



Rancang Bangun dan Uji Kinerja PLTMH dengan Turbin Sumbu Vertikal dengan *Adaptive Blade* pada Sumber Aliran Air Kanal

Soraya Komala Firdaus¹, Rizki Nurilyas Ahmad¹, Hasyim Asyari¹, Tindyo Prasetyo¹

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

 Email korespondensi: sorayakomala@gmail.com

Abstrak. Pemanfaatan sumber energi alternatif yang berasal dari potensi energi kinetik air melalui sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) selaras dengan peningkatan kebutuhan listrik masa kini. Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji kinerja turbin vertikal dengan *adaptive blade* yang dapat memanfaatkan aliran air *zero head* dengan debit aliran rendah. Energi kinetik aliran air akan dimanfaatkan menjadi energi mekanik yang memutar turbin, kemudian dikonversi menjadi energi listrik oleh generator DC. Penelitian berfokus pada kinerja turbin vertikal dengan *free-swing blade* guna mengetahui daya, torsi, rpm, serta efisiensi. Penelitian ini dilakukan dengan perbandingan berupa turbin vertikal *locked blade* untuk mengetahui turbin mana yang lebih baik. Pengujian dilakukan dengan penambahan alat berupa *Dynamic Torque Meter* (DYN200) guna mengetahui kecepatan putar dan torsi turbin. Sistem ini dilengkapi sensor INA219 yang digunakan untuk mengetahui tegangan dan arus yang terukur. Sistem ini dapat dipantau secara *real-time* melalui *Web Server* yang dapat dijangkau pengguna melalui *Access Point* dari ESP32. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, turbin *free-swing blade* unggul secara mekanikal dengan rata – rata torsi mencapai 0,737 Nm dan kecepatan putar turbin sebesar 25,12 rpm pada debit air rendah. Sedangkan secara elektrik, hasil turbin *locked blade* lebih unggul dalam menghasilkan daya listrik dengan rata – rata tegangan berasal dari generator sebesar 12,44 V, daya pengujian baterai sebesar 7,88 W, dan daya beban sebesar 0,526 W. Hal ini dikarenakan kemampuan generator yang digunakan telah mengalami penurunan. PLTMH dengan turbin sumbu vertikal dengan *free-swing blade* mampu beradaptasi pada debit air rendah dengan hasil torsi dan RPM yang lebih besar dibanding dengan turbin *locked blade*. Namun perlu adanya pemilihan generator yang tepat untuk memaksimalkan daya listrik untuk mendapatkan hasil yang lebih optimal.

Kata kunci: *Adaptive Blade; Dynamic Torque Meter (DYN200); PLTMH; Sensor INA219; Turbin Vertikal*



PENDAHULUAN

Konsumsi energi listrik terus mengalami peningkatan seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk dan pertumbuhan ekonomi. Konsumsi energi listrik yang diprediksi mengalami peningkatan setiap tahun memerlukan pasokan energi yang seimbang. Namun dalam penyediaan permintaan terhadap energi listrik ini menghadapi tantangan yakni ketergantungan pada energi tak terbarukan yang turut menjadi penyebab terjadinya pemanasan global. Upaya yang dilakukan untuk mengurangi ketergantungan energi fosil yakni dengan cara pemanfaatan energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan. Potensi energi terbarukan yang dimiliki oleh Indonesia sangatlah besar. Namun dalam kenyataannya potensi ini belum didayagunakan secara maksimal. Potensi energi air dapat dimanfaatkan untuk pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) guna memenuhi kebutuhan energi listrik. PLTMH menjadi alternatif untuk mendistribusikan listrik karena biaya yang rendah, mudah dalam pengoperasiannya, dan ramah lingkungan [1]. PLTMH memanfaatkan energi kinetik air yang diubah menjadi energi mekanik turbin kemudian menghasilkan energi listrik melalui generator. Tiga bagian utama dari PLTMH adalah generator, turbin, dan air sumber energi [2]. Aliran air dengan debit kecil seperti aliran irigasi, kanal, maupun sungai dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin kinetik. Sejumlah parameter, seperti kecepatan aliran air, jumlah dan bentuk sudu turbin, tentunya berdampak terhadap pergerakan turbin. Aliran air sangat berkaitan dengan bagaimana turbin dapat bekerja. Aliran air yang tepat mengenai sudu turbin akan meningkatkan energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin. Oleh karenanya, diperlukan perancangan bentuk turbin untuk memudahkan turbin menerima aliran air dengan tepat.

Turbin kinetik merupakan jenis turbin yang memanfaatkan energi kinetik dari aliran air kemudian mengubahnya menjadi energi mekanik berupa putaran poros. Energi mekanik inilah yang menggerakkan generator dan mengkonversinya menjadi energi listrik [3]. Tinggi jatuh (*head*) tidak diperlukan dalam turbin kinetik karena turbin ini digerakkan oleh kecepatan air. Bagian utama dari turbin kinetik dibedakan menjadi dua yakni *runner*, meliputi poros turbin, cakram turbin, dan sudu turbin, dan pengarah aliran masuk turbin [4]. Sudu yang mengelilingi *runner* dengan jumlah yang semakin banyak berpengaruh pada semakin tingginya putaran generator. Daya turbin kinetik akan meningkat sebanding dengan putaran turbin dan aliran air. Semakin lebar sudu turbin, massa aliran yang menghantam sudu turbin akan semakin banyak sehingga terjadi peningkatan gaya tangensial, yang pada gilirannya memengaruhi torsi dan daya turbin kinetik [5].

Pada penelitian ini berfokus pada kinerja turbin dengan sumbu vertikal dengan *adaptive blade*. Penggunaan turbin dengan sumbu vertikal dinilai lebih mudah dalam



pemasangannya. *Adaptive blade* yang dimaksud ialah penggunaan turbin *free-swing blade* yakni penambahan engsel yang terpasang pada bilah turbin dengan harapan turbin lebih mudah beradaptasi dengan berbagai kondisi aliran air. Sistem ini dirancang untuk mengevaluasi parameter keluaran berupa tegangan dan arus yang akan terbaca melalui sensor, juga mengetahui RPM dan torsi keluaran yang terukur oleh *Dynamic Torque Meter*.

METODE

2.1 Studi Literatur

Penelitian diawali dengan studi literatur yang melibatkan pengumpulan informasi dari berbagai sumber yang berkaitan dengan topik penelitian tugas akhir. Penelitian ini membahas mengenai pengaruh pemasangan turbin sumbu vertikal dengan *adaptive blade* terhadap kinerja sistem. Pada tahapan ini, pengumpulan informasi kinerja turbin *locked blade* juga diperlukan sebagai pembandingan kinerja turbin *free-swing blade*. Penggunaan jumlah *blade* dan ukuran yang digunakan juga berpengaruh pada pemanfaatan aliran air kanal. Energi kinetik aliran air kanal yang dimanfaatkan sebagai energi mekanik turbin akan dikonversi menjadi listrik oleh generator DC. Keluaran dari sistem ini berupa tegangan, arus, daya, torsi dan RPM yang dapat dipantau secara *real time* dengan penggunaan *Web Server*.

2.1.1 Penelitian Terdahulu

Daya yang dihasilkan oleh turbin sumbu vertikal dan horizontal memiliki selisih perbedaan $\pm 0,1$ watt dengan sumbu horizontal yang lebih unggul [3]. Namun penggunaan turbin dengan sumbu vertikal dipilih agar pemasangan generator lebih mudah. Selain instalasi yang mudah dan sederhana, turbin dengan sumbu vertikal tidak memerlukan *head*. Aliran air dengan kecepatan yang cenderung rendah dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin dengan sumbu vertikal. Energi kinetik aliran yang diterima turbin dengan sumbu vertikal diubah menjadi kecepatan putar tanpa membutuhkan tekanan yang besar. Lebar sudu dengan ukuran 12 cm lebih unggul jika dibandingkan dengan lebar 10 cm dan 11 cm. Hal ini disebabkan oleh lebar sudu yang semakin besar akan memperoleh massa aliran yang lebih besar sehingga daya yang dihasilkan semakin besar pula [5].

Gerakan turbin paling lemah terjadi saat aliran air hanya mengenai satu sudu saja. Tidak akan terjadi efek apapun jika aliran air langsung meninggalkan runner. Dibandingkan dengan penggunaan *adaptive blade*, turbin akan beradaptasi dengan aliran air sehingga aliran air yang tidak memasuki sudu sebelumnya akan masuk ke sudu berikutnya. Energi mekanik akan dihasilkan dari pergerakan turbin dan terjadi peningkatan kinerja kinetik turbin [6].



Daya turbin akan meningkat seiring dengan peningkatan jumlah sudu turbin. Namun ruang yang semakin sempit diantara sudu turbin berengsel akan membatasi pergerakannya sehingga mencegah aliran air memutar sudu turbin ke potensi maksimumnya. Daya turbin optimal pada turbin kinetik sumbu vertikal dengan sudu berengsel luar terdapat pada jumlah sudu 10 jika dibandingkan dengan jumlah sudu 6,8, dan 12 [7]. Daya putaran poros turbin sebanding dengan daya keluaran generator, yang berarti semakin tinggi kecepatan aliran air, semakin cepat turbin berputar. Daya dan efisiensi turbin meningkat seiring dengan peningkatan beban dan kapasitas aliran air. Akan tetapi, pemberian beban yang berlebih menyebabkan putaran turbin berhenti sehingga tidak ada efisiensi dan daya output yang dihasilkan [8].

2.2 Observasi Tempat Pengujian

Observasi dilakukan di saluran kanal Dusun II, Wadung Getas, Kecamatan Wonosari, Kabupaten Klaten guna memastikan lokasi tersebut dapat dimanfaatkan aliran airnya sebagai sumber energi mekanik. Peninjauan difokuskan pada kondisi kanal, debit air, dan ketinggian air yang berperan penting sebagai penunjang kinerja turbin. Observasi diperlukan untuk mengetahui potensi pemasangan turbin.



Gambar 1. Tempat Pengujian

2.3 Data Awal Debit Air

Tahapan penting sebelum melakukan perancangan sistem yakni perlu melakukan pengukuran debit air. Debit air merupakan banyaknya volume air yang mengalir per satuan waktu yang akan mempengaruhi besarnya daya kinetik air. Data debit air diperoleh dengan menggunakan Persamaan (1) [9].

$$Q = A \times V \quad (1)$$



Di mana :

Q = debit (m^3/s)

A = luas penampang (m^2)

V = Kecepatan air (m/s)

Peningkatan debit air akan memperbesar daya kinetik air yang mampu dihasilkan oleh aliran air [3]. Daya kinetik air didapatkan melalui Persamaan (2).

$$P = 0,5 \times Q \times V^2 \times \rho_a \quad (2)$$

Di mana :

0,5 = konstanta

P = daya air (Watt)

Q = debit (m^3/s)

V = kecepatan air (m/s)

ρ_a = massa jenis air (kg/m^3)

Tabel 1. Data Debit Air

No	Debit Air (m^3/s)
1	0,08
2	0,09
3	0,09
4	0,10
5	0,10
Rata - rata	0,09

Debit air pada Tabel 1 diperoleh dengan menggunakan metode apung. Metode apung dilakukan dengan menghanyutkan suatu benda ringan pada aliran air guna mengetahui kecepatan alir. Benda dihanyutkan pada suatu titik hingga titik tertentu kemudian mencatat berapa lama benda tersebut mampu mencapai batas titik akhir [10].

2.4 Pangujian Awal Generator

2.4.1 Generator Tanpa Beban

Tabel 2. Data Pengujian Generator Tanpa Beban

No	N	Kecepatan Putar (RPM)	Tegangan (VDC)
1	125,9		6,26
2	325		11,4
3	501,5		20,6
4	776,1		44,6
5	1014		63,2
6	1562		90,2
7	1803		104,2
8	2013		124,2
9	2487		153,9



Pengujian generator tanpa beban dilakukan guna mengetahui tegangan keluaran generator pada kecepatan tertentu tanpa adanya pembebanan. Tegangan yang dihasilkan merupakan tegangan induksi akibat perubahan fluks magnetik. Tabel 2 menunjukkan peningkatan tegangan sebanding dengan peningkatan kecepatan putar rotor. Ketika generator diputar pada kecepatan 125,9 RPM menghasilkan tegangan sebesar 6,26 V. Seiring dengan peningkatan kecepatan putar, tegangan *output* yang dihasilkan mencapai 153,9 V pada kecepatan putar 2487 RPM. Kecepatan putar generator berpengaruh pada rasio pulley yang akan digunakan dengan persamaan (3).

$$\text{Rasio pulley} = \frac{\text{RPM turbin}}{\text{RPM generator}} \quad (3)$$

2.4.2 Generator dengan Beban 12V 12W

Tabel 3. Data Pengujian Generator dengan Beban 12V 12W

o	N n	Kecepatan Putar (RPM)	Tegangan (VDC)	Arus (Ampere)	Daya (Watt)
1		151,1	5,27	0,12	0,63
2		306	5,47	0,13	0,71
3		507,4	6,09	0,16	0,97
4		731,2	7,09	0,2	1,42
5		1037	7,11	0,3	2,13
6		1512	7,95	0,45	3,58
7		1819	8,18	0,55	4,50
8		2117	9,20	0,65	5,98
9		2446	12,81	0,83	10,63

Pengujian generator dengan beban bertujuan untuk mengetahui kemampuan generator dapat mempertahankan tegangan dan arus saat pemberian beban. Dalam kondisi berbeban, tegangan generator cenderung menurun jika dibandingkan dengan tegangan keluaran hasil pengujian generator tanpa beban. Berdasarkan data yang diperoleh, ketika generator dihubungkan ke beban lampu 12 V 12W dengan kecepatan putar generator sebesar 151,1 RPM akan menghasilkan tegangan 5,27 V dan arus 0,12 A. Seiring dengan peningkatan kecepatan putar generator, tegangan dan arus yang dihasilkan mengalami peningkatan. Namun tegangan maksimal yang didapatkan hanya berkisar 12,81 V dengan arus 0,83 A sehingga didapatkan daya 10,63 W pada kecepatan putar generator 2446 RPM. Hal ini dikarenakan generator memiliki titik jenuh yang mana ketika rotor diputar lebih cepat tidak akan menghasilkan penambahan tegangan keluaran.

2.5 Perancangan Sistem PLTMH

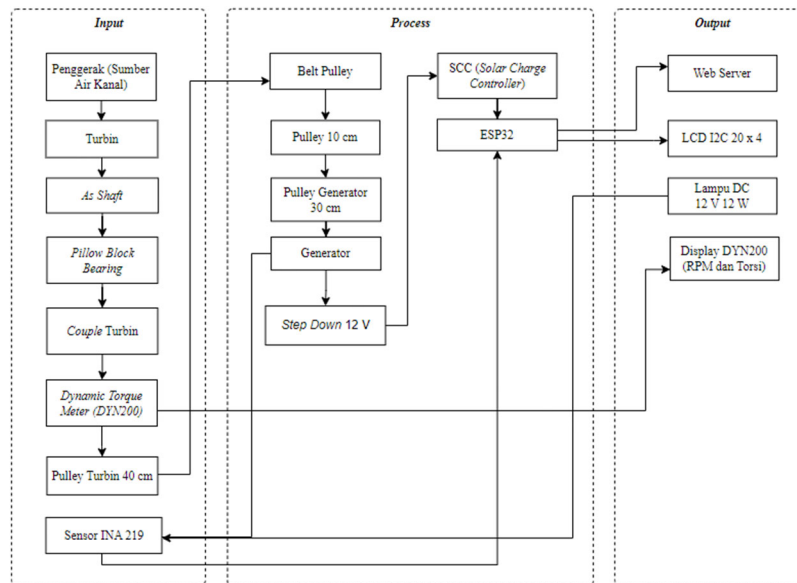
Perancangan sistem PLTMH meliputi perancangan turbin dan perancangan elektronika untuk monitoring. Tahap awal perancangan sistem yakni berupa pembuatan



desain turbin dengan memperhatikan keadaan lokasi yang telah ditinjau sebelumnya. Desain turbin menjadi acuan dalam pemilihan bahan yang diperlukan untuk sistem ini. Komponen utama yang digunakan dalam sistem ini berupa turbin *free-swing* blade dan generator DC. Perancangan elektronika diperlukan untuk monitoring keluaran dari sistem ini yang berupa tegangan, arus, daya, torsi, dan kecepatan putar turbin. Perancangan sistem memastikan tiap – tiap komponen dapat bekerja sesuai dengan fungsinya.

2.5.1 Diagram Blok Sistem

Diagram blok sistem menjelaskan alur konversi energi kinetik aliran air yang dimanfaatkan sebagai sumber energi mekanik oleh turbin hingga pembangkitan listrik oleh generator DC. Energi mekanik dari bilah turbin akan diteruskan oleh *as shaft* melalui couple turbin ke *Dynamic Torque Meter* (DYN200) hingga menampilkan data torsi dan RPM. Melalui *couple* turbin ini, kemudian diteruskan ke pulley berukuran 40 cm yang terhubung dengan *belt* ke pulley lain yang berukuran lebih kecil. Listrik yang dihasilkan dari generator dialirkan melalui *Solar Charge Controller* (SCC) ke baterai dan beban. Pengamatan hasil sensor INA219 berupa tegangan, arus, dan daya akan tertampil pada LCD I2C4 dan *Web Server*.

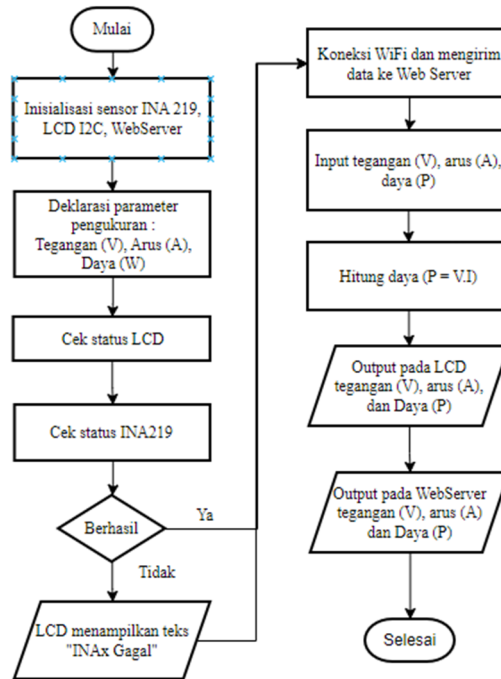


Gambar 2. Diagram Blok Sistem

Flowchart pada gambar 3 menampilkan alur kerja monitoring PLTMH yang diawali dengan inisialisasi 3 sensor INA219, komunikasi I2C, dan pembuatan WiFi access point ESP32 dan server lokal berbasis *Web Server*. Apabila terjadi kegagalan dalam inisialisasi sensor maka program akan terhenti dan menampilkan “INAx Gagal” pada LCD. Sensor INA219 akan membaca parameter tegangan dan arus yang terdeteksi lalu mengolahnnya dengan rumus daya $P = V \times I$. Hasil sensor INA219 berupa tegangan, arus, dan daya akan tertampil pada LCD I2C 20 x 4 dengan selang waktu 5 detik. Parameter hasil juga



ditampilkan dalam halaman *Web Server* yang dapat dijangkau dengan menghubungkan perangkat pengguna ke WiFi access point. Pembaruan tampilan *Web Server* terjadi dengan selang waktu 1 detik dan apabila terjadi kegagalan koneksi maka halaman web tidak dapat diakses oleh pengguna.



Gambar 3. Flowchart/Diagram Alir Program

2.5.2 Perancangan Hardware

a) Alat dan Bahan

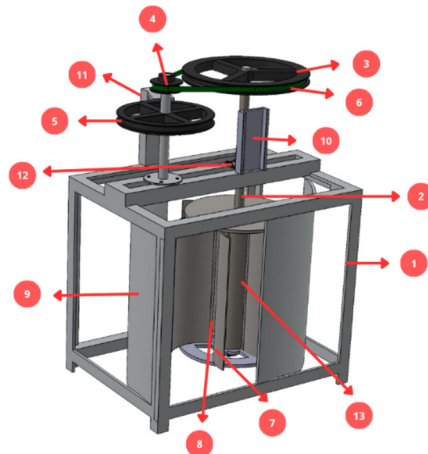
Tabel 4. Perancangan Hardware

Alat	Jumlah
Generator DC 30 W	1
Solar Charge Controller (SCC)	1
MCB DC 3A	3
LCD I2C 20 x 4	1
Sensor INA219	3
ESP32 WROOM32	1
Step Down 12 V	1
Boost Converter MT3608	1
Kabel USB	1
PCB Cetak	1
PCB Lubang	1
Panel Box	1



Kabel NYAF 1.5 mm ²	Secukupnya
<i>Dynamic Torque Meter (DYN200)</i>	1
<i>As Shaft</i>	1
Plat Besi	Secukupnya
Pipa Besi 4"	4
Pipa Besi 3"	1
Besi Beton 8 mm	Secukupnya
Pulley 40 cm	1
Pulley 10 cm	1
Pulley 30 cm	1
<i>Belt</i>	1
<i>Pillow Block Bearing</i>	2
Coupling DYN200	1

b) Perancangan Desain Hardware



Gambar 4.Perancangan Desain Hardware

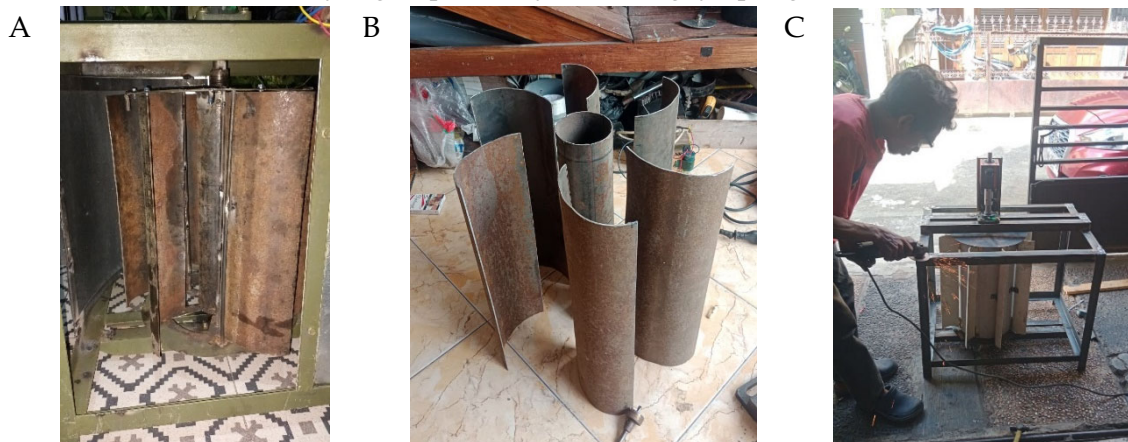
Keterangan :

- 1) Kerangka Turbin
- 2) *As Shaft*
- 3) Pulley 40 cm
- 4) Pulley 10 cm
- 5) Pulley 30 cm
- 6) *Belt*
- 7) *Blade*
- 8) Besi beton 8 mm
- 9) Penutup samping



- 10) Dudukan DYN200
 - 11) Dudukan Generator
 - 12) *Pillow Block Bearing*
- c) Perancangan Mekanik

Perancangan mekanik didasarkan pada desain hardware yang telah dibuat untuk memastikan sistem dapat bekerja dengan optimal. Proses ini dilakukan mulai dari pemilihan bahan hingga perakitan turbin. Pipa besi dengan ukuran 3" digunakan sebagai *inner* turbin. Pipa besi ukuran 4" digunakan sebagai blade dengan memotong pipa menjadi 2 bagian dengan tinggi sebesar 45 cm dan berjumlah 6 buah bilah. Pipa besi ini kemudian diperlebar mencapai 15 cm untuk meningkatkan cakupan air yang melewati turbin. Plat besi dan *pillow block bearing* ditempatkan pada bagian atas dan bawah untuk menopang poros turbin agar tetap berada pada posisi sejajar. Plat besi bagian bawah dibuat berlubang dengan tujuan agar air yang mengalir menuju *inner* dapat dialirkan ke bawah turbin guna memperbesar torsi. DYN200 dihubungkan pada poros turbin dengan bantuan coupling, sedangkan generator ditempatkan tepat di atas pulley berukuran 30 cm. Rangka diberi tambahan penutup samping dan depan yang difungsikan untuk meminimalisir aliran air yang dapat menyebabkan gaya pengereman turbin.



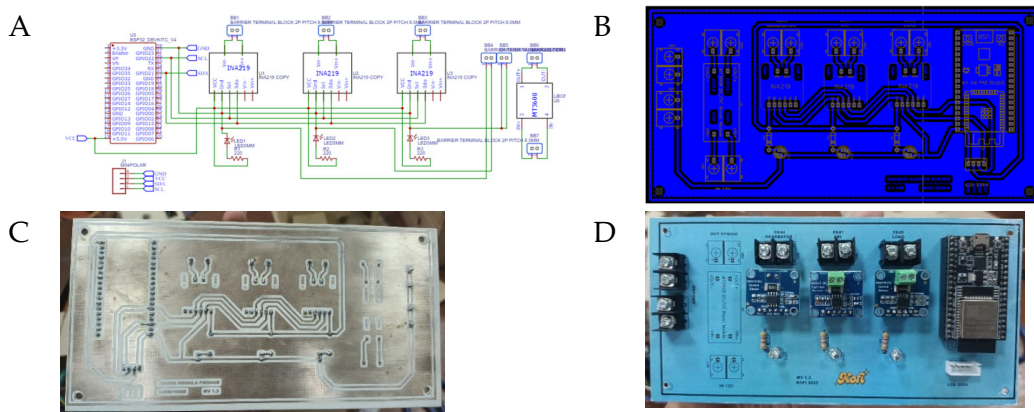
Gambar 5. Perancangan Mekanik. (A) *Blade* Turbin Tampak Depan, (B) Pembuatan *Blade* Turbin, dan (C) Pemasangan Turbin.

- d) Perancangan Sistem Elektrikal

Perancangan sistem elektrikal dimulai dengan pemilihan komponen yang akan digunakan untuk monitoring. Komponen utama pada sistem ini berupa ESP32 dan INA219 yang digunakan sebagai pembaca nilai tegangan dan arus. Penyusunan rangkaian skematik dan layout PCB menggunakan software EasyEDA dengan menghubungkan komponen ESP32 ke sensor INA219, terminal kf45, konektor moxer, resistor, dan LED. Proses pencetakan PCB dilakukan setelah tahap desain layout selesai yang disesuaikan dengan layout yang telah dirancang. Perancangan PCB dilakukan



dengan penempatan komponen dan jalur yang optimal sehingga tidak memerlukan tambahan jumper.

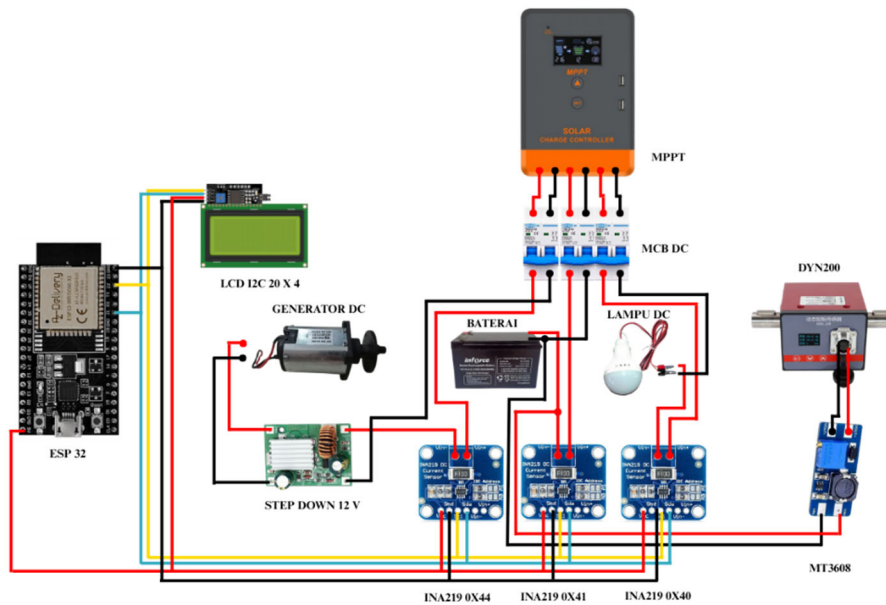


Gambar 6. Perancangan Elektrikal dan Pencetakan PCB. (A) Skematik Rangkaian Elektronika, (B) PCB Tampak Bawah, (C) Hasil Pembuatan PCB, dan (D) Perakitan Komponen.

e) Wiring System

Wiring sistem menunjukkan generator DC sebagai pembangkit listrik terhubung dengan *step down* 12 V. *Step down* 12 V digunakan sebagai penurun tegangan keluaran dari generator agar dapat digunakan dalam sistem. Pada sistem ini, terdapat penggunaan SCC yang berfungsi sebagai pengatur aliran listrik yang bersumber dari generator DC ke baterai dan beban. Masing – masing jalur positif dari generator, baterai, dan beban terhubung dengan sensor INA219 pada jalur VIN-. Sedangkan jalur VIN+ terhubung dengan MCB jalur positif. Terdapat tiga sensor INA219 yang menggunakan alamat berbeda – beda. INA219 dengan alamat 0x40 digunakan untuk monitoring tegangan, arus, dan daya dari beban. INA219 dengan alamat 0x41 digunakan untuk monitoring tegangan, arus, dan daya dari baterai. INA219 dengan alamat 0x44 digunakan untuk monitoring tegangan, arus, dan daya dari generator. Data yang diperoleh oleh sensor dikomunikasikan ke ESP32 melalui I2C yang juga terhubung dengan LCD I2C 20x4. Pada baterai terhubung juga dengan *boost converter* MT3608 untuk dinaikkan tegangannya menjadi 24 V yang kemudian digunakan sebagai masukan dari DYN200. Seluruh jalur ground pada sistem ini saling terhubung agar sistem dapat berjalan.





Gambar 7. Wiring Sistem

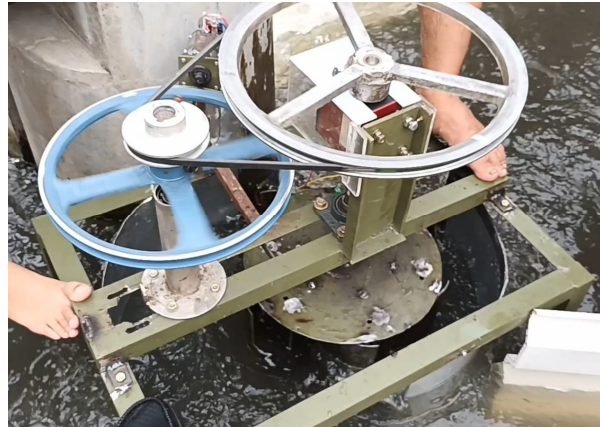
HASIL

3.1 Implementasi Hardware

Turbin yang telah selesai dirancang perlu diuji coba terlebih dahulu pada lokasi guna mengetahui apakah turbin mampu bekerja dengan optimal. Implementasi hardware dilakukan di saluran kanal Dusun II, Wadung Getas, Kecamatan Wonosari, Kabupaten Klaten. Tahap implementasi hardware dilakukan dengan tujuan mengetahui kecepatan putar turbin dan debit air saluran kanal yang digunakan sebagai acuan rasio ukuran pulley. Data ini akan dibandingkan dengan kemampuan generator untuk memastikan kesesuaian antara sistem mekanik dan sistem kelistrikan.



D



Gambar 8. Implementasi *Hardware*. (A) Pengujian Awal Kecepatan Putar Turbin, (B) *Hardware* Alat, (C) Panel Box Rangkaian Kontrol, dan (D) Pengujian Alat.

3.1.1 Pengujian Awal Turbin

Tabel 5. Data Pengujian Awal Turbin

No	Kecepatan Putar Locked Blade (RPM)	Kecepatan Putar Free-swing Blade (RPM)
1	26,7	65,6
2	41,3	63,8
3	33,1	72,4
4	45,7	54,6
5	44,3	69,7
Rata - rata	38,22	64,6

Tabel 5 menunjukkan hasil pengujian awal turbin dengan rata – rata debit air sebesar $0,09 \text{ m}^3/\text{s}$. Pada pengujian awal dilakukan pengukuran kecepatan putar turbin tanpa adanya pulley yang terpasang pada turbin. Pengujian pertama melakukan pengukuran kecepatan putar pada turbin *locked blade* dengan rata – rata sebesar 38,22 RPM. Sedangkan pada pengujian kedua, kecepatan putar turbin *free-swing blade* lebih besar jika dibandingkan dengan pengujian turbin *locked blade*. Rata – rata kecepatan putar turbin *free-swing blade* mencapai 64,6 RPM. Setelah mendapatkan data kecepatan putar turbin, kemudian hasil akan dibandingkan dengan kecepatan putar generator sesuai dengan persamaan (3).

3.2 Script Program

Program dirancang sebagai sistem monitoring keluaran dari PLTMH dengan menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terhubung dengan tiga sensor INA219, LCD I2C 20×4 , dan web server. Program dibuat pada *software* Arduino IDE dngan bantuan



library *Wire.h* untuk komunikasi I2C *Adafruit_INA219.h* untuk pembacaan nilai tegangan dan arus, *LiquidCrystal_I2C.h* untuk menampilkan data pada LCD. Sensor yang digunakan memiliki alamat yang berbeda – beda, yakni 0x40 untuk beban, 0x41 untuk baterai, dan 0x44 untuk generator. Rumus yang digunakan sensor untuk membaca nilai tegangan dan arus dikalibrasi terlebih dahulu guna meminimalisir kesalahan pembacaan data. Data yang terbaca akan dikirimkan ke *Web Server* melalui fungsi *handleRoot()*.

```

61 void loop() {
62   // ===== Update sensor
63   v1 = ina219_1.getBusVoltage_V();
64   i1 = fabs(ina219_1.getCurrent_mA()) / 1000.0;
65   p1 = v1 * i1;
66
67   v2 = ina219_2.getBusVoltage_V()*1.0049;
68   i2 = fabs(ina219_2.getCurrent_mA()) / 1000.0;
69   p2 = v2 * i2;
70
71   v3 = ina219_3.getBusVoltage_V()*1.0008;
72   i3 = fabs(ina219_3.getCurrent_mA()) /1000.0;
73   p3 = v3 * i3;
74   Serial.print("Raw Arus INA3: ");
75   Serial.println(i3, 3);
76
77   // ===== Update LCD
78   if (millis() - lastSwitchTime >= switchInterval) {
79     lastSwitchTime = millis();
80     lcd.clear();
81
82     if (showINR123 == 1) {
83       lcd.setCursor(0, 0); //baris 1
84       lcd.print("INA219 BEBAN");
85       lcd.setCursor(0, 1); //baris 2
86       lcd.print("TEGANGAN :"); lcd.print(v1, 2); lcd.print(" V");
87       lcd.setCursor(0, 2); //baris 3
88       lcd.print("ARUS      :"); lcd.print(i1, 3); lcd.print(" A");
89       lcd.setCursor(0, 3); //baris 4
90       lcd.print("DAYA      :"); lcd.print(p1, 2); lcd.print(" W");}
91   else if (showINR123 == 2){

```

Gambar 9. Script Program Perhitungan Tegangan, Arus, dan Daya

3.3 Tampilan Web Server

Sistem PLTMH yang telah dirancang dapat dimonitor melalui *Web Server* untuk menampilkan data tegangan, arus, dan daya secara real time tanpa harus bergantung pada *internet*. ESP32 diatur dalam mode *access point* sehingga pengguna dapat mengakses data melalui *browser* dengan alamat IP lokal yang tertampil pada *serial monitor*. Data yang ditampilkan akan diperbarui secara otomatis setiap 1 detik.



Gambar 10. Tampilan Web Server

3.4 Pengujian Nilai Sensor INA219

3.4.1 Generator

Tabel 6. Pengujian Nilai Tegangan Sensor INA219 pada Generator terhadap Nilai Tegangan Multimeter

Uji ke -	RPM	Tegangan Multimeter (VDC)	Tegangan Sensor (VDC)	Persentase Error (%)
1	1352	12,18 V	12,15 V	0,246 %
2	1320	12,01 V	12,12 V	0,916 %
3	1280	12,09 V	12,09 V	0,000 %
4	1275	12,05 V	12,08 V	0,249 %
5	1265	12,10 V	12,07 V	0,248 %
Rata – rata		12,09 V	12,10 V	
Rata – rata Error (%)			0,332 %	
Akurasi (%)			99,67 %	

Pengujian akurasi sensor dilakukan dengan membandingkan data yang terbaca pada multimeter dan sensor. Pengujian akurasi dilakukan dengan mengambil 5 data dengan rata – rata tegangan pada multimeter yang terbaca 12,09 V. Sedangkan tegangan yang terbaca pada sensor INA219 12,10 V. Berdasarkan nilai tersebut, dapat diamati bahwa nilai yang terbaca antara multimeter dengan sensor memiliki persentase *error* yang sangat kecil dengan tingkat akurasi sebesar 99,67%.

Tabel 7. Pengujian Nilai Arus Sensor INA219 pada Generator terhadap Nilai Arus *Clampmeter*

Uji ke -	RPM	Arus Clamp meter (A)	Arus Sensor (A)	Persentase Error (%)
1	1352	0,11 A	0,15 A	36,36%
2	1320	0,11 A	0,15 A	36,36%
3	1280	0,08 A	0,09 A	12,50%



4	1275	0,08 A	0,09 A	12,50%
5	1265	0,07 A	0,04 A	42,86%
Rata – rata		0,08 A	0,104 A	
Rata – rata <i>Error</i> (%)			28,12%	
Akurasi (%)			71,88%	

Pengujian akurasi sensor nilai arus menunjukkan bahwa nilai yang terbaca pada sensor INA219 lebih tinggi dibandingkan dengan yang terbaca pada *clamp* meter. Pada data uji pertama menunjukkan persentase *error* yang paling tinggi yakni mencapai 36,36%. Meski hanya memiliki selisih 0,04 A namun sensor INA219 memiliki keterbatasan akurasi dalam membaca arus kecil sehingga rata – rata persentase *error* sebesar 28,12%.

3.4.2 Baterai

Tabel 8. Pengujian Nilai Tegangan Sensor INA219 pada Baterai terhadap Nilai Tegangan Multimeter

Uji ke -	Tegangan Multimeter (VDC)	Tegangan Sensor (VDC)	Persentase <i>Error</i> (%)
1	12,42 V	12,42 A	0,00%
2	12,42 V	12,42 A	0,00%
3	12,41 V	12,42 A	0,08%
4	12,41 V	12,42 A	0,08%
5	12,41 V	12,42 A	0,08%
Rata – rata	12,414 V	12,42 A	
Rata – rata <i>Error</i> (%)		0,05%	
Akurasi (%)		99,95%	

Hasil pembacaan tegangan pada sensor mendekati nilai yang terbaca pada multimeter. Persentase *error* tertinggi hanya sebesar 0,08%. Sedangkan tingkat akurasi sensor mencapai 99,95%. Akurasi pembacaan sensor yang tinggi menunjukkan bahwa sensor layak digunakan untuk pengujian.

Tabel 9. Pengujian Nilai Arus Sensor INA219 pada Baterai terhadap Nilai Arus *Clampmeter*

Uji ke -	Arus Clamp Meter (A)	Arus Sensor (A)	Persentase <i>Error</i> (%)
----------	----------------------	-----------------	-----------------------------



1	0,55	0,564	2,55%
2	0,55	0,569	3,45%
3	0,56	0,572	2,14%
4	0,55	0,573	4,18%
5	0,56	0,566	1,07%
Rata – rata	0,554	0,5688	
Rata – rata <i>Error</i> (%)		2,67%	
Akurasi (%)		97,33%	

Berdasarkan pengujian yang dilakukan, terdapat perbedaan nilai yang paling tinggi sebesar 0,023 A dengan nilai yang terbaca pada sensor lebih tinggi dibanding dengan arus multimeter dengan rata – rata persentase *error* sebesar 2,67%. Dengan demikian, sensor mampu memberikan pembacaan arus dengan tingkat akurasi 97,33%.

3.4.3 Beban

Tabel 10. Pengujian Nilai Tegangan Sensor INA219 pada Beban terhadap Nilai Tegangan Multimeter

Uji ke -	Tegangan Multimeter (VDC)	Tegangan Sensor (VDC)	Persentase <i>Error</i> (%)
1	11,75	11,8	0,43%
2	11,75	11,8	0,43%
3	11,75	11,79	0,34%
4	11,75	11,79	0,34%
5	11,75	11,79	0,34%
Rata – rata	11,75	11,794	
Rata – rata <i>Error</i> (%)		0,37%	
Akurasi (%)		99,63%	

Pembacaan tegangan oleh sensor menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibanding nilai multimeter dengan persentase *error* sebesar 0,37%. Hasil pengujian menunjukkan tingkat akurasi sensor mencapai 99,63% dan layak digunakan untuk pengujian sistem.



Tabel 11. Pengujian Nilai Arus Sensor INA219 pada Beban terhadap Nilai Arus *Clampmeter*

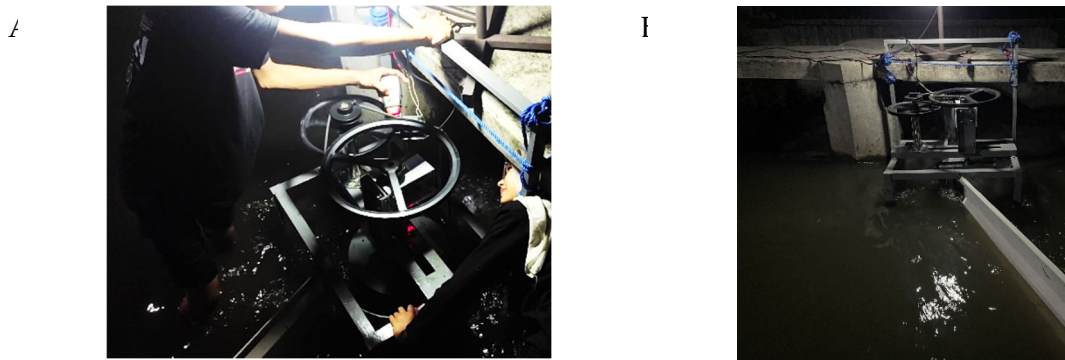
Uji ke -	Arus <i>Clamp</i> Multimeter (A)	Arus Sensor (A)	Persentase <i>Error</i> (%)
1	0,44	0,449	2,05%
2	0,45	0,45	0,00%
3	0,46	0,464	0,87%
4	0,45	0,463	2,89%
5	0,46	0,464	0,87%
Rata – rata	0,452	0,458	
Rata – rata <i>Error</i> (%)		1,33%	
Akurasi (%)		98,67%	

Nilai arus yang terbaca oleh sensor cukup konsisten dengan persentase *error* paling tinggi 2,89% dan rata –rata *error* sebesar 1,33%. Sensor memiliki tingkat akurasi sebesar 98,67% sehingga mampu memberikan pembacaan arus yang akurat.

3.5 Pengujian Sistem

Pengujian sistem PLTMH sumbu vertikal dengan *free-swing blade* bertujuan untuk mengevaluasi kinerja konversi energi kinetik menjadi energi mekanik lalu diubah menjadi energi listrik, serta mengetahui efisiensi sistem secara menyeluruh. Turbin *free-swing blade* dirancang agar mampu beradaptasi dengan berbagai kondisi aliran air. Pemasangan turbin *free-swing blade* memungkinkan bilah turbin bergerak menyesuaikan arah aliran air sehingga dapat meningkatkan torsi dan kecepatan putar turbin. Pada sistem ini, torsi dan kecepatan putar turbin dapat diamati melalui *dynamic torque meter* DYN200 yang terhubung langsung dengan poros turbin dengan bantuan *coupling*. Konversi energi mekanik turbin menjadi energi listrik dilakukan oleh generator DC. Energi listrik ini kemudian disalurkan ke sistem melalui *Solar Charge Controller* (SCC) yang digunakan sebagai pengatur daya listrik dari generator ke beban dan baterai. SCC mengatur agar tegangan dan arus tidak melebihi batas maksimal baterai dan menstabilkan tegangan output ke beban. Sistem ini menggunakan tiga sensor INA219 yang masing – masing terhubung dengan generator, baterai, dan beban sebagai pendeteksi nilai tegangan dan arus. Nilai tegangan dan arus yang terbaca akan ditampilkan pada LCD I2C 20x4. Selain itu, monitoring dapat dilakukan secara *real time* dengan mengakses *Web Server* melalui *access point* dari mikrokontroler ESP32.





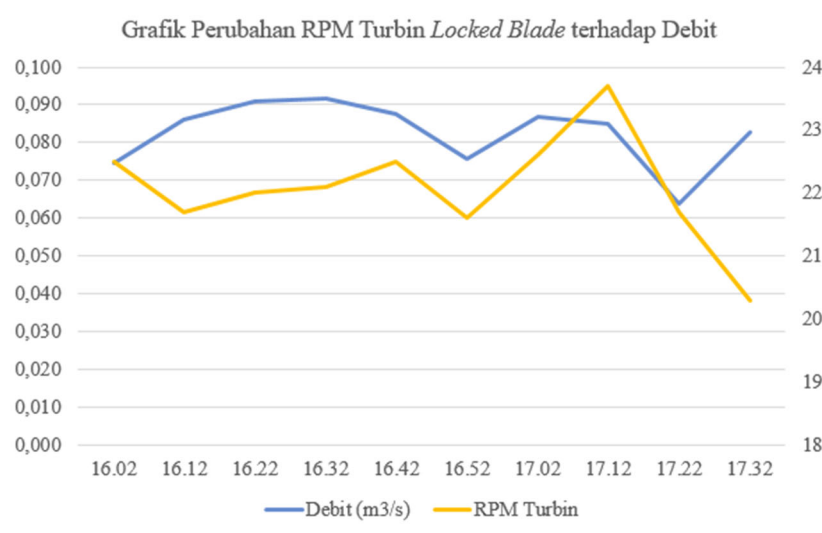
Gambar 11. Pengujian sistem di saluran kanal Dusun II, Wadung Getas, Kecamatan Wonosari, Kabupaten Klaten. (A) Pengambilan Data, dan (B) Penempatan *Hardware* pada Saluran Kanal.

3.5.1 Data Pengujian Turbin

Tabel 12. Pengujian Turbin *Locked Blade*

Jam	Debit (m ³ /s)	Torsi Turbin (Nm)	RPM Turbin	RPM Generator
16.02	0,075	0,388	22,5	1323
16.12	0,086	0,342	21,7	1341
16.22	0,091	0,789	22	1324
16.32	0,092	0,736	22,1	1289
16.42	0,088	0,547	22,5	1307
16.52	0,076	0,69	21,6	1218
17.02	0,087	0,561	22,6	1250
17.12	0,085	0,51	23,7	1314
17.22	0,064	0,638	21,7	1222
17.32	0,083	0,738	20,3	1326
Rata -rata	0,082	0,594	22,070	1291,4





Gambar 12. Grafik Perubahan RPM Turbin *Locked Blade* terhadap Debit

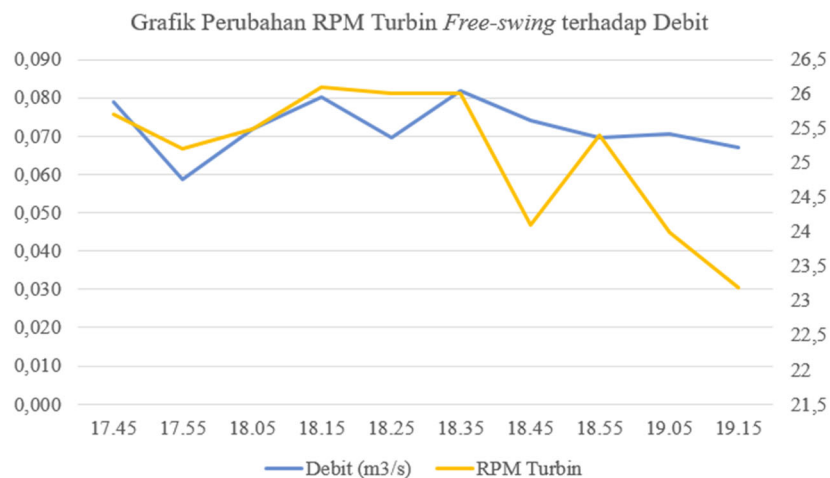
Pengujian turbin dilakukan dengan dua kondisi dengan kondisi pertama berupa *locked blade*. Berdasarkan pengujian didapatkan debit sungai yang cenderung stabil dengan rata – rata 0,107 m³/s yang kemudian mempengaruhi kecepatan putar turbin dengan rata – rata yang didapatkan 22,07 RPM. Kecepatan putar generator yang terhubung pada pulley dengan ukuran 30 cm memiliki rata – rata 1291,4 RPM dengan nilai tertinggi 1341 RPM. Meskipun debit air cenderung stabil, namun torsi turbin tampak fluktuatif antara 0,342 Nm hingga 0,789. Hal ini menunjukkan bahwa turbin *locked blade* tidak mampu beradaptasi dengan aliran air sehingga energi kinetik air tidak mampu dimanfaatkan secara konsisten. Alhasil, torsi dan kecepatan putar turbin yang dihasilkan menurun meski debit air lebih besar.

Tabel 13. Pengujian Turbin *Free-swing Blade*

Jam	Debit (m ³ /s)	Torsi Turbin (Nm)	RPM Turbin	RPM Generator
17.45	0,079	0,618	25,7	1400
17.55	0,059	0,735	25,2	1468
18.05	0,072	0,739	25,5	1438
18.15	0,080	0,797	26,1	1861



18.25	0,070	0,713	26	1848
18.35	0,082	0,72	26	1433
18.45	0,074	0,751	24,1	1477
18.55	0,070	0,777	25,4	1511
19.05	0,071	0,795	24	1475
19.15	0,067	0,722	23,2	1406
Rata - rata	0,072	0,737	25,120	1531,7



Gambar 13. Grafik Perubahan RPM Turbin *Free-swing Blade* terhadap Debit

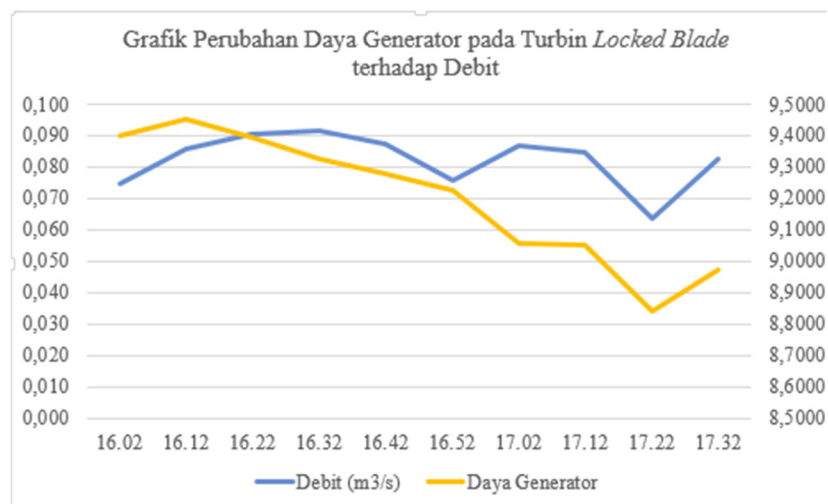
Pengujian turbin yang kedua menggunakan mode *free-swing* yang menunjukkan peningkatan performa pada seluruh parameter. Pada debit air yang cenderung lebih kecil dengan rata – rata 0,072 m³/s, kecepatan putar justru meningkat dibandingkan dengan turbin *locked blade*. Rata – rata kecepatan putar turbin sebesar 25,12 RPM yang mana lebih besar jika dibandingkan dengan data *locked blade*. Hal ini menunjukkan sistem tetap mampu menghasilkan torsi yang lebih tinggi pada debit air yang lebih rendah dan memiliki efisiensi yang lebih baik. Torsi turbin pada *free-swing blade* cenderung lebih stabil dan lebih tinggi dengan rata – rata 0,737 Nm. Kestabilan torsi menunjukkan bahwa *free-swing blade* mampu beradaptasi dengan aliran air dan memanfaatkan daya kinetik air dengan baik. Kecepatan putar generator tertinggi mencapai 1861 RPM dengan debit 0,10 m³/s. Hal ini menunjukkan peningkatan putaran turbin berdampak pada peningkatan putaran generator.

3.5.2 Data Pengujian Generator



Tabel 14. Pengujian Generator pada Turbin *Locked Blade*

Jam	Debit (m ³ /s)	RPM Generator	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
16.02	0,075	1323	12,50	0,752	9,4006
16.12	0,086	1341	12,49	0,757	9,4527
16.22	0,091	1324	12,47	0,754	9,3971
16.32	0,092	1289	12,46	0,749	9,3294
16.42	0,088	1307	12,45	0,746	9,2818
16.52	0,076	1218	12,43	0,742	9,2265
17.02	0,087	1250	12,42	0,730	9,0599
17.12	0,085	1314	12,41	0,730	9,0523
17.22	0,064	1222	12,39	0,714	8,8389
17.32	0,083	1326	12,36	0,726	8,9748
Rata - rata	0,082	1291,4	12,44	0,74	9,2014



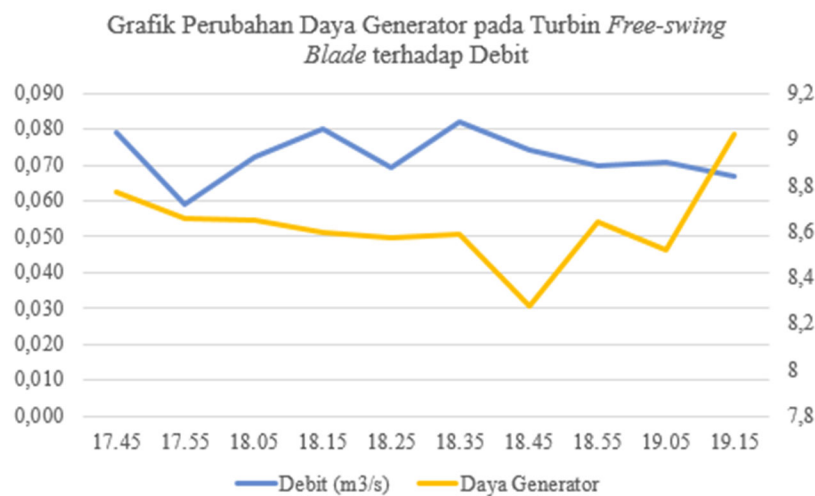
Gambar 14. Grafik Perubahan Daya Generator pada Turbin *Locked Blade* terhadap Debit. Pengujian sistem PLTMH dengan turbin *locked blade* menghasilkan tegangan yang stabil dengan rata-rata 12,44 V, arus 0,74 A, dan daya 9,2014 W. Dari data yang didapatkan menunjukkan bahwa generator tetap dapat mengkonversi energi mekanik yang dipengaruhi oleh kinetik air, ke energi listrik secara efektif. Namun daya generator mengalami penurunan meski terjadi kenaikan kecepatan putar turbin. Hal ini disebabkan



karena penurunan kemampuan generator yang digunakan. Penyebab utama dari penurunan kemampuan generator yakni melemahnya kondisi brush aus dan tegangan induksi yang dihasilkan berkurang. Generator kurang optimal menghasilkan tegangan sehingga tidak terjadi perubahan yang signifikan meski terjadi kenaikan RPM generator.

Tabel 15. Pengujian Generator pada Turbin *Free-swing Blade*

Jam	Debit (m ³ /s)	RPM Generator	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
17.45	0,079	1400	12,28	0,714	8,7748
17.55	0,059	1468	12,26	0,706	8,6606
18.05	0,072	1438	12,25	0,706	8,6533
18.15	0,080	1861	12,23	0,703	8,5989
18.25	0,070	1848	12,22	0,701	8,5718
18.35	0,082	1433	12,22	0,703	8,5916
18.45	0,074	1477	12,22	0,677	8,2749
18.55	0,070	1511	12,21	0,708	8,6426
19.05	0,071	1475	12,20	0,698	8,5177
19.15	0,067	1406	12,19	0,740	9,0239
Rata - rata	0,072	1531,7	12,23	0,71	8,6310



Gambar 15. Grafik Perubahan Daya Generator pada Turbin *Free-swing Blade* terhadap Debit



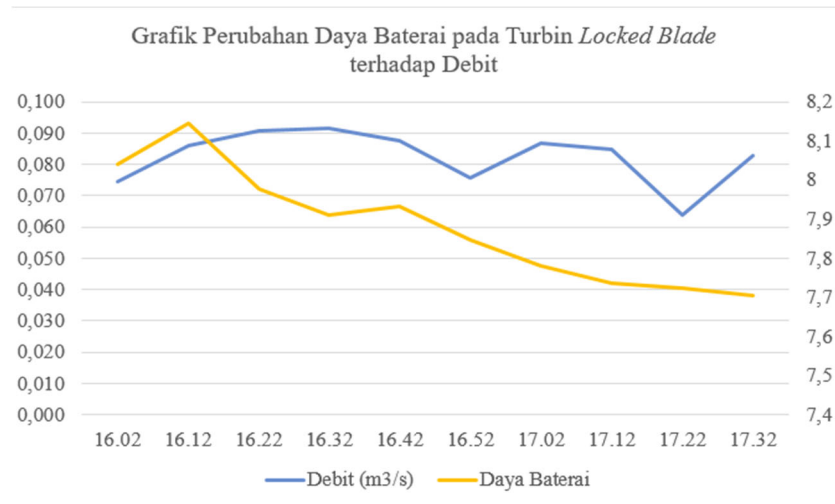
Pengujian sistem PLTMH dengan *free-swing blade* menunjukkan bahwa dengan debit air yang lebih rendah, kecepatan putar generator lebih tinggi. Namun rata – rata tegangan dan arus yang dihasilkan lebih rendah yakni 12,23 V dan 0,71 A. Pengujian yang dilakukan dalam jeda waktu 10 menit memberikan hasil tegangan generator tertinggi mencapai 12,28 V, arus 0,714 A, dan daya mencapai 8,7748 W. Hal ini disebabkan oleh kemampuan generator yang digunakan telah menurun akibat kondisi *brush* aus sehingga tegangan induksi pada pengujian *free-swing blade* lebih kecil meski terjadi peningkatan RPM generator. Meski torsi dan RPM turbin lebih baik namun karena keterbatasan kemampuan generator dalam mengkonversi energi menyebabkan daya yang dihasilkan tidak optimal

3.5.3 Data Pengujian Baterai

Tabel 16. Pengujian Baterai pada Turbin *Locked Blade*

Jam	Debit (m ³ /s)	RPM Generator	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
16.02	0,075	1323	12,37	0,65	8,0405
16.12	0,086	1341	12,34	0,66	8,1444
16.22	0,091	1324	12,33	0,647	7,9775
16.32	0,092	1289	12,32	0,642	7,9094
16.42	0,088	1307	12,3	0,645	7,9335
16.52	0,076	1218	12,28	0,639	7,8469
17.02	0,087	1250	12,27	0,634	7,7792
17.12	0,085	1314	12,26	0,631	7,7361
17.22	0,064	1222	12,24	0,631	7,7234
17.32	0,083	1326	12,23	0,63	7,7049
Rata - rata	0,082	1291,4	12,294	0,641	7,880





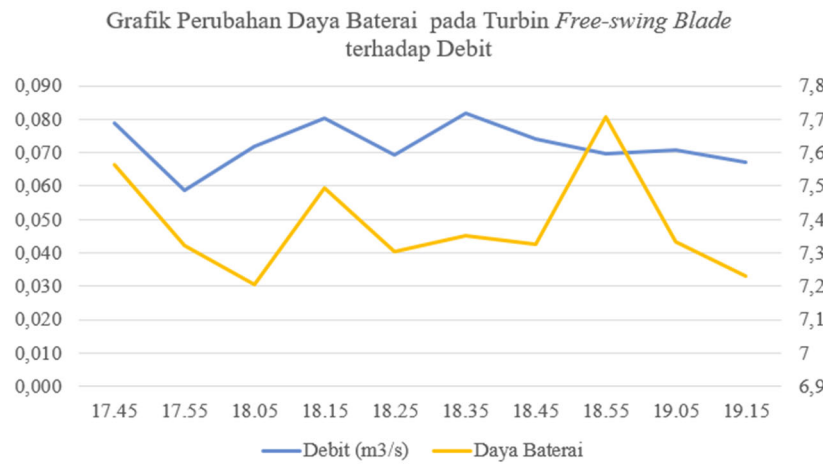
Gambar 16. Grafik Perubahan Daya Baterai pada Turbin *Locked Blade* terhadap Debit. Pengujian sistem PLTMH *locked blade* menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga kestabilan output daya listrik baterai. Rata – rata tegangan yang dihasilkan mencapai 12,294 V dan arus mencapai 0,641 A. Tegangan yang dihasilkan berada di atas tegangan nominal baterai sehingga dapat terjadi pengisian baterai. Arus yang konsisten menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan suplai arus yang cukup meskipun kecepatan putar generator menurun akibat debit air fluktuatif yang mempengaruhi putaran turbin.

Tabel 17. Pengujian Baterai pada Turbin *Free-swing Blade*

Jam	Debit (m³/s)	RPM Generator	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
17.45	0,079	1400	12,14	0,623	7,5632
17.55	0,059	1468	12,14	0,603	7,3204
18.05	0,072	1438	12,13	0,594	7,2052
18.15	0,080	1861	12,11	0,619	7,4961
18.25	0,070	1848	12,11	0,603	7,3023
18.35	0,082	1433	12,09	0,608	7,3507
18.45	0,074	1477	12,09	0,606	7,3265
18.55	0,070	1511	12,08	0,638	7,7070
19.05	0,071	1475	12,08	0,607	7,3326



19.15	0,067	1406	12,07	0,599	7,2299
Rata - rata	0,072	1531,7	12,104	0,61	7,383



Gambar 17. Grafik Perubahan Daya Baterai pada Turbin *Free-swing Blade* terhadap Debit

Pengujian sistem PLTMH *free-swing blade* menunjukkan hasil tegangan, arus, dan daya yang lebih rendah dibandingkan dengan *locked blade*. Rata – rata tegangan yang dihasilkan mencapai 12,104 V dan arus mencapai 0,61 A. Tegangan pada *free-swing blade* lebih rendah dibanding dengan *locked blade* menunjukkan bahwa tegangan pada baterai yang digunakan menurun pada saat pengisian menyebabkan arus yang masuk ke baterai juga lebih rendah. Hal ini disebabkan karena daya keluaran dari generator juga menurun sehingga pengisian baterai kurang efisien.

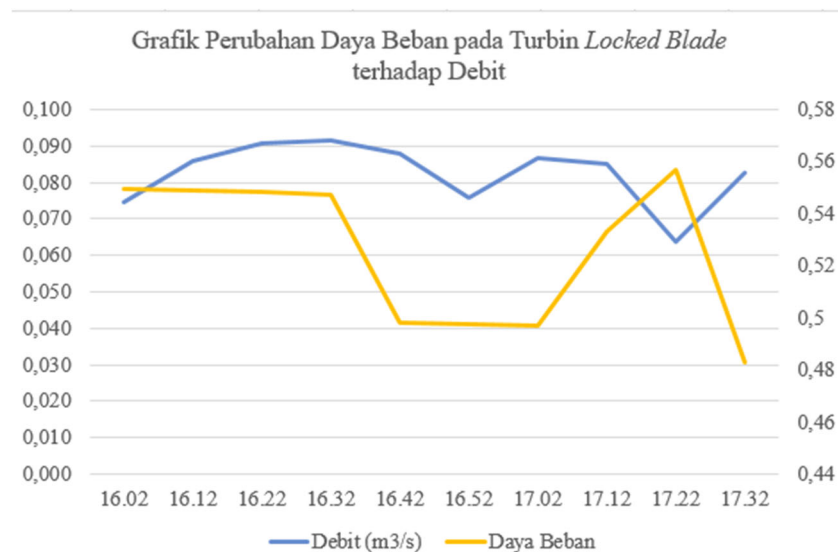
3.5.4 Data Pengujian Beban

Tabel 18. Pengujian Beban pada Turbin *Locked Blade*

Jam	Debit (m ³ /s)	RPM Generator	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
16.02	0,075	1323	12,21	0,045	0,5495
16.12	0,086	1341	12,20	0,045	0,5490
16.22	0,091	1324	12,18	0,045	0,5481
16.32	0,092	1289	12,16	0,045	0,5472
16.42	0,088	1307	12,15	0,041	0,4982
16.52	0,076	1218	12,13	0,041	0,4973



17.02	0,087	1250	12,12	0,041	0,4969
17.12	0,085	1314	12,12	0,044	0,5333
17.22	0,064	1222	12,10	0,046	0,5566
17.32	0,083	1326	12,07	0,040	0,4828
Rata - rata	0,082	1291,4	12,144	0,043	0,526



Gambar 18. Grafik Perubahan Daya Beban pada Turbin *Locked Blade* terhadap Debit

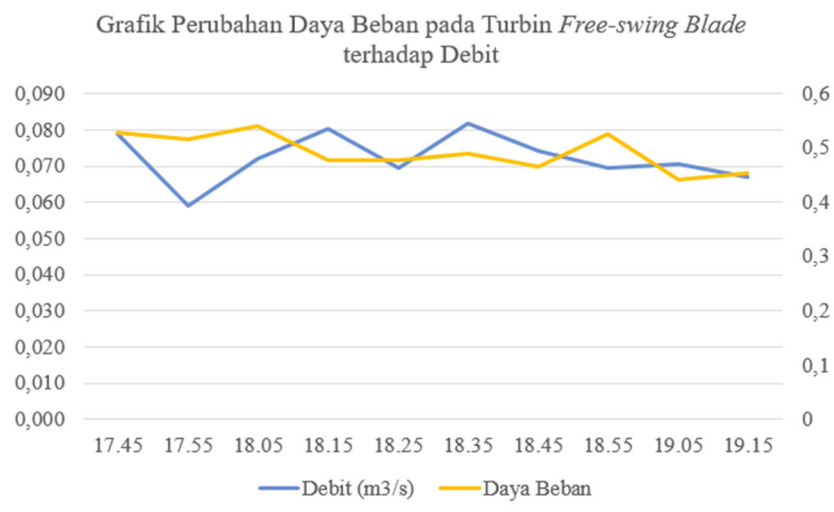
Pengujian PLTMH dengan *locked blade* menunjukkan hasil yang stabil dengan rata – rata tegangan yang didapatkan mencapai 12,144 V. Tegangan stabil di atas 12 V menunjukkan bahwa suplai tegangan dari baterai masih cukup dan turbin masih mampu mempertahankan putaran generator. Arus yang masuk ke beban memiliki rata – rata 0,043 A. Walaupun nilai arus yang dihasilkan kecil namun tetap dapat memberikan suplai listrik.

Tabel 19. Pengujian Beban pada Turbin Free-swing Blade

Jam	Debit (m ³ /s)	RPM Generator	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (W)
17.45	0,079	1400	11,99	0,044	0,5276
17.55	0,059	1468	11,99	0,043	0,5156
18.05	0,072	1438	11,98	0,045	0,5031



18.15	0,080	1861	11,96	0,04	0,4784
18.25	0,070	1848	11,95	0,04	0,4780
18.35	0,082	1433	11,95	0,041	0,49
18.45	0,074	1477	11,94	0,039	0,4657
18.55	0,070	1511	11,94	0,044	0,5254
19.05	0,071	1475	11,93	0,037	0,4414
19.15	0,067	1406	11,93	0,038	0,4533
Rata - rata	0,072	1531,7	11,959	0,041	0,492



Gambar 19. Grafik Perubahan Daya Beban pada Turbin *Free-swing Blade* terhadap Debit

Pengujian PLTMH dengan *free-swing blade* menunjukkan tegangan rata – rata yang dihasilkan lebih rendah dibanding tegangan pada *locked blade*. Rata – rata tegangan hanya 11,959 V yang berada pada ambang kritis baterai 12 V. Fluktuasi arus hampir sama dengan arus pada turbin *locked blade*. Penurunan tegangan dan arus menandakan sistem memiliki kestabilan yang cukup rendah dalam mempertahankan daya yang diterima oleh beban.

PEMBAHASAN

1. Akurasi Sistem Pengukuran

Pengujian PLTMH menggunakan sensor INA219 untuk memantau nilai tegangan dan arus, serta *Dynamic Torque Meter* (DYN200) untuk mengukur kecepatan putar turbin dan torsi. Proses kalibrasi dilakukan dengan membandingkan nilai yang terbaca pada



sensor INA219 dengan nilai yang terbaca pada multimeter. Hasil kalibrasi sensor menunjukkan sensor memiliki akurasi mencapai 99% yang menandakan bahwa sensor layak digunakan. Persentase *error* terbesar mencapai 28% pada kalibrasi arus generator karena sensor INA219 memiliki keterbatasan akurasi dalam membaca arus kecil.

2. Penerapan Monitoring *Real-Time* Berbasis *Web Server*

Sistem PLTMH yang dibuat memanfaatkan ESP32 sebagai pusat komunikasi. Monitoring dapat dilakukan secara *real-time* melalui *Web Server* yang dapat dijangkau oleh pengguna melalui fitur *Access Point* dari ESP32. Parameter yang ditampilkan pada *Web Server* berupa tegangan, arus, dan daya dari generator, baterai, dan beban. Pengguna dapat dengan mudah memantau keluaran sistem dengan mudah dalam jarak jauh.

3. Analisis Kinerja Mekanikal Turbin *Free-swing Blade*

Putaran turbin *free-swing blade* menyesuaikan dengan arah datangnya aliran air sehingga air tidak hanya tertahan pada satu bilah saja yang akan menyebabkan gaya pengereman pada bilah lain. Turbin dirancang dengan penambahan penutup pada setengah rangka depan dan rangka samping dengan tujuan memperkecil tekanan balik saat air mengenai sisi turbin yang tidak aktif. Tekanan balik ini dapat menyebabkan efek pengereman pada turbin sehingga menyebabkan turbin berhenti berputar. Selain itu, rangka turbin bagian bawah dibuat terbuka untuk mengalirkan air ke bawah agar air yang mengenai sisi bilah yang aktif akan turun ke bawah dan tidak menyebar ke sisi turbin lain yang menyebabkan pengereman. Dari kerangka tersebut menghasilkan putaran turbin yang lebih besar dibanding dengan tidak adanya penutup samping dan depan.

4. Efisiensi Konversi Energi Kinetik Air menjadi Energi Mekanik

Penggunaan turbin *free-swing blade* dinilai mampu memperbesar pemanfaatan daya kinetik air. Kecepatan putar turbin yang dihasilkan pada *free-swing blade* secara konsisten meningkat saat terjadi kenaikan torsi yang diakibatkan oleh kenaikan debit air. Hal ini dapat dilihat pada hasil data kecepatan putar generator yang lebih besar pada *free-swing blade* dibandingkan dengan *locked blade*. Torsi pada *free-swing blade* yang lebih stabil menunjukkan bahwa turbin mampu memaksimalkan pemanfaatan daya kinetik air.

5. Perbandingan Kinerja Turbin Locked Blade dan Free-swing Blade

Kinerja mekanik turbin *free-swing blade* lebih unggul karena mampu beradaptasi dengan debit air yang fluktuatif dan menghasilkan torsi yang lebih besar jika dibandingkan dengan turbin *locked blade*. Namun kinerja elektrikal turbin *free-swing blade* lebih rendah dibandingkan dengan *locked blade* akibat penurunan kemampuan generator yang disebabkan oleh kondisi *brush* yang aus sehingga konversi energi oleh generator belum maksimal.



KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian sistem PLTMH dengan *adaptive blade* yakni turbin *free-swing blade* dengan pemasangan vertikal menunjukkan bahwa dengan aliran air tanpa *head* dan kecepatan aliran yang cenderung rendah tetap dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin. Turbin *free-swing blade* mampu beradaptasi dengan kondisi aliran air dan mampu memaksimalkan pemanfaatan energi kinetik air dalam menggerakkan turbin. Torsi yang dihasilkan oleh turbin *free-swing blade* lebih stabil dan lebih besar walaupun debit air cenderung kecil. Dengan debit yang lebih rendah, *adaptive blade* mampu menghasilkan kecepatan putar generator lebih tinggi dengan rata – rata mencapai 1531,7 RPM dibanding dengan rata – rata kecepatan putar generator pada *locked blade* yang mencapai 1291,4 RPM.

Secara mekanik, turbin *free-swing blade* lebih unggul dibandingkan dengan turbin *locked blade* karena *free-swing blade* mampu beradaptasi dengan debit air yang fluktuatif. Tekanan air yang mengenai bilah aktif dapat dikonversi secara maksimal menjadi torsi yang lebih tinggi. Namun secara elektrik, *free-swing blade* belum mampu menghasilkan daya generator yang lebih baik dibandingkan dengan *locked blade*. Meskipun torsi yang dihasilkan oleh *free-swing* lebih unggul, namun penyaluran tenaga ke generator belum optimal. Hal ini dikarenakan kemampuan generator yang menurun akibat kondisi *brush* aus sehingga induksi tegangan menurun. Pada pengujian baterai, *locked blade* menyalurkan daya yang lebih baik dengan rata – rata mencapai 7,88 W jika dibandingkan dengan rata – rata *free-swing* blade yang hanya mencapai 7,383 W.

Saran yang perlu dilakukan untuk pengujian selanjutnya yakni perlu adanya variasi beban dengan daya yang berbeda serta pemilihan generator disesuaikan agar dapat mengimbangi sistem mekanikal sehingga mampu menyalurkan daya listrik yang lebih optimal. *Dynamic Torque Meter* (DYN200) juga dapat dihubungkan ke dalam sistem monitoring dengan komunikasi melalui RS485.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan naskah publikasi yang berjudul “*Rancang Bangun dan Uji Kinerja PLTMH dengan Turbin Sumbu Vertikal dengan Adaptive Blade pada Sumber Aliran Air Kanal*” ini dengan baik. Dalam proses penyusunan naskah publikasi ini penulis mendapatkan banyak bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat dan kerendahan hati, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar – besarnya kepada Bapak dan Ibu tercinta terima kasih atas segala dukungan yang tak pernah putus, doa yang senantiasa menyertai setiap langkah penulis, serta kasih sayang yang tulus. Terima kasih penulis sampaikan kepada Bapak Rizki Nurilyas Ahmad, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing atas waktu, bimbingan serta



kesabaran beliau dalam membimbing penulis dari awal hingga akhir proses penelitian. Penulis juga berterima kasih kepada Saudara Muhammad Naufal Berliansyah Ibrahim dan Mahsa Naqya Firdaus terima kasih atas dukungan dan semangat yang begitu berarti, serta kepada Talitha Anita Zahra, Alfiana Ramadhani, dan Febriani Triastuti Setyaningsih atas kebersamaan, tawa, serta perhatian yang membuat proses ini menjadi lebih ringan. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Saudari Nur Fatkhiyaturrosidah dan Saudara Iqbal Reza Pradana yang telah menjadi teman seperjuangan selama proses perkuliahan hingga penyusunan tugas akhir ini. Penulis juga berterima kasih kepada Farid Ahmad Fauzan, Muhammad Afif, Muhammad Addo Putranto, Nadia Intani Zalbila, Muhammad Idhan Arkhan, Hasby Asshodiq, Roma Febrian, dan Khitananda Timor yang telah bersedia membantu dan memberi semangat sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir ini. Tidak lupa kepada rekan – rekan Asisten Laboratorium Teknik Elektro UMS angkatan 2020, 2021 dan 2022 yang telah banyak membantu serta kesediaan berbagi pengalaman dan pengetahuan selama saya berada di Laboratorium Teknik Elektro UMS.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. A. AS, P. Jannus, and A. Ulfiana, "Potensi Hybrid Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Turbin Crossflow dan Turbin Archimedes," *Pros. Semin. Nas. Tek. ...*, pp. 1503–1511, 2022, [Online]. Available: <https://prosiding.pnj.ac.id/index.php/sntm/article/view/476%0Ahttps://prosiding.pnj.ac.id/index.php/sntm/article/download/476/329>
- [2] N. B. Alnavis, R. R. Wirawan, K. I. Solihah, and V. H. Nugroho, "Energi listrik berkelanjutan: Potensi dan tantangan penyediaan energi listrik di Indonesia," *J. Innov. Mater. Energy, Sustain. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 119–139, 2024, doi: 10.61511/jimese.v1i2.2024.544.
- [3] Y. S. Pramesti, "Analisa pengaruh sudut sudu terhadap kinerja turbin kinetik poros horisontal dan vertikal," *J. Mesin Nusantara.*, vol. 1, no. 1, p. 51, 2018, doi: 10.29407/jmn.v1i1.12296.
- [4] Kennie A. Lempoy, "Unjuk Kerja Turbin Kinetik Poros Vertikal Berengsel Dengan Menggunakan Response Surface Methodology," *J. Tekno Mesin*, vol. 5, no. 2, pp. 35–44, 2019.
- [5] A. Yani, R. Ratnawati, Y. H. Anoi, Y. Patabang, R. Risaldi, and Z. Zulkifli, "Effect of variations in blade width on vertical shaft kinetic water turbine power," *Int. J. Multidiscip. Approach Res. Sci.*, vol. 1, no. 03, pp. 388–398, 2023, doi: 10.59653/ijmars.v1i03.224.



- [6] K. A. Lempoy, R. Soenoko, S. Wahyudi, and M. A. Choiron, "Movable blade vertical shaft kinetic turbine visual observation," *Eastern-European J. Enterp. Technol.*, vol. 2, no. 8–98, pp. 23–30, 2019, doi: 10.15587/1729-4061.2019.163418.
- [7] S. D. Boedi, A. N. Mekel, and A. Maidangkay, "LISTRIK SKALA PIKOHIDRO," vol. 17, no. 2, pp. 2–8, 2022, doi: 10.26740/otopro.v17n2.p6.
- [8] A. D. N. B. Prasetyo and P. H. Adiwibowo, "Uji Eksperimental Pengaruh Variasi Banyak Sekat Pada Sudu Terhadap Daya dan Efisiensi Turbin Reaksi Crossflow Poros Vertikal dengan Sudu Setengah Silinder," *J. Tek. Mesin*, vol. 04 Nomor 0, pp. 461–468, 2016.
- [9] Y. Fitrawansyah, A. Purnama, and K. M. T. Negara, "Analisis Pengaruh Debit Air Dan Ketinggian Air Terhadap Besar Daya Yang Dihasilkan Oleh Pltmh Tepal I Pada Saat Musim Kemarau," *J. SainTekA*, vol. 3, no. 3, pp. 20–26, 2022, doi: 10.58406/sainteka.v3i3.1036.
- [10] T. Satriawansyah and N. Dwi Firmansyah, "Analisis Kebutuhan Air Irigasi Desa Ngeru Kecamatan Moyo Hilir, Kabupaten Sumbawa," vol. 5, no. 2, pp. 1–7, 2024.

