meter* menunjukkan perbedaan yang sangat kecil. Rata-rata tegangan dari INA219 adalah 12.32 V, sementara clamp meter 12.338 V. Rata-rata error tercatat sebesar 0.145%, menghasilkan tingkat akurasi 99.855%.

Tabel 9. Pengujian Nilai Arus Sensor INA219 (2) terhadap Nilai Arus Clamp Meter

Uji Ke -	Arus (A) Sensor INA219	Arus (A) <i>Clamp</i> Meter	Presentase Error (%)
1	0.37 A	0.38 A	2.63%
2	0.41 A	0.40 A	2.50%
3	0.41 A	0.41 A	0%
4	0.41 A	0.40 A	2.5%
5	0.41 A	0.42 A	2.38%
Rata-rata	0.402 A		
Rata-rata <i>Error</i> (%)	2.00%		
Akurasi (%)	98.00%		

Sensor INA219 diuji dengan membandingkan hasil pembacaan arus terhadap clamp meter. Rata-rata arus yang terbaca dari keduanya sama, yaitu 0.402 A, menunjukkan konsistensi pembacaan. Rata-rata error sebesar 2.00%, dengan akurasi 98.00%, menandakan sensor cukup akurat dan dapat diandalkan untuk kebutuhan monitoring arus pada sistem PLTMH. Nilai error tertinggi hanya 2.63%, sementara pengujian ke-3 menunjukkan hasil tanpa selisih (0%), membuktikan performa sensor yang stabil untuk pemantauan lapangan.



3.4.1 Beban

Tabel 10. Pengujian Nilai Tegangan Sensor INA219 (3) terhadap Nilai Tegangan Multi Meter

Uji Ke -	Tegangan (V) Sensor INA219	Tegangan (V) <i>Clamp</i> Meter	Presentase Error (%)
1	12.22 V	12.15 V	0.576%
2	12.18 V	12.13 V	0.412%
3	12.18 V	12.12 V	0.50%
4	12.17 V	12.11 V	0.50%
5	12.16 V	12.11 V	0.41%
Rata-rata	12.182 V	12,124 V	
Rata-rata <i>Error</i> (%)		0.48%	
Akurasi (%)		99.52%	

Pengujian tegangan pada beban menunjukkan hasil yang cukup stabil antara pembacaan INA219 dan clamp meter. Rata-rata tegangan sensor adalah 12.182 V sedangkan rata-rata *clamp* meter adalah 12,124 V. Dengan rata-rata error hanya 0.48%, menghasilkan akurasi sebesar 99.52%. Nilai error maksimum sebesar 0.576% tergolong kecil, hal ini menunjukkan bahwa sensor INA219 mampu memberikan hasil pengukuran yang presisi untuk pemantauan tegangan beban pada sistem PLTMH.

Tabel 11. Pengujian Nilai Arus Sensor INA219 (3) terhadap Nilai Arus *Clamp* Meter

Uji Ke -	Arus (A) Sensor INA219	Arus (A) <i>Clamp</i> Meter	Presentase Error (%)
1	0.38 A	0.40 A	5.00%
2	0.38 A	0.39 A	2.56%
3	0.38 A	0.40 A	5%
4	0.38 A	0.39 A	2.56%
5	0.38 A	0.39 A	2.56%
Rata-rata	0.38 A	0.394 A	
Rata-rata <i>Error</i> (%)		3.136%	
Akurasi (%)		96.86%	



Sensor INA219 menunjukkan pembacaan arus yang konsisten (0.38 A), namun sedikit lebih rendah dibanding clamp meter, yang menunjukkan variasi antara 0.39–0.40 A. Rata-rata error relatif rendah sebesar 3.136%, menunjukkan bahwa sensor masih cukup akurat untuk pemantauan arus beban pada sistem PLTMH, dengan tingkat akurasi mencapai 96.86%.

3.5 Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) dengan menggunakan turbin *Archimedes Screw* dalam posisi vertikal. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk mengetahui seberapa efektif konfigurasi vertikal turbin dalam mengubah energi potensial air menjadi energi mekanik, yang kemudian dikonversi menjadi energi listrik oleh generator. Untuk mengetahui nilai torsi dan putaran (RPM) yang dihasilkan turbin, digunakan alat ukur *Dynamic Torque Meter DYN200*. Sistem ini dilengkapi dengan *Solar Charge Controller (SCC)* yang berfungsi sebagai pengatur arus dan tegangan dari generator menuju baterai, sehingga proses pengisian daya dapat berlangsung dengan aman dan efisien serta melindungi baterai dari *overcharging* atau arus berlebih. Selain itu, sistem dilengkapi tiga buah sensor INA219 untuk memantau parameter listrik pada tiga titik berbeda. Sensor Channel 1 (alamat 0x40) digunakan untuk mengukur arus, tegangan, dan daya dari generator; Channel 2 (0x41) untuk memantau daya pada baterai; dan Channel 3 (0x44) untuk membaca parameter pada beban. Seluruh sensor menggunakan komunikasi I2C dan data ditampilkan melalui LCD 20x4. Sistem ini juga mendukung konektivitas lokal melalui fitur *Access Point*, yang memungkinkan perangkat terhubung langsung untuk mengakses *Web Server* dan memantau data pengukuran secara *real-time* tanpa memerlukan koneksi internet.



Gambar 11. Pengujian sistem di saluran air kanal Dusun II, Wadung Getas, Kec. Wonosari, Kabupaten Klaten

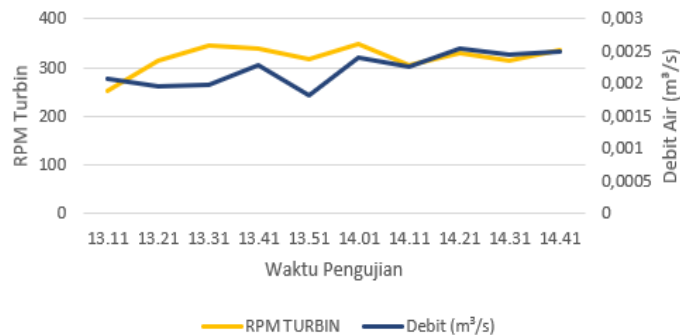


3.5.1 Data Pengukuran Turbin

Tabel 12. Data Pengujian Turbin menggunakan *Dynamic Torque Meter* DYN200

Jam	Debit (m ³ /s)	RPM Turbin	Torsi (Nm) Turbin
13.11	0.00207	253	10
13.21	0.00195	314	18
13.31	0.00199	345	22
13.41	0.00229	338	23
13.51	0.00182	317	18
14.01	0.00240	347	19
14.11	0.00226	305	15
14.21	0.00254	328	20
14.31	0.00244	313	20
14.41	0.00250	336	22
Rata-rata	0.002226 m ³ /s	319.6 RPM	18.8 Nm

Grafik RPM Turbin terhadap Perubahan Debit Air



Gambar 12. Grafik RPM Turbin terhadap Perubahan Debit Air

Tabel 12, menampilkan hasil pengukuran performa turbin *Archimedes Screw* dalam posisi vertikal. Data pengujian dari pukul 13.11 hingga 14.41 dengan interval 10 menit. Parameter yang diukur meliputi debit air, RPM (putaran per menit) turbin, dan torsi (dalam satuan *Newton meter*). Dari data yang ditampilkan, debit air berkisar antara 0.00182 hingga 0.00254 m³/s. Nilai RPM turbin tercatat mulai dari 253 hingga 347, sementara torsi berada dalam rentang 10 hingga 23 Nm. Pengukuran ini menunjukkan bahwa saat debit meningkat, secara umum RPM dan torsi juga ikut naik, yang artinya



semakin banyak aliran air yang masuk ke turbin, semakin besar pula energi mekanik yang dihasilkan.

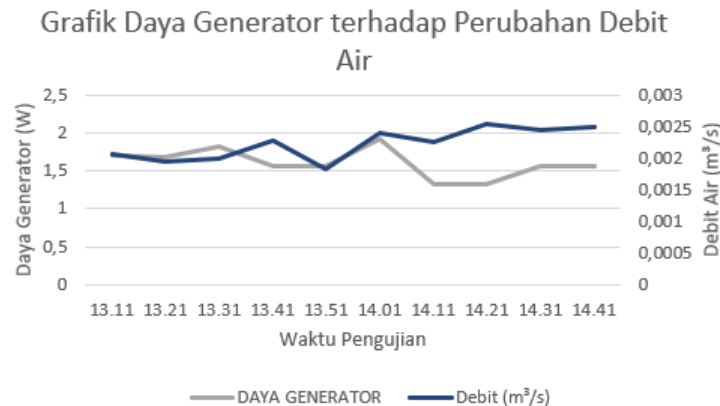
Gambar 12 menunjukkan grafik hubungan antara debit air (m^3/s) dan kecepatan turbin (RPM) terhadap waktu pengujian. Terlihat bahwa data debit air berkisar antara $0,0018 m^3/s$ hingga $0,0026 m^3/s$, sementara kecepatan turbin bervariasi antara 221 hingga 483 RPM. Pada selang waktu 13.31 hingga 13.41, debit naik dan diikuti kenaikan RPM. Namun, pada waktu 13.51, terjadi penurunan debit yang disertai penurunan RPM, menunjukkan sensitivitas sistem terhadap perubahan aliran air.

3.5.2 Data Pengukuran Generator

Tabel 13. Data Pengujian Generator

Jam	Debit (m^3/s)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)	RPM
13.11	0.00207	12,16	0,14	1,7	1352
13.21	0.00195	12,14	0,14	1,69	1257
13.31	0.00199	12,22	0,15	1,83	1431
13.41	0.00229	12,14	0,13	1,57	1281
13.51	0.00182	12,07	0,13	1,56	1356
14.01	0.00240	12,06	0,16	1,92	3346
14.11	0.00226	12,05	0,11	1,32	3034
14.21	0.00254	12,02	0,11	1,32	2928
14.31	0.00244	12,04	0,13	1,56	2046
14.41	0.00250	12,02	0,13	1,56	1822
Rata- rata	0.002226 m^3/s	12.092 V	0.133 A	1.603 W	1985.3 RPM





Gambar 13. Grafik Daya Generator terhadap Perubahan Debit Air

Tabel 13, menunjukkan hasil pengukuran kinerja generator yang digunakan dalam sistem PLTMH berbasis turbin *Archimedes Screw* vertikal. Pengujian dilakukan setiap 10 menit mulai pukul 13.11 hingga 14.41, dengan data yang mencakup debit air, tegangan (V), arus (A), daya (W), dan RPM dari generator. Tegangan yang dihasilkan oleh generator berkisar antara 12,02 hingga 12,22 Volt, dengan arus sebesar 0,11 hingga 0,16 Ampere, dan daya listrik yang dihasilkan berada pada rentang 1,32 hingga 1,92 Watt. Nilai RPM generator mulai dari 1257 hingga 3346, yang menunjukkan adanya fluktuasi kecepatan putaran turbin. Variasi ini kemungkinan besar disebabkan oleh perubahan debit air maupun kondisi beban saat pengujian berlangsung.

Gambar 12 menunjukkan hubungan antara debit air dan daya output generator. Debit berkisar antara 0,0018 hingga 0,0026 m³/s, sementara daya berada di rentang 1,5 hingga 2,3 W. Secara umum, grafik menunjukkan pola searah—peningkatan debit cenderung diikuti oleh peningkatan daya. Meskipun terdapat fluktuasi kecil pada titik tertentu, hubungan positif ini menegaskan bahwa debit air berperan langsung dalam menentukan besarnya daya listrik yang dihasilkan.

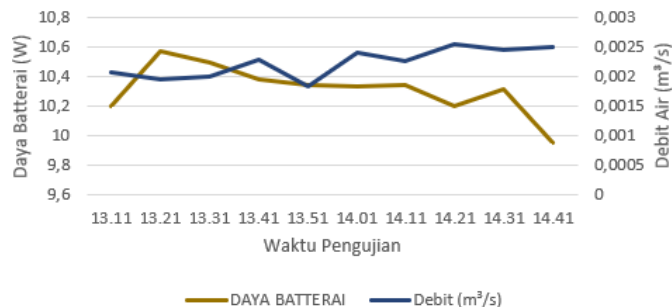


3.5.3 Data Pengukuran Baterai

Tabel 14. Data Pengujian Baterai

Jam	Debit (m ³ /s)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
13.11	0.00207	12,29	0,83	10,2
13.21	0.00195	12,59	0,84	10,57
13.31	0.00199	12,2	0,86	10,49
13.41	0.00229	12,07	0,86	10,38
13.51	0.00182	12,17	0,85	10,34
14.01	0.00240	12,16	0,85	10,33
14.11	0.00226	12,17	0,85	10,34
14.21	0.00254	12,15	0,84	10,2
14.31	0.00244	12,13	0,85	10,31
14.41	0.00250	12,14	0,82	9,95
Rata-rata	0.002226 m ³ /s	12.217 V	0.845 A	10.311 W

Grafik Daya Baterai terhadap Perubahan Debit Air



Gambar 14. Grafik Daya Baterai terhadap Perubahan Debit Air

Tabel 14, menunjukkan hasil pengukuran baterai sebagai penyimpan energi listrik dalam sistem PLTMH. Pengujian dilakukan mulai pukul 13.11 hingga 14.41 dengan parameter yang diamati yaitu debit air, tegangan, arus, dan daya yang masuk ke baterai. Selama pengujian, tegangan baterai terpantau cukup stabil di kisaran 12,07 sampai 12,59 Volt. Hasil pengukuran daya pada baterai yang lebih besar dibandingkan daya yang dihasilkan oleh generator menunjukkan bahwa baterai dalam kondisi discharging, bukan charging. Hal ini mengindikasikan bahwa beban sistem sebagian besar disuplai



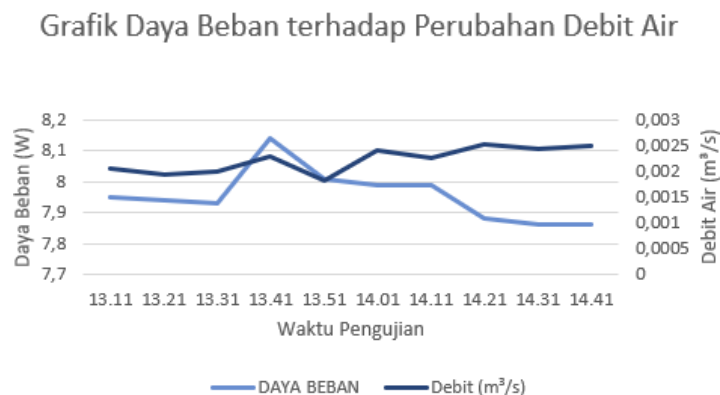
oleh energi yang tersimpan dalam baterai, sementara output dari generator tidak sepenuhnya mencukupi kebutuhan daya saat itu.

Gambar 13, menunjukkan bahwa meskipun debit air stabil di kisaran 0,002 m³/s, daya baterai justru menurun dari 10,6 W menjadi di bawah 10 W. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan debit menurunkan daya yang disuplai batterai. Hal ini juga dapat mengindikasikan adanya kerugian daya pada komponen seperti konverter serta kapasitas baterai mendekati penuh, sehingga arus pengisian secara otomatis diturunkan.

3.5.4 Data Pengukuran Beban

Tabel 15. Data Pengujian Beban

Jam	Debit (m ³ /s)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
13.11	0.00207	12,06	0,66	7,95
13.21	0.00195	12,04	0,66	7,94
13.31	0.00199	12,02	0,66	7,93
13.41	0.00229	11,98	0,68	8,14
13.51	0.00182	11,96	0,67	8,01
14.01	0.00240	11,93	0,67	7,99
14.11	0.00226	11,94	0,67	7,99
14.21	0.00254	11,95	0,66	7,88
14.31	0.00244	11,92	0,66	7,86
14.41	0.00250	11,92	0,66	7,86
Rata-rata	0.002226 m ³ /s	11.972 V	0.666 A	7.955 W



Gambar 15. Grafik Daya Beban terhadap Perubahan Debit Air



Tabel 15, menunjukkan hasil pengukuran daya listrik yang dialirkan ke beban pada sistem PLTMH. Pengujian dilakukan dari pukul 13.11 hingga 14.41 dengan mencatat debit air, tegangan, arus, dan daya pada beban. Selama pengujian, tegangan yang masuk ke beban cukup stabil di kisaran 11,92 hingga 12,06 Volt, dengan arus sekitar 0,66 hingga 0,68 Ampere. Daya yang diterima beban juga relatif konstan, antara 7,86 hingga 8,14 Watt, yang menandakan bahwa sistem mampu menyediakan suplai daya dengan stabil sepanjang waktu pengujian.

Berdasarkan Gambar 14, grafik menunjukkan hubungan antara debit air dan daya beban selama periode pengujian. Secara umum, daya beban cenderung stabil di kisaran 8 W, meskipun debit air mengalami fluktuasi antara 0,0005 hingga 0,0028 m³/s. Peningkatan debit air pada pukul 13.41 diikuti oleh kenaikan daya beban, menunjukkan adanya korelasi positif sesaat. Namun, penurunan debit setelahnya tidak langsung menurunkan daya secara signifikan, menandakan bahwa sistem memiliki respon yang stabil terhadap variasi debit.

PEMBAHASAN

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem PLTMH dengan konfigurasi turbin *Archimedes Screw* vertikal mampu mengonversi energi potensial air menjadi energi listrik secara efektif meskipun bekerja dengan debit air yang rendah. Keberhasilan sistem ini tidak hanya ditunjukkan oleh stabilitas daya keluaran generator dan kemampuan pengisian baterai, tetapi juga melalui keberhasilan pemantauan parameter kelistrikan secara real-time menggunakan *Web Server* berbasis ESP32.

4.1 Interpretasi Hasil Pengujian

Data pengujian torsi dan RPM menunjukkan hubungan linier antara debit air dan performa mekanik turbin. Semakin besar debit, semakin besar pula torsi dan RPM yang dihasilkan, yang selanjutnya meningkatkan tegangan dan daya keluaran generator. Ini sejalan dengan prinsip dasar konversi energi kinetik air menjadi energi mekanik pada turbin ulir, sebagaimana dijelaskan oleh Erinofiardi et al. (2022), bahwa *Archimedes Screw* cocok untuk aliran dengan kecepatan rendah namun tetap menghasilkan daya yang memadai bila dimensi dan sudut turbin dioptimalkan.

Rata-rata daya listrik yang masuk ke baterai sebesar 10,31 W dan daya ke beban sebesar 7,95 W memperlihatkan bahwa sistem mampu menyuplai energi listrik secara kontinu dan stabil. Hal ini menguatkan hasil penelitian Wedanta et al. (2021) yang menyatakan bahwa konfigurasi sudut blade dan kondisi debit sangat memengaruhi stabilitas dan efisiensi sistem.



4.2 Komparasi dengan Penelitian Sebelumnya

Penelitian ini memberikan pendekatan baru melalui penggunaan konfigurasi vertikal (90°) pada turbin *Archimedes Screw*, yang berbeda dari mayoritas penelitian sebelumnya yang mengkaji sudut kemiringan 32° – 47° . Penelitian oleh Situmorang (2022) menyimpulkan bahwa sudut kemiringan 47° memberikan efisiensi tertinggi hingga 37,5%, sedangkan penelitian ini menunjukkan bahwa konfigurasi vertikal juga memberikan performa yang layak dan efisien, khususnya dalam konteks keterbatasan ruang atau aliran air dengan head vertikal yang terbatas. Selain itu, integrasi sistem monitoring *real-time* berbasis ESP32 dan *Web Server* dalam mode *Access Point* menunjukkan nilai tambah dari sisi keterapan teknologi *Internet of Things* (IoT).

4.3 Implikasi dan Saran Pengembangan

Hasil penelitian ini memperkuat bahwa sistem PLTMH dengan turbin *Archimedes Screw* vertikal sangat potensial sebagai solusi pembangkit energi listrik di wilayah terpencil yang memiliki keterbatasan akses jaringan PLN. Desain yang sederhana, biaya instalasi yang relatif rendah, serta kemampuannya untuk beroperasi pada aliran air ber-head rendah menjadikan sistem ini layak diterapkan secara luas. Di samping itu, penggunaan sistem monitoring berbasis ESP32 dengan *Web Server* mode *Access Point* memungkinkan pengguna untuk memantau kondisi sistem secara *real-time*.

Namun, untuk meningkatkan performa dan efisiensi sistem, disarankan agar panjang ulir turbin *Archimedes Screw* ditingkatkan lebih dari 50 cm agar volume air yang mendorong bilah turbin bertambah, sehingga torsi dan putaran yang dihasilkan akan lebih besar dan berdampak langsung pada peningkatan daya listrik. Selain itu, penggunaan sensor arus seperti INA219 perlu dievaluasi kembali, terutama pada pengukuran arus dengan nilai rendah yang menunjukkan deviasi cukup tinggi. Pengembangan sistem monitoring juga dapat ditingkatkan dengan penambahan fitur penyimpanan data historis berbasis *SD card* atau koneksi ke platform cloud seperti *Firebase*, sehingga proses pemantauan dan evaluasi kinerja sistem dapat dilakukan secara berkelanjutan dan lebih komprehensif.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan, sistem PLTMH dengan turbin *Archimedes Screw* dalam posisi vertikal terbukti mampu mengubah energi potensial air menjadi energi mekanik, lalu dikonversi menjadi energi listrik secara efektif. Pengujian torsi dan RPM dengan alat DYN200 menunjukkan bahwa peningkatan debit air memberikan pengaruh langsung terhadap peningkatan putaran dan torsi turbin. Hal ini juga berdampak pada performa generator, yang menghasilkan daya listrik dengan tegangan stabil di kisaran 12 volt. Proses pengisian daya ke baterai



juga berjalan dengan baik dan efisien, terbukti dari daya rata-rata yang masuk sekitar 10,31 watt. Beban sistem menerima suplai daya secara konsisten dengan daya rata-rata 7,95 watt. Seluruh data listrik dimonitor melalui sensor INA219 dan ditampilkan secara lokal di LCD serta melalui *Web Server* menggunakan koneksi lokal *Access Point*. Dengan demikian, sistem ini tidak hanya mampu menghasilkan listrik dalam skala kecil, tapi juga sudah dilengkapi sistem monitoring *real-time* yang mendukung efisiensi dan keandalan. Sistem PLTMH ini sangat potensial untuk diterapkan di daerah yang memiliki akses terbatas terhadap jaringan listrik.

Berdasarkan pengamatan selama pengujian, salah satu faktor yang berpengaruh terhadap performa turbin adalah panjang ulir Archimedes Screw itu sendiri. Oleh karena itu, disarankan agar panjang turbin Archimedes Screw dibuat lebih dari 50 cm. Hal ini bertujuan agar volume air yang mendorong turbin semakin besar, sehingga menghasilkan torsi dan RPM yang lebih tinggi, yang pada akhirnya akan meningkatkan daya listrik yang dihasilkan oleh sistem secara keseluruhan. Pengembangan lebih lanjut pada desain mekanik turbin juga dapat dipertimbangkan agar sistem bekerja lebih optimal dalam berbagai kondisi debit air.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan ke hadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga karya ilmiah berjudul "*Rancang Bangun dan Uji Kinerja PLTMH dengan Turbin Archimedes Screw Vertikal pada Sumber Aliran Air Kanal*" ini dapat terselesaikan dengan baik. Terima kasih yang sebesar-besarnya saya sampaikan kepada ibu dan keluarga tercinta atas doa, dukungan, dan semangat yang tiada henti. Ucapan terima kasih juga saya tujukan kepada Bapak Rizki Nurilyas Ahmad, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing, atas waktu, bimbingan, dan arahan yang sangat berharga. Kepada Saudari Argita Dyah Arrum C, A.Md. Farm., saya ucapkan terima kasih atas dukungan, motivasi, dan perhatian yang terus menguatkan selama proses ini. Penghargaan khusus juga saya berikan kepada rekan-rekan seperjuangan: Farid Ahmad Fauzan, Muhammad Abdurrohman, Dzaky Novika Ramadhan, Muhammad Afin, Naufal Gian Syafi, Mohammad Addo Putranto, Hasby Asshodiq, Muhammad Idhan Arkhan, Khitananda Timor, Roma Febrian, Soraya Komala Firdaus, dan Nur Fatkhiyaturrosidah, atas kebersamaan, semangat, serta bantuan yang telah membuat perjalanan ini lebih bermakna. Saya juga menyampaikan terima kasih kepada Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta atas fasilitas dan lingkungan yang mendukung, serta para asisten laboratorium angkatan 2020, 2021, dan 2022 yang telah berbagi ilmu dan pengalaman. Semoga segala bentuk bantuan, dukungan, dan kebaikan yang diberikan menjadi amal jariyah dan mendapat balasan terbaik dari Allah SWT.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. E. Setyono and B. F. T. Kiono, "Dari Energi Fosil Menuju Energi Terbarukan: Potret Kondisi Minyak dan Gas Bumi Indonesia Tahun 2020 – 2050," *J. Energi Baru Dan Terbarukan*, vol. 2, no. 3, pp. 154–162, 2021, doi: 10.14710/jebt.2021.11157.
- [2] L. Tria Melati, I. Supriyadi, and Y. Ali, "Strategi Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Air Mini/Mikro Hidro di Indonesia," *G-Tech: J. Teknol. Terapan*, vol. 6, no. 2, pp. 91–99, 2022, doi: 10.33379/gtech.v6i2.1319.
- [3] W. A. Wijaya and L. Jasa, "Dan Variasi Sudut Blade Turbin," *J. Spektrum*, vol. 8, no. 1, pp. 73–84, 2021.
- [4] D. S. Wibawa and A. Lutfy, "Studi Perencanaan Turbin Air PLTMH di Sungai Cilaki," *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin*, vol. 10, Nov. 2020.
- [5] A. Ardiyatmoko, "Desain Generator Magnet Permanen Kecepatan Rendah Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Angin Atau Bayu (PLTB)," *Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi (SNATI)*, pp. 15–16, 2021.
- [6] E. Erinofardi, R. Koirala, N. Shiwakoti, and A. Date, "Sustainable Power Generation Using Archimedean Screw Turbine: Influence of Blade Number on Flow and Performance," *Sustainability*, vol. 14, no. 23, pp. 1–25, 2022, doi: 10.3390/su142315948.
- [7] M. A. Karim, J. Sumarjo, and N. Fauji, "Perancangan Pembangkit Listrik Piko hidro Dengan Tipe Turbin Screw," *J. Tek. Mesin*, vol. 14, no. 2, pp. 99–105, 2021, doi: 10.30630/jtm.14.2.666.
- [8] M. J. Situmorang, *Analisis Kinerja Turbin Ulir Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro Dengan Variasi Sudut Kemiringan Poros*, Skripsi, Universitas (tidak disebutkan), 2022.
- [9] I. P. W. I. Wedanta, W. A. Arta Wijaya, and L. Jasa, "Analisa Pengaruh Kemiringan Head Dan Variasi Sudut Blade Turbin Ulir Terhadap Kinerja PLTMH," *J. Spektrum*, vol. 8, no. 1, pp. 73–84, 2021, doi: 10.24843/spektrum.2021.v08.i01.p9.
- [10] A. I. Weking and Y. P. Sudarmojo, "Prototype Design of Micro Hydro Using Turbine Archimedes Screw for Simulation of Hidropower Practical of Electro Engineering Students," *J. Electr., Electron. and Informatics*, vol. 3, no. 1, p. 6, 2019, doi: 10.24843/jeei.2019.v03.i01.p02.

