

RANCANG BANGUN DAN IMPLEMENTASI SISTEM PENERANGAN JALAN UMUM *HYBRID* DENGAN CATU DAYA *HYBRID* PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA DAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO

Wahib Muhammad Syahputro
School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
@student.telkomuniversity.ac.id

Ekki Kurniawan
School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
ekkikurniawan@telkomuniversity.
ac.id

Porman Pangaribuan
School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia
porman@telkomuniversity.ac.id

Abstrak-Penerangan jalan umum (PJU) merupakan infrastruktur esensial untuk keamanan dan kenyamanan di pedesaan, namun sering terkendala oleh konsumsi energi tinggi dan efisiensi rendah. Di Indonesia, khususnya di daerah pedesaan terpencil dengan keterbatasan jaringan listrik, solusi energi terbarukan sangat dibutuhkan. Penelitian ini mengusulkan sistem PJU *hybrid* yang mengintegrasikan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)

Metode yang digunakan dalam penelitian ini mencakup tahap perancangan sistem PLTH, perakitan panel surya dan turbin mikrohidro, serta pengujian performa sistem dalam dua kondisi, yaitu tanpa beban dan dengan beban. Pengujian dilakukan dengan mencatat variabel tegangan (V), arus (A), daya (W), serta efisiensi (%), baik pada sistem panel surya maupun sistem mikrohidro, dengan mempertimbangkan waktu pengambilan data dan kondisi lingkungan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada sistem panel surya tanpa beban, tegangan tertinggi yang dihasilkan adalah sebesar 8,01 V dengan arus 0,34 A. Sementara itu, pada kondisi dengan beban baterai, panel menghasilkan daya maksimum sebesar 11,16 W dengan tegangan 6,0 V dan arus 1,86 A pada intensitas cahaya sekitar 101.748 lux. Untuk sistem mikrohidro tanpa beban, Level 1 menghasilkan tegangan antara 14,4–17,5 V dengan arus 0,004–0,02 A dan efisiensi maksimum sebesar 0,47%. Sedangkan pada Level 2, tegangan meningkat menjadi 18,7–21,5 V dengan efisiensi tertinggi mencapai 0,96%.

Kata Kunci: *Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid, Panel Surya, Mikrohidro, Penerangan Jalan Umum, Energi Terbarukan, Efisiensi Konvensional*

I. INTRODUCTION

Penerangan jalan umum (PJU) merupakan salah satu elemen penting dalam infrastruktur pedesaan yang berperan dalam meningkatkan keamanan dan kenyamanan pengguna jalan terutama malam hari. Namun, penerangan jalan umum sering kali menghadapi masalah konsumsi energi yang besar dan efisiensi yang rendah [1]. Seiring dengan meningkatnya kesadaran akan pentingnya penggunaan energi ramah lingkungan, pemanfaatan sumber energi terbarukan menjadi solusi alternatif yang sangat potensial. Teknologi berbasis energi terbarukan seperti tenaga surya dan tenaga aliran air

mulai diterapkan sebagai solusi inovatif untuk mengurangi ketergantungan pada sumber daya energi fosil [2].

Di Indonesia, PJU di pedesaan sering terkendala infrastruktur kelistrikan yang terbatas, seperti di Desa Pinggir Sari, Kabupaten Bandung. Pemanfaatan energi alternatif seperti tenaga surya dan mikrohidro dapat menjadi solusi efektif untuk penerangan jalan. Banyak sistem terbarukan kurang optimal karena hanya mengandalkan satu sumber energi, sehingga penelitian ini merancang PJU berbasis hybrid PLTS dan PLTMH untuk memaksimalkan pemanfaatan energi terbarukan bagi masyarakat pedesaan [3].

Keterbatasan infrastruktur listrik dan ketergantungan pada energi fosil meningkatkan risiko kecelakaan, kriminalitas, serta menghambat aktivitas malam di pedesaan. Solusi energi terbarukan yang ada sering hanya mengandalkan satu sumber, seperti tenaga surya, yang tidak stabil saat cuaca mendung atau malam hari. Penelitian ini merancang sistem PJU hybrid PLTS–PLTMH untuk menghadirkan penerangan yang andal, efisien, dan mandiri. Ruang lingkup mencakup perancangan, pengujian pada berbagai kondisi cuaca, serta analisis keandalan sistem [3].

II. KAJIAN TEORI

A. Energi Konvensional

Energi konvensional merupakan sumber energi yang tidak dapat diperbaharui seperti bahan bakar fosil, yang mencakup batu bara, minyak bumi, dan gas alam. Sumber energi konvensional yang terbatas dan tidak terbarukan terancam punah dalam waktu dekat. Hal ini memicu kekhawatiran akan krisis energi di masa depan. Penggunaan energi konvensional juga menjadi penyebab utama perubahan iklim karena menghasilkan emisi gas rumah kaca[5].

B. Energi Terbarukan

Sistem energi terbarukan berperan penting dalam mendukung pembangunan berkelanjutan, karena sumbernya dapat diperbarui secara alami dalam waktu singkat [6]. Potensinya mencakup panas bumi, air, angin, bioenergi, arus laut, nuklir, dan surya. PLTS dan PLTMH merupakan contoh yang memanfaatkan sumber daya alam tanpa menghasilkan emisi karbon [7].

C. Energi Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya adalah sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan energi cahaya matahari untuk menghasilkan listrik. Sumber energi ini sangat melimpah dan dapat diakses hampir di seluruh penjuru dunia. Untuk mengatasi masalah ini, sistem penyimpanan energi seperti baterai diperlukan untuk menyimpan energi yang dihasilkan pada siang hari dan menggunakannya pada malam hari atau saat cuaca mendung.

D. Energi Mikrohidro

Energi mikrohidro adalah jenis energi terbarukan yang diperoleh dari aliran air, baik itu dari sungai, saluran irigasi, atau aliran air lainnya. Mikrohidro memanfaatkan turbin untuk mengubah energi kinetik aliran air menjadi energi mekanik yang kemudian dikonversi menjadi energi listrik.

E. Energi Hybrid

Pembangkit listrik hybrid adalah sistem yang memanfaatkan dua atau lebih sumber pembangkit untuk melayani beban yang sama, umumnya berbasis energi terbarukan. Tujuannya adalah meningkatkan keandalan suplai listrik, dengan kombinasi sumber seperti photovoltaic (PV) yang memanfaatkan energi surya dan turbin mikrohidro yang menggunakan aliran air. Sifat terbarukan kedua sumber ini menjadi dasar penerapan sistem hybrid.

F. Sistem Penerangan Jalan Umum

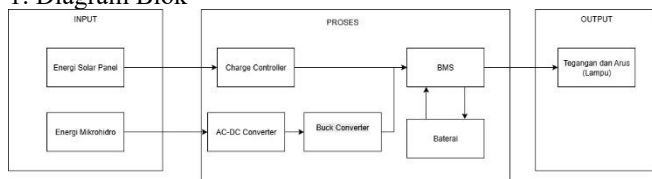
PJU berperan penting dalam menunjang aktivitas malam hari dengan meningkatkan keselamatan pengguna jalan melalui penerangan yang memadai. Standar teknisnya mencakup intensitas cahaya, ketahanan cuaca, dan efisiensi energi. Pemanfaatan energi terbarukan pada PJU diharapkan dapat mengurangi ketergantungan pada energi fosil.[1], [3].

III. METODE

Memberikan gambaran rancangan penelitian yang meliputi prosedur atau langkah-langkah penelitian, waktu penelitian, sumber data, cara perolehan data dan menjelaskan metode yang akan digunakan dalam penelitian [10 pts].

A. Konsep Sistem

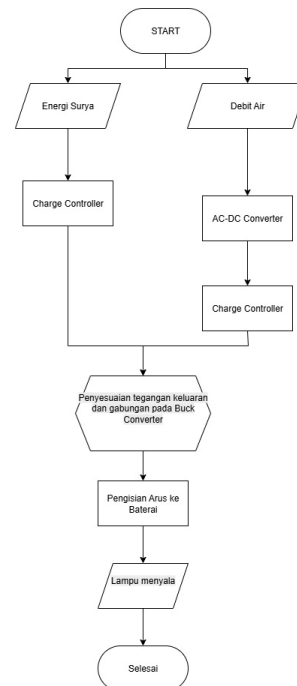
1. Diagram Blok



Gambar 1.

Gambar 1. menunjukkan diagram blok untuk perancangan tugas akhir ini yang menjelaskan alur kerja dari sistem yang akan dirancang, sebagaimana *Input* yang diperoleh dari panel surya dan turbin akan di konversi menjadi arus DC. Arus yang telah dikonversi akan dikirim ke baterai untuk disimpan maupun dipergunakan ketika hari sudah malam untuk menyalakan lampu penerangan jalan umum.

2. Diagram Alur



Gambar 2.

Gambar 2. Menjelaskan bagaimana alat mengumpulkan energi dari dua sumber terbarukan yaitu matahari dan aliran air. Komponen Panel surya dan Charge controller Mengubah energi matahari menjadi energi listrik DC. Komponen Turbin air dan Generator AC mengubah energi kinetik air menjadi listrik AC dan AC kemudian dikonversi ke DC melalui AC-DC Converter.

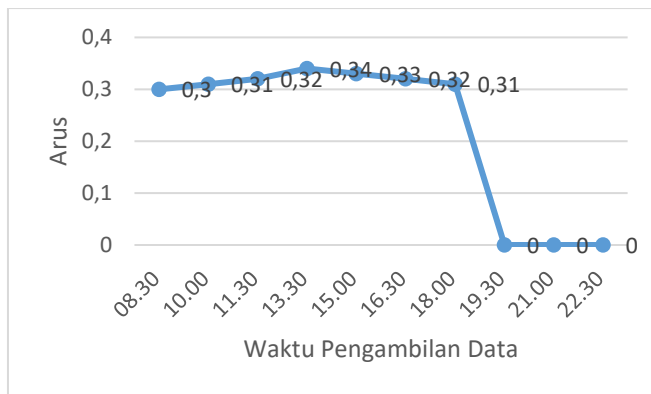
IV. HASIL DAN ANALISIS

1) Pengujian Energi surya Tanpa Beban Lampu

Pengujian pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui apakah panel surya dapat berfungsi dengan efektif untuk menghasilkan tegangan yang didapat dari cahaya matahari.

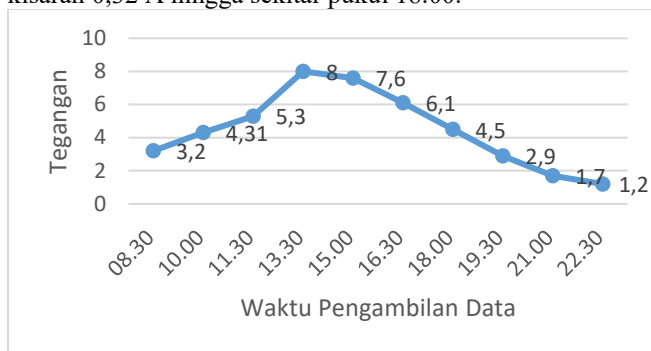
Tabel 1. Pengujian Energi Surya tanpa beban lampu

Waktu Pengambilan Data	Tegangan V (V)	Arus I (A)	Intensitas Cahaya (lux/W/m ²)	Daya P (W)
08.30	3,2	0,3	25,100	0,96
10.00	4,31	0,31	44,600	1,3361
11.30	5,3	0,32	56,600	1,696
13.30	8	0,34	103,000	2,72
15.00	7,6	0,33	101,500	2,508
16.30	6,1	0,32	82,200	1,952
18.00	4,5	0,31	62,900	1,395
19.30	2,9	0	49,200	0
21.00	1,7	0	6,920	0
22.30	1,2	0	723	0



Gambar 3.

Berdasarkan grafik pada gambar 3. arus (A) terhadap waktu, terlihat bahwa arus yang dihasilkan relatif stabil dengan kisaran sempit antara 0,30 A hingga 0,34 A, dengan nilai tertinggi juga terjadi pada pukul 13.30. Setelah mencapai puncaknya, arus mulai menurun secara perlahan dan stabil di kisaran 0,32 A hingga sekitar pukul 18.00.



Gambar 4.

Pada Gambar 4. Tegangan mengalami peningkatan secara bertahap mulai dari pagi hari pukul 06.30 sebesar 3,2 V dan mencapai puncak sebesar 8,0 V pada pukul 12.00 siang, kemudian menurun secara perlahan hingga hanya 1,2 V pada pukul 21.00 malam. Sementara itu, Jika dihitung secara sederhana, daya listrik tertinggi yang dihasilkan terjadi pada pukul 12.00 sebesar sekitar 2,72 Watt, sedangkan pada pagi dan malam hari hanya sekitar 0,96 W dan 0,36 W.

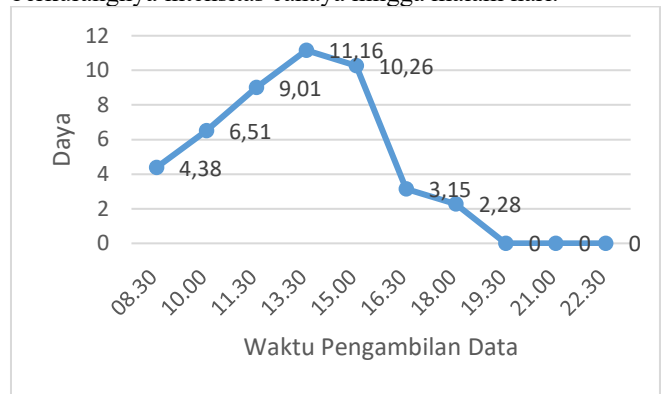
Pengujian Energi Surya Dengan Beban Baterai

Tabel 2.

Waktu Pengambilan Data	Tegangan V (V)	Arus I (A)	Intensitas Cahaya (lux/W/m ²)	Daya P (W)
08.30	3	1,46	29.462	4,38
10.00	4,2	1,55	43.781	6,51
11.30	5,3	1,7	61.003	9,01
13.30	6	1,86	101.748	11,16
15.00	5,7	1,8	88.199	10,26
16.30	4,5	0,7	67.153	3,15
18.00	3,8	0,6	24.239	2,28
19.30	2,5	0	638	0
21.00	1	0	0	0
22.30	0,8	0	0	0

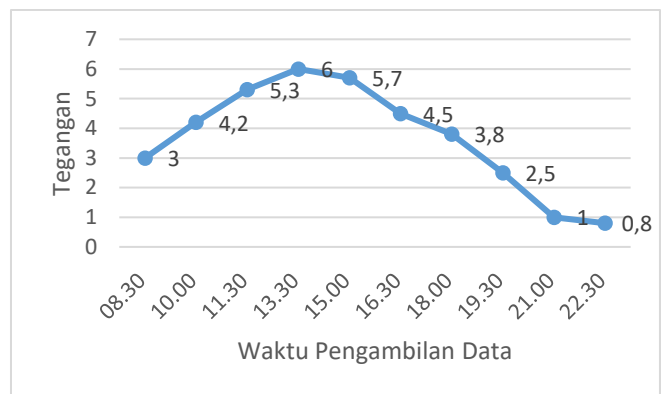
Pengujian panel surya dengan beban baterai menunjukkan arus meningkat secara signifikan dari pagi hari (pukul 08.30) hingga mencapai puncaknya sekitar tengah hari pukul 13.30. Tegangan maksimum tercatat sebesar 6 volt pada pukul 13.30, sementara arus maksimum sebesar 1,86 ampere tercapai pada pukul 13.30. Setelah waktu tersebut,

baik tegangan maupun arus mulai menurun seiring dengan berkurangnya intensitas cahaya hingga malam hari.



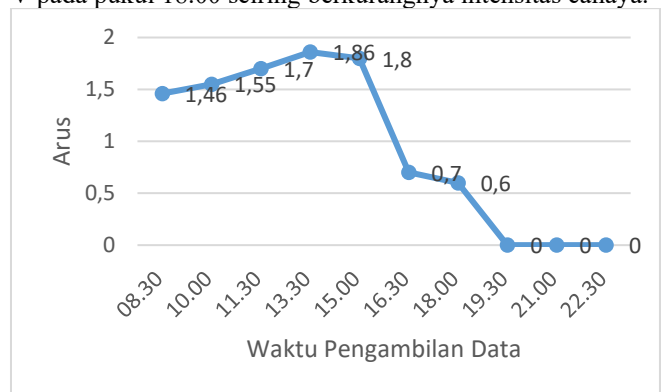
Gambar 5.

Daya yang dihasilkan panel surya berdasarkan grafik gambar 5. Daya panel surya, hasil perkalian tegangan dan arus, mencapai puncak 10,26 W pada pukul 13.30 saat intensitas cahaya 101.748 lux/W/m². Setelah pukul 15.00, meski arus stabil di kisaran 0,6–0,7 A, penurunan tegangan menyebabkan daya menurun drastis.



Gambar 6.

Gambar 6 menunjukkan grafik tegangan panel surya dengan beban baterai yang meningkat dari 3 V pada pukul 08.30 hingga puncak 6 V pada pukul 13.30, saat pengisian baterai optimal. Setelah itu, tegangan menurun bertahap hingga 3,8 V pada pukul 18.00 seiring berkurangnya intensitas cahaya.



Gambar 7.

Gambar 7. Grafik arus pada sistem energi surya dengan beban baterai menunjukkan pola perubahan arus sepanjang hari, yang mencerminkan kinerja panel surya dalam menghasilkan energi listrik dan menyalurkannya ke baterai. Pada pukul 08.30, arus mulai tercatat sebesar 1,46 A dan terus meningkat seiring dengan naiknya intensitas cahaya matahari, mencapai

puncak sebesar 1,86 A pada pukul 13.30. Peningkatan ini menunjukkan bahwa sistem berada dalam kondisi optimal untuk pengisian baterai. Setelah mencapai titik maksimum, arus mulai menurun secara signifikan, menjadi 0,7 A pada pukul 16.30 dan 0,6 A pada pukul 18.30, seiring dengan berkurangnya intensitas cahaya menjelang sore.

Pengujian MikroHidro Tanpa Beban

Pengujian dilakukan dengan dua kondisi dengan tingkatan kecepatan perputaran turbin yang berbeda-beda, yaitu saat sistem berjalan tanpa beban dan dengan beban, guna memperoleh data menyeluruh terkait kinerja sistem. Hasil dari pengujian ini menjadi dasar evaluasi efisiensi dan efektivitas sistem mikrohidro yang telah dirancang.

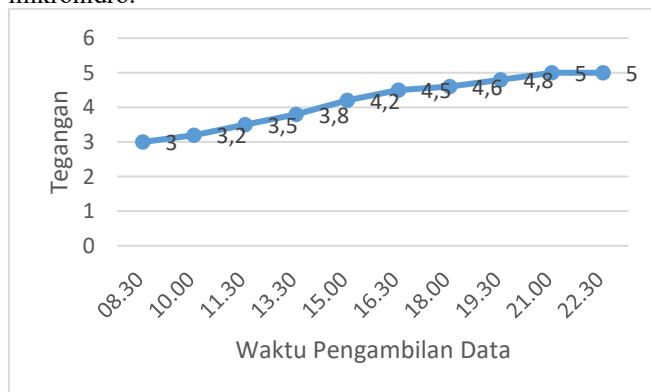
1. Perhitungan Mikrohidro Tanpa Beban Level 1

Pada bagian ini, perhitungan daya keluaran dari sistem mikrohidro level 1 berdasarkan parameter teknis yang diukur secara langsung di lapangan.

Tabel 3. Perhitungan Mikrohidro Tanpa Beban Level 1

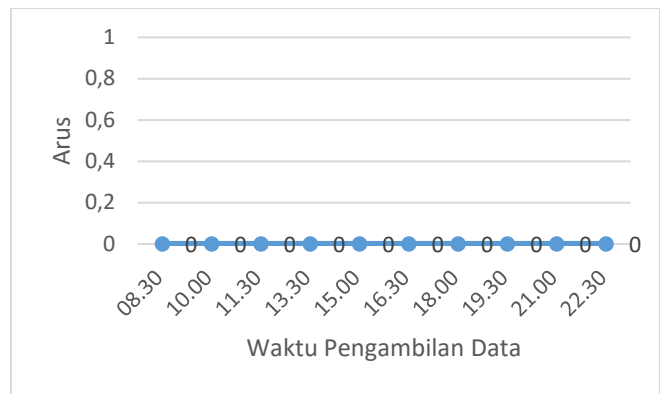
Waktu Pengambilan Data	Tegangan V (V)	Arus I (A)	Debit Air (L/detik)	RPM Turbin	Daya
08.30	3	0	3,8	1210	0
10.00	3,2	0	3,6	1195	0
11.30	3,5	0	3,7	1182	0
13.30	3,8	0	3,4	1170	0
15.00	4,2	0	3,1	1158	0
16.30	4,5	0	3	1142	0
18.00	4,6	0	2,8	1125	0
19.30	4,8	0	2,8	1108	0
21.00	5	0	2,7	1093	0
22.30	5	0	2,6	1079	0

Data yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menghitung daya teoritis yang dapat dihasilkan oleh sistem mikrohidro.



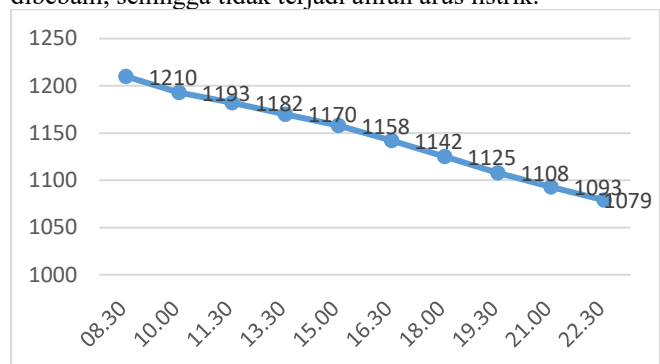
Gambar 8.

Gambar 8. Menunjukkan hasil pengujian bahwa tegangan *output* yang dihasilkan sistem meningkat secara bertahap dari 3,0 volt hingga mencapai 5,0 volt. Kenaikan tegangan ini menunjukkan bahwa sistem mampu merespons perubahan kondisi debit air yang sedikit meningkat dari 2,6 liter/detik menjadi 3,8 liter/detik.



Gambar 9.

Gambar 9. menunjukkan bahwa tidak ada arus yang mengalir sepanjang periode pengambilan data, dengan nilai arus yang konsisten berada di angka nol dari pukul 08.30 hingga 22.30. Kondisi ini dapat dijelaskan karena sistem tidak dibebani, sehingga tidak terjadi aliran arus listrik.



Gambar 10.

Gambar 10. Grafik RPM Pembangkit Mikrohidro Tanpa Beban Level 1. Kecepatan putaran turbin juga mengalami penurunan dari 1210 RPM menjadi 1079 RPM seiring waktu, yang dapat disebabkan oleh penurunan tekanan atau keausan mekanik ringan dalam proses uji.

Perhitungan Mikrohidro Tanpa Beban Level 2

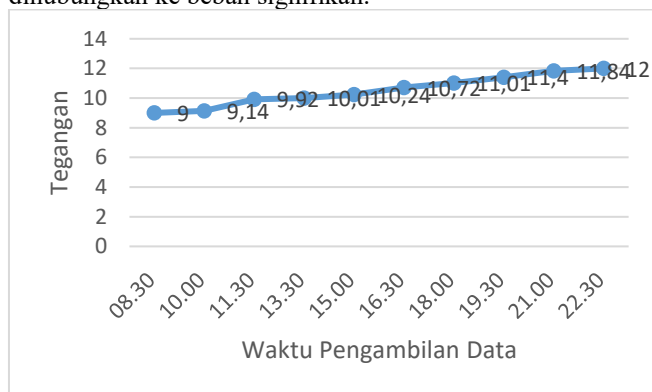
Pengujian mikrohidro tanpa beban pada Level 2 menunjukkan peningkatan performa sistem dibandingkan Level 1, yang ditandai dengan tegangan *output*, daya, dan RPM turbin yang lebih tinggi. Pada pengujian ini, sistem diuji dalam kondisi debit air yang meningkat, mulai dari 3,0 hingga 3,5 liter/detik. Tegangan yang dihasilkan mengalami kenaikan signifikan dari 9,00 volt menjadi 12,00 volt.

Tabel 4. Perhitungan Mikrohidro Tanpa Beban Level 2

Tegangan V (V)	Arus I (A)	Daya P (W)	Debit Air (L/detik)	RPM Turbin
9	0,009	0,081	3	1283
9,14	0,009	0,08226	3,1	1298
9,92	0,009	0,08928	3,2	1312
10,01	0,009	0,09009	3,3	1328
10,24	0,009	0,09216	3,3	1345
10,72	0,009	0,09648	3,4	1361
11,01	0,009	0,09909	3,4	1376
11,4	0,009	0,1026	3,5	1388
11,84	0,009	0,10656	3,5	1400
12	0,009	0,108	3,5	1412

Daya listrik dihitung dari hasil perkalian antara tegangan dan arus, dengan hasil berkisar antara 0,081 watt hingga 0,108

watt. Nilai daya ini lebih tinggi dibandingkan pada Level 1. Meskipun nilai daya pada Level 2 masih tergolong kecil, peningkatan ini membuktikan bahwa sistem sudah mulai menghasilkan energi listrik yang nyata walaupun belum dihubungkan ke beban signifikan.



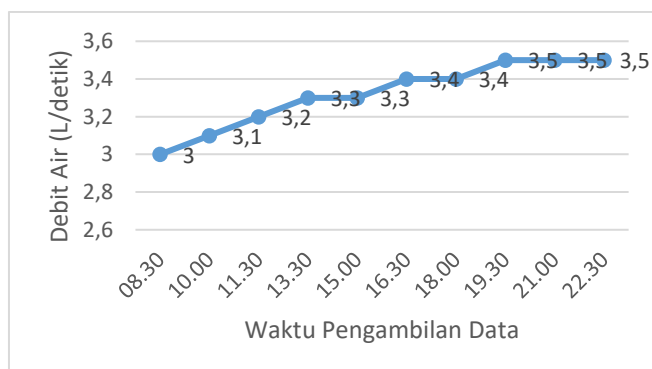
Gambar 11.

Gambar 11. menunjukkan tegangan mikrohidro Level 2 meningkat dari 10 V pada pukul 08.30 menjadi 12 V pada pukul 22.30, dengan penurunan sesaat ke 9,14 V pada pukul 10.00 akibat fluktuasi aliran air. Pengujian tanpa beban memungkinkan tegangan naik stabil tanpa penurunan akibat konsumsi daya.

Tabel 5.

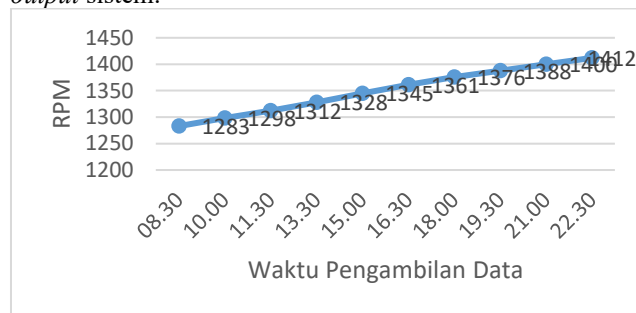
NO.	Tegangan V (V)	Arus I (A)	Daya P (W)	Debit Air (L/detik)	RPM Turbin
1	23	0,08	1,84	4,9	1556
2	22,9	0,08	1,832	4,9	1583
3	22,8	0,08	1,824	4,8	1492
4	22,9	0,08	1,832	4,9	1600
5	22,8	0,08	1,824	4,8	1541
6	22,7	0,08	1,816	4,7	1592
7	22,8	0,08	1,824	4,5	1411
8	22,6	0,08	1,808	4,5	1468
9	22,7	0,08	1,816	4,6	1498
10	22,8	0,08	1,824	4,7	1505

Memperlihatkan hasil pengukuran arus dari pembangkit mikrohidro pada Level 2 dalam kondisi tanpa beban lampu. Dari grafik terlihat bahwa arus yang dihasilkan tetap berada pada nilai yang sangat kecil dan konstan, menunjukkan bahwa pada kondisi tanpa beban, aliran muatan listrik belum signifikan meskipun tegangan terus meningkat dikarenakan tidak ada beban yang dialiri oleh arus.



Gambar 12.

Gambar 12. ini merupakan grafik debit aliran air yang digunakan sebagai sumber energi pada sistem mikrohidro. Dapat dilihat bahwa debit air mengalami peningkatan dari 3 liter/detik hingga mencapai kestabilan di angka 3,5 liter/detik. Kenaikan ini menunjukkan adanya peningkatan volume aliran yang berdampak langsung terhadap tegangan output sistem.

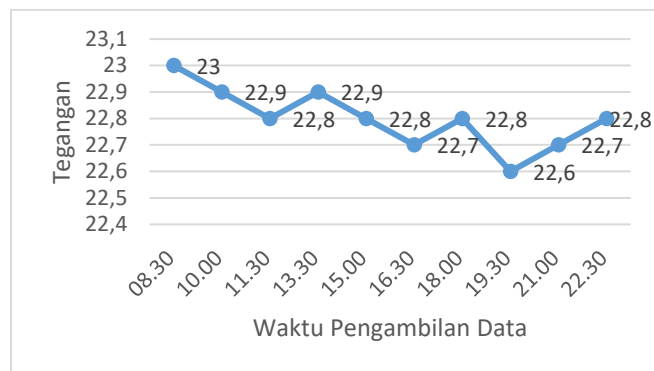


Gambar 13.

Gambar 13. Grafik Kecepatan putaran turbin (RPM) juga mengalami kenaikan konsisten, dimulai dari 1283 RPM dan mencapai 1412 RPM pada akhir pengujian. Peningkatan RPM ini berkorelasi dengan peningkatan debit air yang mendorong turbin dengan tenaga lebih besar.

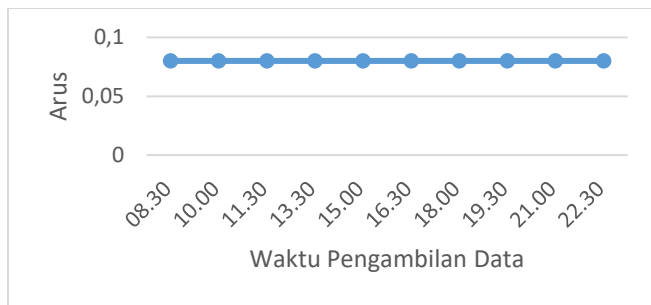
Perhitungan Mikrohidro Tanpa Beban Level 3

Pengujian mikrohidro Level 3 tanpa beban dilakukan untuk menilai performa maksimal dengan debit air dan putaran turbin lebih tinggi dibanding Level 1 dan 2. Tegangan tercatat 22,6–23 V dengan arus konstan 0,08 A, menghasilkan daya 1,808–1,84 W, tertinggi di antara seluruh level pengujian tanpa beban.



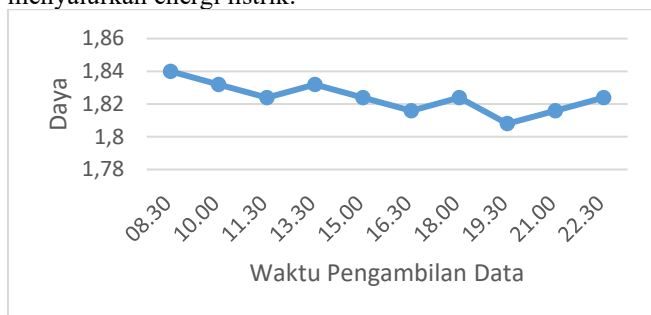
Gambar 14.

Gambar 13. Gambar 14. Grafik tegangan menunjukkan bahwa nilai tegangan yang dihasilkan oleh pembangkit mikrohidro relatif stabil sepanjang hari, berada dalam rentang 22.6 V hingga 23 V. Tegangan tertinggi tercatat pada pukul 08.30 sebesar 23 V, dan sedikit menurun di waktu-waktu berikutnya, dengan fluktuasi kecil yang tidak signifikan. Stabilitas tegangan ini menunjukkan bahwa sistem pembangkit bekerja dengan konsisten, meskipun terdapat sedikit variasi pada debit air dan RPM turbin.



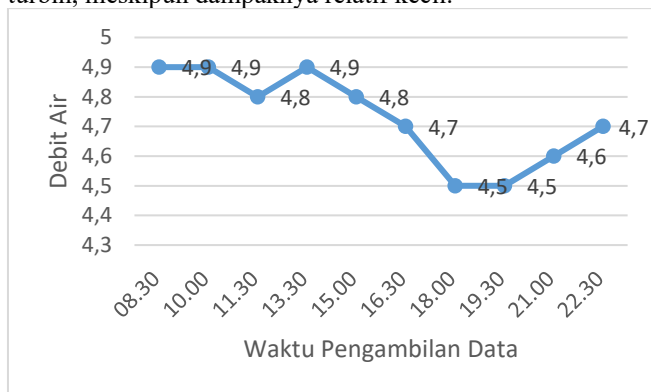
Gambar 15

Gambar 15 Grafik arus menunjukkan nilai yang konstan sebesar 0,08 A sepanjang waktu pengambilan data. Tidak ada perubahan arus yang signifikan, yang mengindikasikan bahwa beban yang terhubung ke sistem tetap atau bahwa sistem diuji dalam kondisi beban tetap. Konsistensi arus ini juga memperkuat asumsi bahwa sistem pembangkit mikrohidro memiliki performa yang stabil dalam menyalurkan energi listrik.



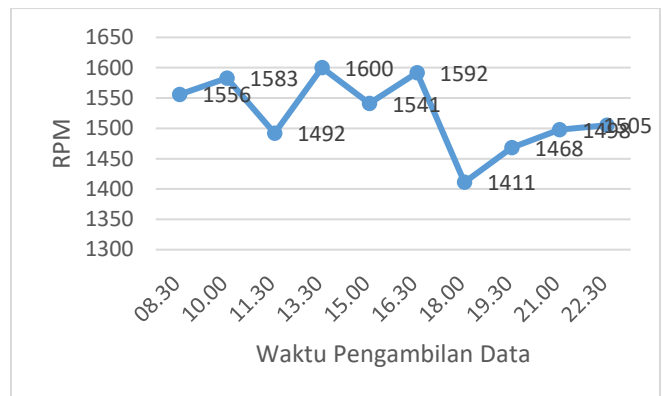
Gambar 16

Gambar 16 Grafik daya menunjukkan nilai yang berkisar antara 1,808 W hingga 1,84 W, mengikuti perubahan kecil pada tegangan. Karena arus tetap konstan, maka daya yang dihasilkan sepenuhnya bergantung pada fluktuasi tegangan. Daya tertinggi tercatat pada pukul 08.30 sebesar 1,84 W, sejalan dengan tegangan tertinggi pada waktu tersebut. Penurunan daya yang terjadi di sore dan malam hari menunjukkan pengaruh dari penurunan debit air dan RPM turbin, meskipun dampaknya relatif kecil.



Gambar 17

Gambar 17 Debit Air relatif stabil di kisaran 4,5–4,9 L/detik, namun terlihat penurunan bertahap hingga mencapai titik terendah 4,5 L/detik. Setelah itu debit kembali naik sedikit di malam hari. Penurunan debit ini berpotensi menurunkan energi potensial air yang tersedia.



Gambar 18.

Gambar 18 menunjukkan RPM turbin sejalan dengan debit air, tertinggi 1600 rpm pada debit 4,9 L/detik dan terendah 1411 rpm pada debit minimum. Pengujian Level 3 menghasilkan tegangan dan daya tinggi serta stabil, dengan arus konstan, membuktikan bahwa debit dan RPM yang lebih besar menghasilkan daya lebih tinggi.

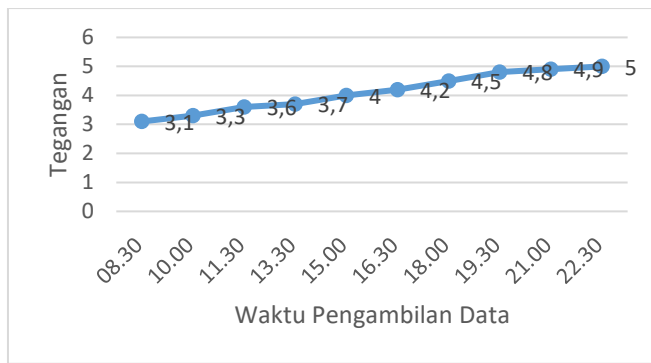
Perhitungan Mikrohidro dengan Beban Level 1

Pengujian mikrohidro dengan beban pada *Level 1* dilakukan untuk mengetahui sistem mikrohidro merespons saat dihubungkan dengan beban lampu. Tidak sama halnya dengan pengujian tanpa beban yang hanya menampilkan nilai tegangan open circuit, pada pengujian ini pembangkit mikrohidro disambungkan langsung ke beban, sehingga arus mengalir dan daya dapat dihitung secara langsung.

Tabel 6.

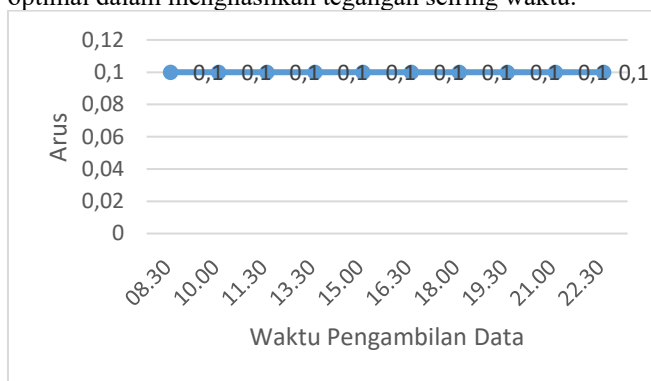
Tegangan V (V)	Arus I (A)	Daya P (W)	Debit Air (L/detik)	RPM Turbin
3,1	0,1	0,31	2,8	882
3,3	0,1	0,33	2,8	894
3,6	0,1	0,36	2,8	906
3,7	0,1	0,37	2,9	917
4	0,1	0,4	2,9	928
4,2	0,1	0,42	2,9	940
4,5	0,1	0,45	3	952
4,8	0,1	0,48	3	965
4,9	0,1	0,49	3	978
5	0,1	0,5	3	990

Berdasarkan Tabel 6 diatas, tegangan yang dihasilkan sistem meningkat secara bertahap dari 3,1 V hingga 5,0 V, dengan arus konstan sebesar 0,1 A pada seluruh titik pengambilan data. Dengan nilai arus tersebut, daya listrik yang dihasilkan pun meningkat seiring tegangan, mulai dari 0,31 watt pada tegangan 3,1 V hingga mencapai 0,5 watt pada tegangan 5,0 V. Kenaikan daya ini menunjukkan bahwa sistem mikrohidro mampu bekerja secara efektif ketika diberikan beban, dan peningkatan tegangan secara proporsional berdampak pada peningkatan daya *output*.



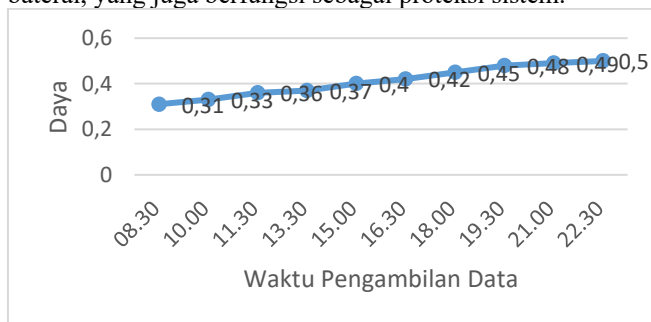
Gambar 19.

Gambar 19. Grafik tegangan menunjukkan tren peningkatan yang konsisten sepanjang hari. Tegangan awal tercatat sebesar 3.1 V pada pukul 08.30 dan meningkat secara bertahap hingga mencapai 5.0 V pada pukul 22.30. Kenaikan ini sejalan dengan peningkatan debit air dan RPM turbin, yang menunjukkan bahwa sistem mikrohidro semakin optimal dalam menghasilkan tegangan seiring waktu.



Gambar 19.

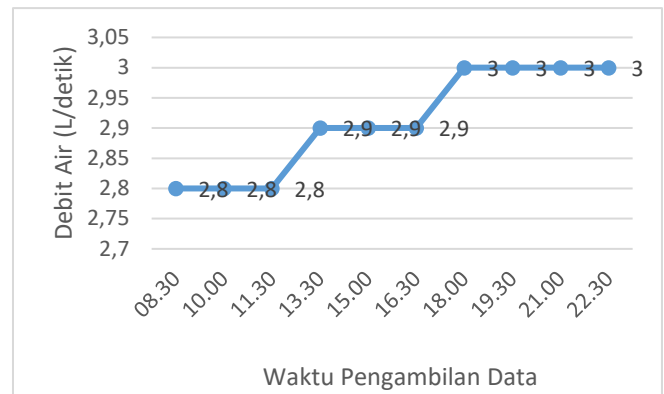
Gambar 19. Grafik arus menunjukkan nilai yang konstan sebesar 0.1 A sepanjang waktu pengambilan data. Tidak adanya fluktuasi arus mengindikasikan bahwa beban baterai yang digunakan memiliki karakteristik tetap, atau sistem pembangkit mengatur arus secara stabil untuk menjaga efisiensi pengisian. Meskipun debit air dan RPM meningkat, arus tetap dijaga agar tidak melebihi kapasitas pengisian baterai, yang juga berfungsi sebagai proteksi sistem.



Gambar 20.

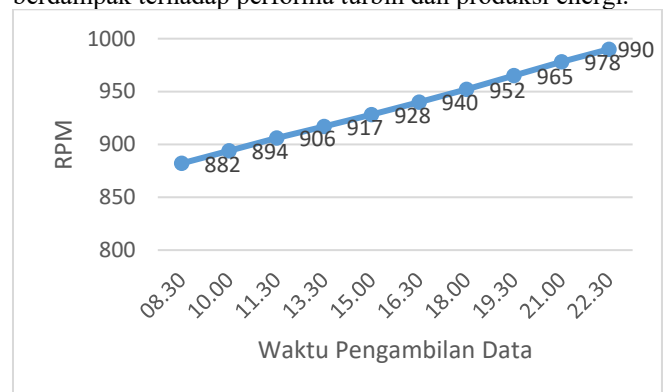
Gambar 20. Grafik daya menunjukkan peningkatan yang sejalan dengan tegangan, karena arus tetap konstan. Daya awal tercatat sebesar 0.31 W dan meningkat hingga 0.5 W pada pukul 22.30. Peningkatan daya ini mencerminkan efisiensi sistem dalam mengubah energi kinetik air menjadi energi listrik, terutama saat debit air dan RPM turbin meningkat. Daya yang dihasilkan cukup stabil dan proporsional terhadap tegangan, menunjukkan bahwa sistem

pembangkit mikrohidro bekerja secara efektif dalam kondisi beban baterai.



Gambar 21.

Grafik pada gambar 21. di atas menggambarkan variasi debit aliran air yang digunakan sebagai *input* utama dalam sistem pembangkit mikrohidro. Berdasarkan data pengamatan, debit air cenderung mengalami peningkatan bertahap dengan nilai awal sebesar 2,8 liter/detik, hingga mencapai kestabilan pada nilai 3 liter/detik. Perubahan ini menunjukkan pengaruh alami dari volume aliran saluran air, yang secara langsung berdampak terhadap performa turbin dan produksi energi.



Gambar 22.

Gambar 22 menunjukkan peningkatan RPM turbin dari 882 menjadi 990, menandakan debit air yang lebih tinggi menghasilkan energi kinetik lebih besar dan meningkatkan kinerja turbin. Secara keseluruhan, mikrohidro Level 1 dengan beban bekerja cukup efisien.

Perhitungan Mikrohidro dengan Beban Level 2

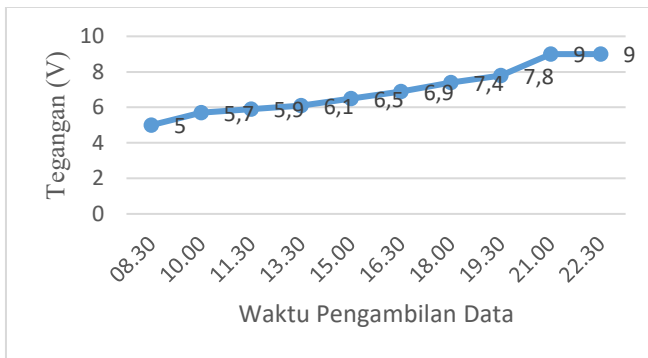
Pengujian mikrohidro Level 2 dengan beban bertujuan menilai kinerja sistem pada debit lebih tinggi dibanding Level 1. Berbeda dari pengujian tanpa beban yang hanya menampilkan tegangan *open circuit*, pada pengujian ini pembangkit disambungkan ke lampu sehingga arus mengalir dan daya dapat dihitung langsung.

Tabel 7.

Tegangan V (V)	Arus I (A)	Daya P (W)	Debit Air (L/detik)	RPM Turbin
5	0,08	0,4	3,4	1172
5,7	0,08	0,456	3,4	1160
5,9	0,06	0,354	3,5	1150
6,1	0,06	0,366	3,5	1135
6,5	0,05	0,325	3,6	1119
6,9	0,05	0,345	3,6	1105

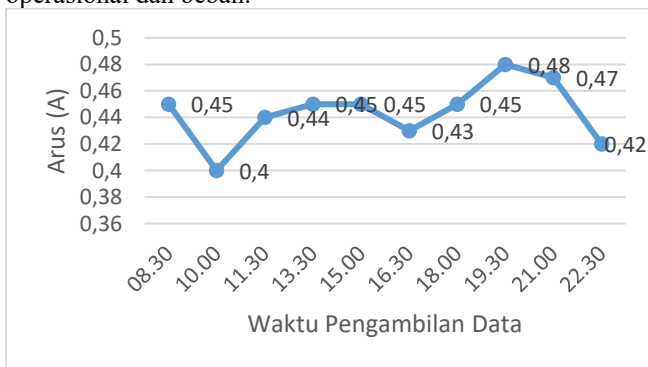
7,4	0,03	0,222	3,7	1091
7,8	0,02	0,156	3,7	1079
9	0,01	0,09	3,8	1067
9	0,01	0,09	3,8	1055

Berdasarkan Tabel 4.7, pada awal pengujian dengan tegangan 5 V dan arus 0,08 A, daya yang dihasilkan mencapai 0,4 watt. Daya maksimum tercatat pada tegangan 5,7 V dengan nilai sebesar 0,456 watt, namun setelah titik ini, nilai arus secara bertahap menurun dari 0,06 A hingga 0,01 A, yang berdampak langsung terhadap penurunan daya. Pada titik akhir pengujian, yaitu pada tegangan 9 V, arus tercatat hanya 0,01 A sehingga daya turun hingga 0,09 watt.



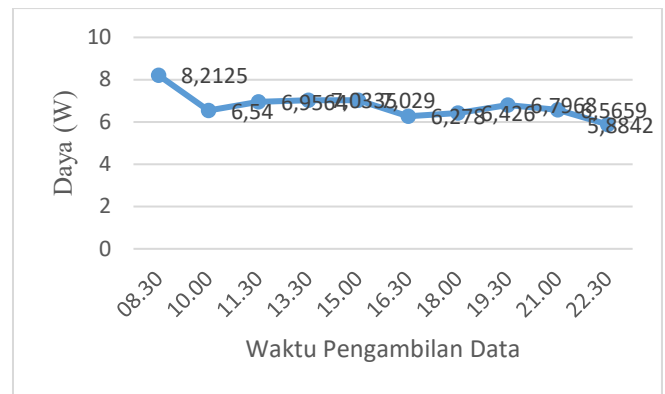
Gambar 23.

Gambar 23. menunjukkan grafik perkembangan tegangan (V) yang dihasilkan oleh PLTMH sepanjang waktu pengambilan data. Tegangan meningkat secara bertahap dari 5 V hingga mencapai 9 V. Peningkatan ini bersifat stabil dan konsisten, menunjukkan bahwa sistem pembangkit tenaga mikrohidro dapat beradaptasi dengan baik terhadap perubahan kondisi operasional dan beban.



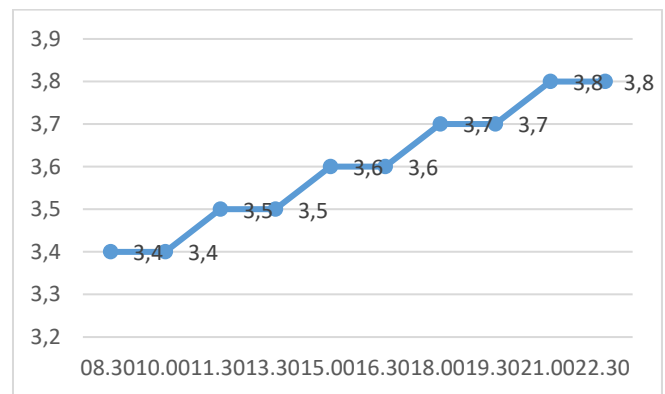
Gambar 24.

Gambar 24. menunjukkan grafik arus selama pengujian. Nilai arus awal adalah 0,45 A, sempat menurun menjadi 0,4 A, lalu mengalami kenaikan bertahap hingga mencapai puncaknya 0,48 A sebelum akhirnya menurun lagi menjadi 0,42 A. Fluktuasi ini bisa diakibatkan oleh perubahan resistansi beban atau kondisi internal sistem kestabilan komponen kelistrikan. Meskipun tegangan meningkat secara konsisten, arus tidak selalu mengikuti pola yang sama, yang dapat menjadi indikator adanya kendala kecil dalam penyaluran daya pada beban level 2.



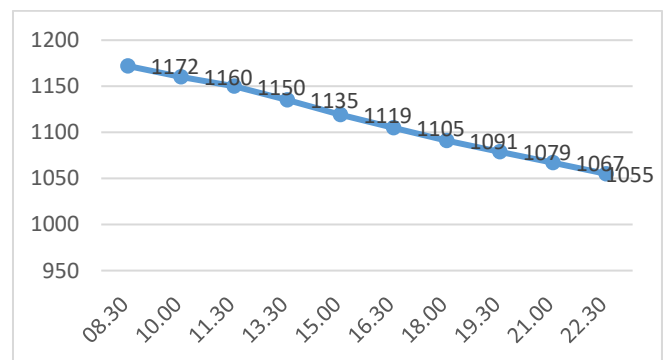
Gambar 25.

Gambar 25. mempresentasikan grafik yang menunjukkan bahwa daya listrik yang dihasilkan oleh PLTMH pada beban level 2. Daya awal tercatat 8,2125 W kemudian menurun menjadi 6,54 W pada pukul 10.00, dan terus mengalami fluktuasi kecil sebelum akhirnya turun ke nilai terendah 5,8842 W.



Gambar 26.

Gambar 26. mempresentasikan grafik yang memperlihatkan debit air dalam liter per detik. Debit air cenderung konstan pada kisaran 3,4–3,8 L/s, menunjukkan bahwa sumber air cukup stabil selama pengambilan data.



Gambar 27.

Gambar 27. dapat dilihat bahwa RPM turbin mengalami penurunan dari nilai tertinggi 1300 RPM menjadi nilai terendah 1056 RPM, seiring bertambahnya waktu dikarenakan menurunnya kinerja generator seiring waktu mengalami penurunan fungsi. Namun secara umum, pengujian Level 2 menunjukkan bahwa meskipun tegangan dapat terus meningkat bila sistem tidak diatur menggunakan kontrol pengaturan daya seperti MPPT.

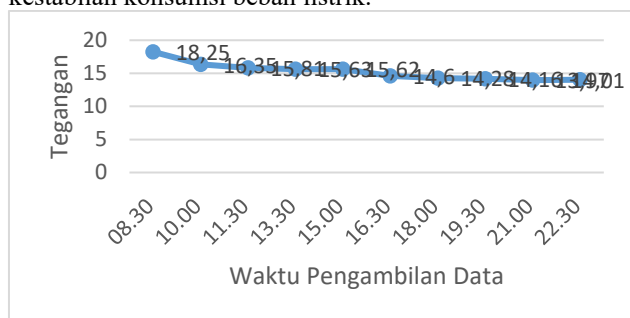
Perhitungan Mikrohidro dengan Beban Level 3

Pada pengujian ini, diukur variabel tegangan (V), arus (A), serta diperoleh daya (W) berdasarkan perkalian antara tegangan dan arus. Nilai-nilai tersebut menunjukkan pola fluktuasi ringan, namun secara umum menggambarkan stabilitas sistem saat beroperasi dalam kondisi maksimal.

Tabel 8.

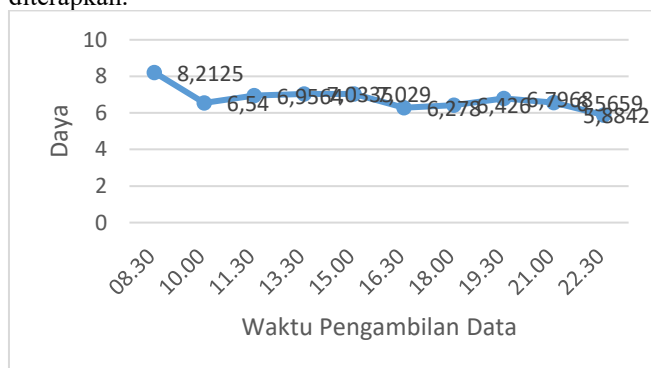
NO.	Tegangan V (V)	Arus I (A)	Daya P (W)	Debit Air (L/detik)	RPM Turbin
1.	18,25	0.45	8,2125	4,9	1285
2.	16,35	0.40	6,54	4,9	1143
3.	15,81	0.44	6,9564	4,5	1300
4.	15,63	0.45	7,0335	4,5	1097
5.	15,62	0.45	7,029	4,5	1252
6.	14,6	0.43	6,278	4,5	1184
7.	14,28	0.45	6,426	4,5	1210
8.	14,16	0.48	6,7968	4,5	1128
9.	13,97	0.47	6,5659	4,5	1273
10.	14,01	0.42	5,8842	4,5	1056

Berdasarkan Tabel 4.8, tegangan tertinggi tercatat sebesar 18,25 V dengan arus 0,45 A, menghasilkan estimasi daya sekitar 8,21 watt. Tegangan kemudian mengalami penurunan bertahap hingga sekitar 14,01 V, namun arus tetap berada dalam kisaran 0,40–0,48 A, yang menunjukkan adanya kestabilan konsumsi beban listrik.



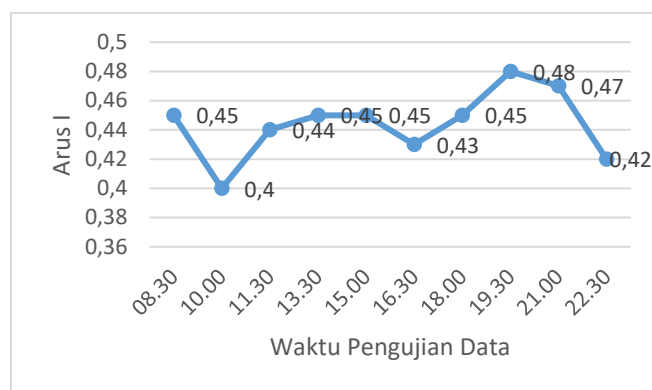
Gambar 28.

Berdasarkan grafik Pada Gambar 28. tegangan awal sistem tercatat sebesar 18,25 V, namun mengalami penurunan secara bertahap seiring waktu, hingga mencapai 14,01 V. Penurunan ini mengindikasikan bahwa faktor seperti menurunnya debit air atau efisiensi turbin yang menurun dapat mempengaruhi kestabilan daya keluaran sistem, terutama saat baterai diterapkan.



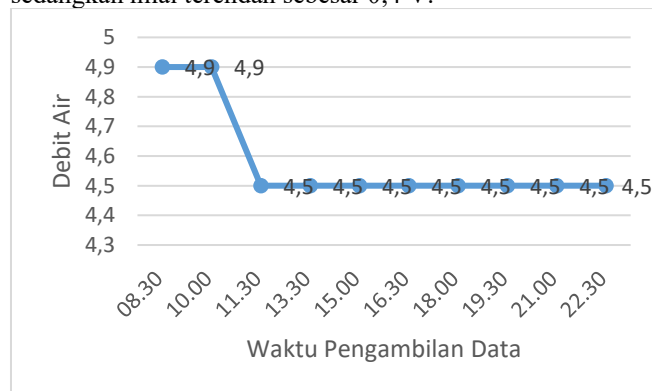
Gambar 29.

Gambar 29. Grafik daya mikrohidro dengan beban lampu Level 3 menunjukkan pola fluktuatif sepanjang hari, mencerminkan dinamika sistem pembangkit dalam merespons perubahan kondisi operasional. Pada pukul 08:30, daya mencapai titik tertinggi sebesar 8.2125 watt, menandakan bahwa sistem berada dalam kondisi optimal. Namun, Peningkatan daya kembali terjadi pada pukul 13:30, mencapai 7.8935 watt, sebelum akhirnya menurun secara bertahap hingga mencapai titik terendah sebesar 5.8842 watt pada pukul 22:30.



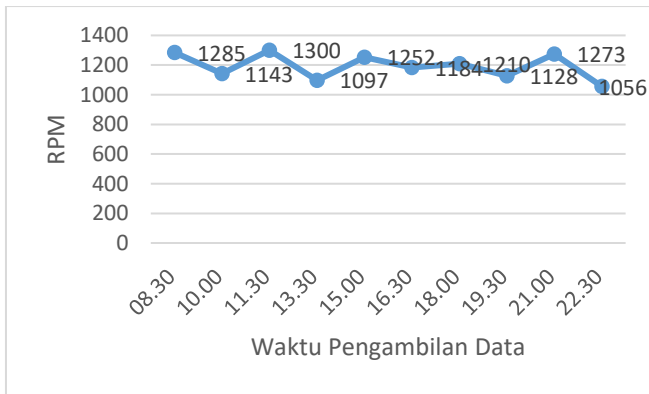
Gambar 30.

Pada Gambar 30. sistem PLTMH diuji dengan beban berupa baterai. Dari grafik terlihat bahwa tegangan keluaran berkisar antara 0,4 hingga 0,48 V, dengan sedikit fluktuasi selama pengambilan data. Tegangan tertinggi tercatat sebesar 0,48 V, sedangkan nilai terendah sebesar 0,4 V.



Gambar 31.

Gambar 31. Grafik berjudul menggambarkan hubungan antara debit air terhadap waktu pengambilan data dalam sistem pembangkit mikrohidro. Pada awal pengamatan, yaitu pukul 08:30 hingga 11:00, debit air tercatat stabil di angka 4.9 liter per detik, menunjukkan bahwa sistem menerima aliran air yang cukup untuk mengoperasikan turbin secara optimal.



Gambar 32.

Gambar 32. RPM turbin selama pengujian berada pada kisaran 1056–1300 RPM, dan menunjukkan dinamika yang cukup wajar dikarenakan beban terus aktif dan debit air mengalami sedikit fluktuasi. Menariknya, meskipun RPM dan tegangan sedikit menurun, daya yang dihasilkan tetap terjaga pada rentang sekitar 6,0–8,2 watt, yang secara praktis sangat cukup untuk menghidupkan beberapa unit lampu LED penerangan jalan.

Pengujian Sistem Pembangkit Hybrid Tanpa ada Beban

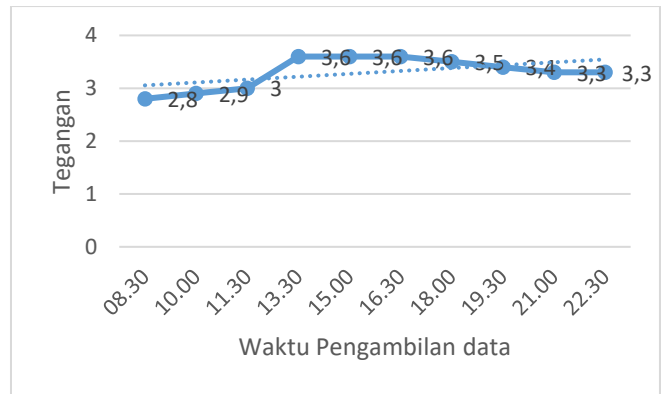
Pada kondisi ini, sistem hanya menghasilkan tegangan dan arus terbuka, tanpa ada konsumsi daya nyata oleh perangkat atau lampu. Pengukuran dilakukan pada sepuluh titik waktu berbeda mulai dari pukul 08.30 hingga 22.30, untuk melihat fluktuasi performa sistem sepanjang hari.

1. Perhitungan Pembangkit Hybrid Tanpa ada Beban

Tabel 9.

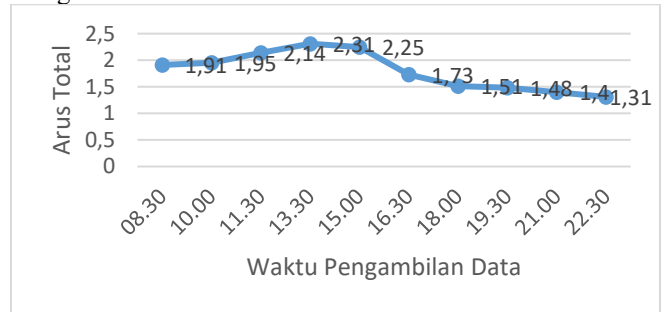
NO.	Tegangan Output (V)	Arus Mikrohidro + Arus panel surya (A)	Daya Total (W)	Efisiensi (%)
1.	4,3	0,308	1,3244	13.14
2.	4,3	0,318	1,3674	13.56
3.	4,7	0,328	1,5416	15.29
4.	4	0,348	1,392	13.81
5.	3,8	0,338	1,2844	12.74
6.	4,6	0,328	1,5088	14.96
7.	4,1	0,318	1,3038	12.93
8.	4,5	0,008	0,036	0.36
9.	3,6	0,008	0,0288	0.29
10.	4,8	0,008	0,0384	0.38

Berdasarkan Tabel 9. tegangan *output* berkisar antara 3,8 V hingga 4,8 V, dengan arus total (gabungan arus dari panel surya dan mikrohidro) bervariasi antara 0,008 A hingga 0,348 A. Nilai arus tertinggi terjadi pada pukul 13.30, yaitu sebesar 0,348 A, sedangkan nilai arus terendah tercatat pada malam hari yaitu pukul 21.00 dan 22.30 hanya sebesar 0,008 A.



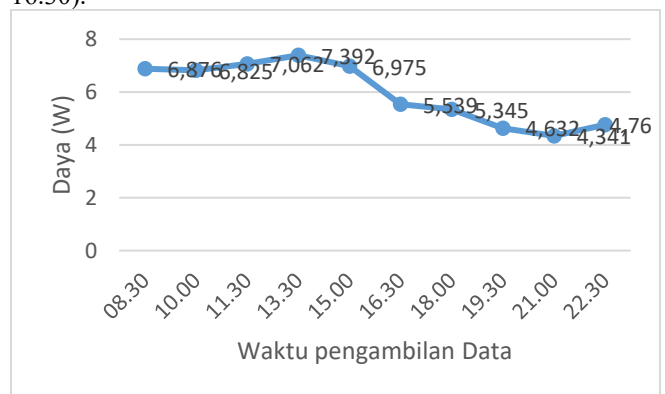
Gambar 33.

Gambar 33. menunjukkan grafik tegangan *output* yang dihasilkan oleh sistem pembangkit listrik *hybrid* antara panel surya dan mikrohidro dalam kondisi tanpa beban selama periode pengamatan dari pukul 08.30 hingga 22.30 WIB. Pengambilan data dilakukan secara berkala untuk mengetahui pola perubahan tegangan seiring perubahan intensitas cahaya matahari dan aliran air sebagai sumber energi utama.



Gambar 33.

Gambar 32 dan Gambar 33. menggambarkan pola secara visual. Terlihat bahwa grafik tegangan dan arus cenderung meningkat pada pagi hingga sore hari, dan menurun kembali saat malam. Garis biru yang mewakili daya total menunjukkan pola parabola terbalik, dengan titik puncaknya di waktu tengah hari hingga sore (sekitar pukul 11.30 hingga 16.30).



Gambar 34.

Grafik Daya total pada gambar 34. yang dihasilkan (hasil dari perkalian tegangan dan arus) juga mengikuti pola yang serupa dengan Gambar 2.19 Daya tertinggi tercatat pada pukul 16.30 yaitu sebesar 1,5088 W, sedangkan daya terendah hanya sekitar 0,036 W pada pukul 19.30 dan menurun lebih jauh menjadi 0,0288 W pada pukul 21.00. Hal ini menegaskan bahwa kontribusi panel surya sangat dominan di siang hari, sedangkan saat malam hari, mikrohidro menjadi satu-satunya

penyumbang arus yang sangat kecil karena dalam kondisi tanpa beban.

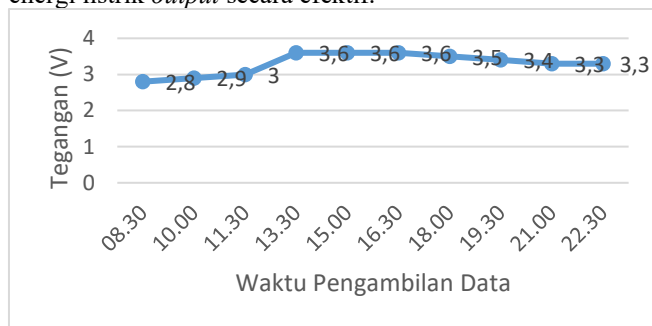
Perhitungan Pembangkit Hybrid Dengan Beban Baterai

Pengujian sistem hybrid dengan beban bertujuan menilai kinerja gabungan panel surya dan mikrohidro saat menyuplai daya ke baterai. Tidak seperti pengujian tanpa beban, hasilnya mencerminkan energi aktual yang digunakan, sehingga lebih representatif terhadap performa sistem.

Tabel 10.

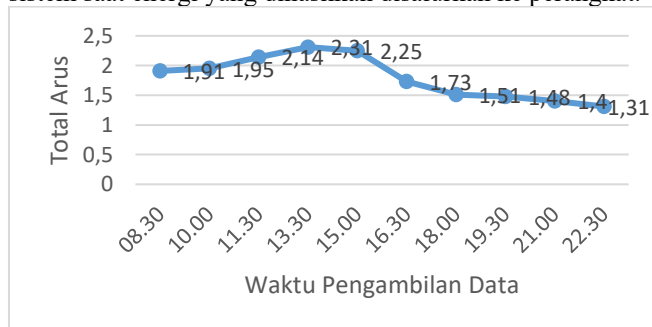
NO.	Tegangan Output (V)	Arus Output (A)	Daya Total (W)	Efisiensi (%)
1.	2,8	1,91	6,876	53,05556
2.	2,9	1,95	6,825	56,10119
3.	3	2,14	7,062	63,69048
4..	3,6	2,31	7,392	82,5
5.	3,6	2,25	6,975	80,35714
6.	3,6	1,73	5,539	61,78571
7.	3,5	1,51	5,345	52,43056
8.	3,4	1,48	4,632	49,92063
9.	3,3	1,40	4,341	45,83333
10.	3,3	1,31	4,76	42,8869

Pengujian efisiensi sistem *hybrid* dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana pembangkit listrik tenaga surya dan mikrohidro mampu mengubah energi input menjadi energi listrik *output* secara efektif.



Gambar 35.

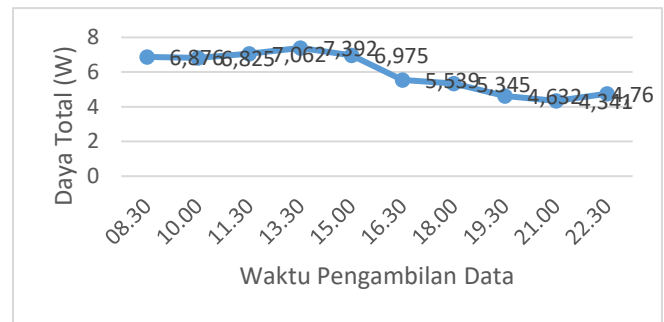
Berdasarkan Grafik 35, tegangan *output* sistem berada dalam rentang 2,8 hingga 3,6 volt, data diambil secara berkala mulai pukul 08.30 hingga 22.30 WIB untuk melihat performa sistem saat energi yang dihasilkan disalurkan ke perangkat.



Gambar 36.

Berdasarkan Grafik 36, arus *output* bervariasi antara 1,31 hingga 2,31 ampere. Gambar memperlihatkan grafik arus *output* yang dihasilkan oleh sistem pembangkit *hybrid* saat mengalirkan daya ke beban. Arus menunjukkan peningkatan signifikan sejak pagi hari dan mencapai puncaknya pada pukul 13.30 WIB, lalu menurun secara bertahap hingga

malam hari. Perubahan arus ini berkorelasi erat dengan fluktuasi energi input dari panel surya.



Gambar 37.

Gambar 37. Daya total yang dihasilkan tercatat paling tinggi pada pukul 08.30, yaitu sebesar 10,08 watt, yang merupakan kombinasi dari tegangan 3,6 volt dan arus 1,91 ampere. Setelah itu, daya *output* mengalami penurunan bertahap, terutama setelah pukul 13.30, meskipun tegangan relatif stabil.

Pengujian Berapa Lama Waktu Pengisian Baterai

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui estimasi waktu yang dibutuhkan sistem *hybrid* dalam mengisi baterai dari kondisi kosong hingga penuh. Waktu pengisian bergantung pada kapasitas baterai dan daya yang tersedia dari sistem pembangkit.

V. SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Sistem hybrid PLTS–PLTMH berhasil dirancang dan diimplementasikan untuk menunjang PJU di pedesaan dengan efisiensi di atas 2%. PLTS menyuplai energi pada siang hari, sedangkan PLTMH beroperasi saat malam atau cuaca mendung, memastikan suplai listrik kontinu. Pengujian menunjukkan perbedaan karakteristik tanpa beban (tegangan tinggi, arus rendah) dan dengan beban (daya optimal). Panel surya menghasilkan daya maksimum 11,16 W, mikrohidro 4,23 W, dan sistem hybrid 10,08 W, dengan kontribusi utama dari PLTS pada siang hari.

Saran

1. Pengambilan data sebaiknya menggunakan *controller* dan disimpan melalui mekanisme data *logger* sehingga waktu pengambilan data, parameter yang diukur tidak memiliki selisih waktu agar data yang diperoleh lebih akurat.
2. Penerapan Skala Lapangan disarankan menggunakan sistem pemantauan dan pengendalian berbasis mikrokontroler atau IoT untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem.
3. Pengujian Lebih Lama: Penelitian lanjutan dapat dilakukan dengan pengujian sistem dalam jangka waktu yang lebih panjang untuk mengkaji ketahanan dan degradasi performa komponen terhadap cuaca dan beban harian.

REFERENCES

- [1] Rendi Febriyanto, "ABSTRACT DESIGN OF BOOST CONVERTER FOR DISCHARGING BATTERY PROCESS ON SOLAR PANEL PUBLIC STREET LIGHTING (PJUTS)," 2019. Accessed: Dec. 21, 2024. [Online]. Available: <http://digilib.unila.ac.id/31205/3/SKRIPSI%20TANPA%20BAB%20PEMBAHASAN.pdf>
- [2] Z. Wang *et al.*, "Study on the Optimal Configuration of a Wind-Solar-Battery-Fuel Cell System Based on a Regional Power Supply," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 47056–47068, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3064888.
- [3] P. G. Yuda Agus Tri Sistiawan, "PERANCANGAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA HYBRIDE (TENAGA SURYA DAN TENAGA ANGIN) DENGAN KAPASITAS 20 W," *Yuda Agus Tri Sistiawan, Pamor Gunoto*, 2019, Accessed: Dec. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.journal.unrika.ac.id/index.php/sigmateknika/article/view/1806>
- [4] M. D. Leonard, E. E. Michaelides, and D. N. Michaelides, "Energy storage needs for the substitution of fossil fuel power plants with renewables," *Renew Energy*, vol. 145, pp. 951–962, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.06.066.
- [5] F. Bayu, T. Azhar, and A. Wismadi, "KAJIAN MENGENAI IMPLEMENTASI PENDEKATAN NZEB (NEARLY ZERO-ENERGY BUILDING) SEBAGAI SOLUSI KELANGKAAN ENERGI KONVENSIONAL," 2020.
- [7] E. Di *et al.*, "ANDASIH Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat Model Energi Indonesia, Tinjauan Potensi Energi Terbarukan Untuk Ketahanan," 2020.
- [8] A. M. Abed, M. Alhuyi Nazari, M. H. Ahmadi, A. Mukhtar, R. Kumar, and N. Gharib, "Power generation by utilization of different renewable energy sources in five Middle Eastern countries: Present status, opportunities and challenges," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 73, p. 104101, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.seta.2024.104101.