E-ISSN: 3025-0994
Halaman 6728-6745
Volume 4 Nomor 3 Tahun 2026

# Rancang Bangun dan Analisis Kinerja Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya *Bifacial* (PLTS) pada Keramba Waduk Cengklik

**Dwi Mukti Laksono[1], Rizki Nurilyas Ahmad[2]**

[1,2] Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Surakarta
e-mail: d400210106@student.ums.ac.id

**Abstrak**

Peningkatan kebutuhan energi listrik mendorong pemanfaatan sumber energi terbarukan yang lebih efisien dan berkelanjutan. Salah satu alternatif yang memiliki potensi besar adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) terapung berbasis panel surya bifacial yang mampu memanfaatkan radiasi matahari dari kedua sisi modul. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem PLTS terapung berbasis panel surya bifacial pada keramba di Waduk Cengklik serta menganalisis pengaruh media reflektor terhadap karakteristik keluaran sistem. Metode penelitian meliputi perancangan sistem, implementasi perangkat keras berbasis Arduino Uno, validasi sensor PZEM-004T, serta pengujian performa menggunakan tiga media reflektor, yaitu air, seng, dan galvalum. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor PZEM-004T memiliki tingkat kesalahan rata-rata sebesar 0,14% untuk tegangan, 0,80% untuk arus, dan 0,88% untuk daya sehingga layak digunakan sebagai instrumen pengukuran. Analisis performa menunjukkan bahwa media air menghasilkan daya beban rata-rata tertinggi sebesar 44,06 W dengan rugi-rugi daya terendah sebesar 4,38 W dibandingkan media seng dan galvalum. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa pemanfaatan radiasi pantul (albedo) dari permukaan air berkontribusi terhadap peningkatan keluaran daya panel surya bifacial. Pengujian kinerja harian selama tiga hari juga menunjukkan bahwa peningkatan intensitas radiasi matahari diikuti oleh kenaikan tegangan, arus, dan daya keluaran sistem, sedangkan pada kondisi tanpa radiasi matahari beban sepenuhnya disuplai oleh baterai. Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan mampu menghasilkan daya maksimum hingga 60 W, melampaui target penelitian sebesar 50 W, sehingga implementasi PLTS terapung berbasis panel surya bifacial pada keramba berpotensi menjadi solusi penyediaan energi listrik yang andal dan berkelanjutan di kawasan perairan.

**Kata Kunci:** *PLTS Apung, Bifacial, Karamba*

**Abstract**

*The growing demand for electricity is driving the adoption of efficient and sustainable renewable energy sources. One promising alternative is a floating solar power plant (PLTS) based on bifacial solar panels, which can utilize solar radiation from both sides of the modules. This study aims to design and implement a floating bifacial solar power plant on a floating cage*

*in the Cengklik Reservoir and analyze the effect of reflector media on its output characteristics. The research methods included system design, Arduino Uno based hardware implementation, PZEM-004T sensor validation, and performance testing using three reflector media: water, zinc, and galvalume. The validation results showed that the PZEM-004T sensor achieved average error rates of 0.14% for voltage, 0.80% for current, and 0.88% for power, indicating reliable measurement performance. Performance analysis revealed that the water medium produced the highest average load power of 44.06 W with the lowest power loss of 4.38 W, outperforming zinc and galvalume. These findings indicate that reflected radiation (albedo) from the water surface enhances the output performance of bifacial solar panels. Three day testing also showed that higher solar radiation intensity increased the system's voltage, current, and power output, while the battery supplied the load in the absence of solar radiation. The developed system generated a maximum power of 60 W, exceeding the research target of 50 W, demonstrating the potential of floating bifacial solar power plants on fish cages as a reliable and sustainable electricity solution for aquatic environments*.

**Keywords :** *Floating PV, Bifacial, Fish Cage*

## LATAR BELAKANG

Energi listrik merupakan kebutuhan utama dalam kehidupan manusia, baik untuk aktivitas rumah tangga, industri, maupun kegiatan sehari-hari. Sebagian besar pembangkit listrik di Indonesia masih bergantung pada energi fosil. Pemanfaatan energi fosil berlebihan memiliki dua tantangan utama, yaitu keterbatasan ketersediaannya serta dampak negatif terhadap lingkungan akibat meningkatnya emisi gas rumah kaca (Alnavis et al., 2024).

Seiring meningkatnya kebutuhan energi listrik, transisi menuju sumber energi terbarukan menjadi fokus global untuk mewujudkan sistem energi listrik yang berkelanjutan (Muntoha et al., 2023). Indonesia memiliki potensi tenaga surya sebesar 207.898 MW, yang merupakan potensi terbesar di antara seluruh sumber energi terbarukan (Alnavis et al., 2024). Selain itu, rata-rata intensitas radiasi matahari di negara ini sebesar 4,8 kWh/m²/hari atau setara dengan potensi 112.000 GWp (Muntoha et al., 2023). Besarnya potensi ini dapat dimanfaatkan melalui penggunaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di hampir seluruh wilayah Indonesia untuk pemenuhan energi listrik (Alnavis et al., 2024).

Pembangkit Listrik Tenaga Surya dapat diimplementasikan di atap, tanah, ataupun dipermukaan perairan (Cinantya et al., 2025). Pada pengimplementasian skala besar, PLTS atap dan terapung menjadi pilihan utama karena keterbatasan lahan (Pujianto et al., 2019). Pada pengimplementasian PLTS atap, adanya bayangan pohon dan bangunan akan mengurangi efisiensi panel surya (Karjadi, 2025). Oleh karena itu, pengimplementasian PLTS terapung lebih unggul karena minim bayangan yang menutupi panel surya dan mendapatkan efek pendinginan air yang meningkatkan kinerja panel yang dapat mengubah 4-18% energi surya menjadi listrik (Cinantya et al., 2025). Untuk meningkatkan efisiensinya, dikembangkan panel surya bifasial yang dapat menangkap cahaya dari dua sisi dan mampu meningkatkan efisiensi hingga 14-18% (Pujianto et al., 2019).

Berdasarkan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) tahun 2024, Indonesia memiliki 292 bendungan (Prabawanti et al., 2025) dan reservoir/waduk dengan luas sekitar ±108.183 hektar (Rinaldi & Mulyono, 2021). Saat ini, daerah waduk banyak dimanfaatkan untuk keperluan pariwisata, olahraga air, dan perikanan baik dalam keramba maupun tambak (Rinaldi & Mulyono, 2021). Di Indonesia, masih sedikit wilayah yang menerapkan PLTS terapung. Berdasarkan data tersebut, dengan kombinasi panel surya terapung dan teknologi bifacial, PLTS terapung bifacial menjadi opsi paling optimal untuk memanfaatkan daerah waduk sebagai PLTS penghasil energi listrik yang berkelanjutan (Ganesan et al., 2023).

Meskipun penelitian mengenai Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) terapung maupun panel surya bifacial telah banyak dilaporkan, sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada evaluasi performa sistem pada skala pembangkit atau instalasi komersial dengan parameter utama berupa efisiensi konversi energi dan produksi daya (Hidayat et al., 2021). Selain itu, kajian mengenai pemanfaatan panel surya bifacial pada area keramba di waduk masih relatif terbatas, terutama yang mengombinasikan analisis pengaruh media reflektor terhadap performa panel dengan sistem pemantauan parameter kelistrikan secara real-time (Cosgun & Demir, 2024). Dengan demikian, masih terdapat kesenjangan penelitian terkait implementasi PLTS terapung bifacial pada skala aplikasi keramba yang mempertimbangkan karakteristik lingkungan perairan sebagai faktor yang berpotensi memengaruhi performa system (Wibowo et al., 2024).

Berdasarkan kesenjangan tersebut, kebaruan penelitian ini terletak pada perancangan dan implementasi sistem PLTS terapung berbasis panel surya bifacial yang diaplikasikan pada keramba di Waduk Cengklik, disertai evaluasi pengaruh tiga jenis media reflektor, yaitu air, seng, dan galvalum, terhadap karakteristik keluaran panel surya. Selain itu, penelitian ini mengintegrasikan sistem monitoring berbasis Arduino Uno menggunakan sensor BH1750 dan PZEM-004T untuk memantau intensitas radiasi matahari serta parameter kelistrikan secara real-time (Arucu, 2026). Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi sebagai referensi dalam pengembangan sistem PLTS terapung bifacial skala kecil yang adaptif terhadap kebutuhan energi pada sektor keramba alas permukaan di kawasan waduk (Kalmani et al., 2026).

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan dengan tujuan menciptakan PLTS berupa panel surya terapung bifacial yang mudah dalam sistem perancangan dan kontruksi pada permukaan waduk serta dapat menghasilkan daya minimal 50 Watt. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menganalisis kinerja PLTS berbasis panel surya terapung bifacial secara real-time dan konsisten di lingkungan waduk dengan intensitas radiasi matahari yang bervariasi (Bening et al., 2025). Dengan adanya perancangan PLTS berbasis panel surya terapung bifacial di kawasan waduk ini, diharapkan dapat dihasilkan sistem yang mampu memenuhi kebutuhan energi listrik masyarakat dengan jumlah modul yang lebih sedikit, desain yang lebih praktis dan ekonomis, serta tetap sesuai dengan kondisi lingkungan waduk.

## METODE

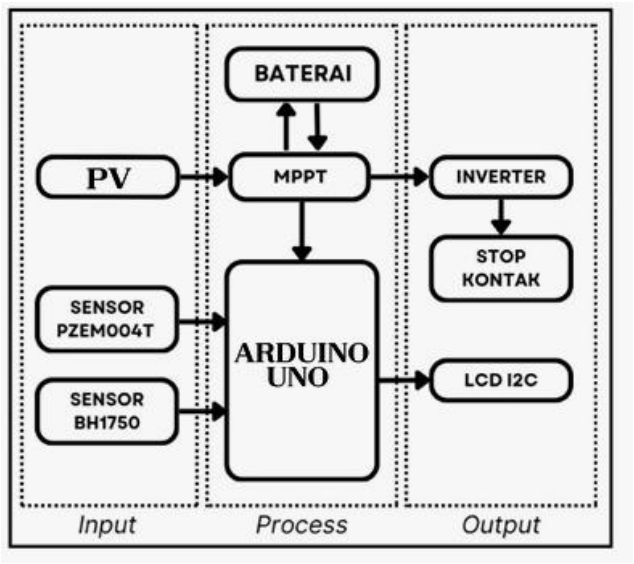
Pada penelitian ini dilakukan perancangan dan implementasi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) terapung berbasis panel surya bifacial yang diterapkan pada keramba

di Waduk Cengklik. Sistem yang dikembangkan menggunakan panel surya bifacial berkapasitas 20 Wp, inverter berdaya 150 W, baterai berkapasitas 5 Ah, dan Solar Charge Controller (SCC) berkapasitas 120 W, dengan beban pengujian sebesar 50 W yaitu *charger HP*, lampu LED, kipas angin, Jarak antara panel surya dan media reflektor ditetapkan sekitar ±90 cm, sedangkan sudut kemiringan panel dibuat dapat disesuaikan sesuai kebutuhan pengujian. Pengambilan data dilakukan pada pukul 10.00–14.30 WIB dengan lima kali replikasi pada setiap kondisi pengujian untuk memperoleh data yang lebih representatif. Seluruh pengujian dilaksanakan pada kondisi cuaca cerah berawan untuk mengevaluasi kinerja sistem terhadap variasi intensitas radiasi matahari serta memastikan sistem dapat beroperasi secara optimal.




**Gambar 1. *Flowchart* Penelitian**

Penelitian diawali dengan studi literatur mengenai teknologi PLTS terapung, panel surya *bifacial*, *Solar Charge Controller* (SSC), inverter, baterai, sensor BH1750, sensor PZEM-004T, serta mikrokontroler Arduino Uno sebagai dasar dalam proses perancangan sistem. Selanjutnya dilakukan perencanaan alat yang meliputi penyusunan diagram blok, wiring diagram, dan pemrograman Arduino sebelum direalisasikan ke dalam bentuk alat. Setelah seluruh komponen selesai dirakit dan dikalibrasi, dilakukan pengujian sistem yang meliputi uji fungsional, pengujian intensitas cahaya pada beberapa waktu pengamatan, pengujian keluaran daya menggunakan sensor PZEM-004T, serta pengujian beban untuk mengetahui kestabilan suplai energi dari sistem PLTS terapung. Data hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengetahui hubungan antara intensitas radiasi matahari dengan tegangan, arus, daya, serta energi listrik yang dihasilkan, sehingga dapat dievaluasi kinerja sistem dalam memenuhi kebutuhan listrik pada keramba. Tahap akhir penelitian adalah penyusunan laporan yang memuat seluruh proses perancangan, implementasi, hasil pengujian, analisis data, dan kesimpulan penelitian.




**Gambar 2. Blok Diagram System**

Berdasarkan Gambar 2, sistem dirancang untuk memanfaatkan energi matahari sebagai sumber energi listrik alternatif dengan menggunakan panel surya bifacial yang mampu menyerap radiasi matahari dari sisi depan maupun belakang panel. Energi listrik yang dihasilkan panel surya kemudian dialirkan menuju Solar Charge Controller (SCC) untuk mengatur proses pengisian baterai, selanjutnya disimpan pada baterai sebagai sumber energi cadangan dan diteruskan ke inverter untuk mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC) sehingga dapat digunakan untuk menyuplai beban berupa lampu LED dan charger telepon seluler.

Selain sebagai sumber energi listrik, sistem juga dilengkapi dengan sistem monitoring berbasis Arduino Uno. Pengukuran intensitas radiasi matahari dilakukan menggunakan sensor BH1750, sedangkan sensor PZEM-004T digunakan untuk mengukur parameter kelistrikan berupa tegangan, arus, daya, serta energi listrik yang dihasilkan dan digunakan oleh beban. Seluruh data hasil pengukuran diproses oleh Arduino Uno dan ditampilkan pada LCD I2C sehingga kondisi sistem dapat dipantau secara real-time selama pengoperasian.

**Validasi Sensor Pzem-004t**

Sebelum digunakan pada proses pengambilan data, sensor PZEM-004T terlebih dahulu dilakukan proses validasi untuk memastikan tingkat akurasi pengukurannya. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran tegangan dan arus yang diperoleh dari sensor PZEM-004T terhadap alat ukur standar berupa multimeter digital pada beberapa kondisi pembebanan. Nilai persentase kesalahan (error) dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$Error(\%) = \left| \frac{X_{referensi} - X_{sensor}}{X_{referensi}} \right| \times 100\%$$

Persamaan (1)

dengan:

- $X_{referensi}$ = hasil pengukuran menggunakan multimeter digital.
- $X_{sensor}$ = hasil pengukuran menggunakan sensor PZEM-004T.

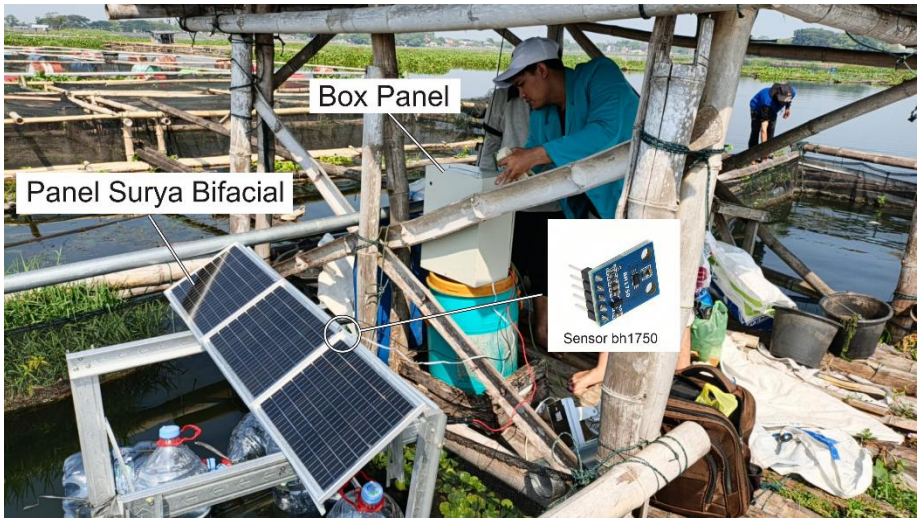
Hasil validasi digunakan sebagai dasar untuk menentukan kelayakan sensor PZEM-004T dalam proses monitoring parameter kelistrikan selama penelitian berlangsung.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Bentuk Gelombang Tegangan dan Arus Fasa A

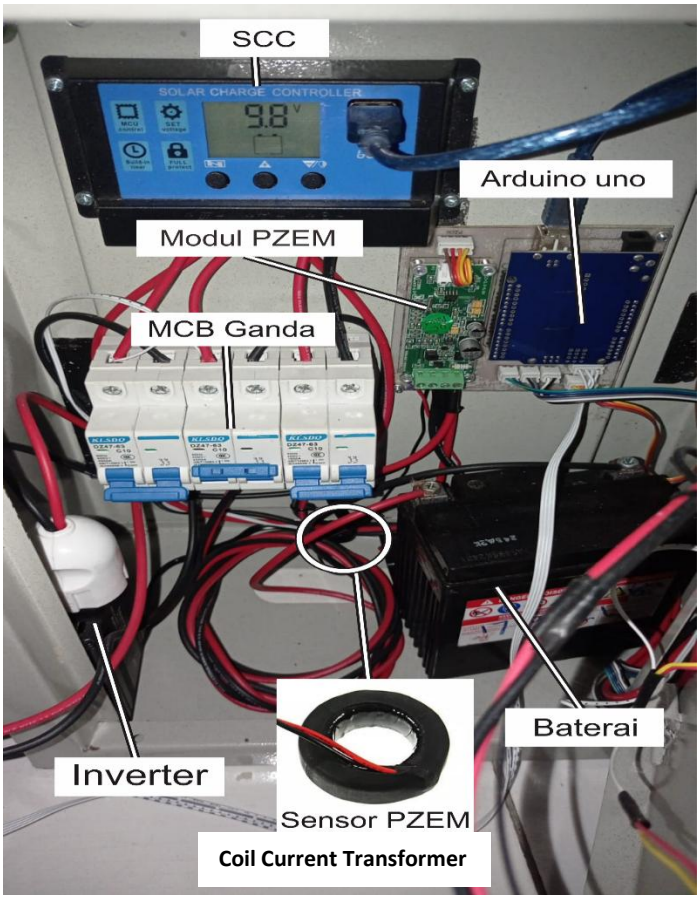
### Hasil Implementasi Sistem

Tahap implementasi menghasilkan sistem PLTS terapung berbasis panel surya bifacial yang siap digunakan untuk proses pengujian. Sistem dirancang agar seluruh komponen pembangkit, penyimpanan energi, serta perangkat monitoring dan kendali dapat bekerja secara terintegrasi dalam mendukung proses pembangkitan dan pemantauan parameter kelistrikan secara real-time. Konfigurasi dan penempatan komponen sistem ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4.




**Gambar 3. Implementasi PLTS *bifacial***

Pada Gambar 3 penempatan komponen yang berada di waduk yang digunakan,dan pada bagian luar box terdapat beberapa komponen meliputi panel surya *bifacial* sebagai sumber tegangan,sensor BH1750 sebagai pembaca lux matahari ,dan stop kontak sebagai sumber output ke beban




Gambar 4. Susunan komponen di dalam box panel

Pada bagian dalam box terdapat Arduino uno sebagai mikrokontroller,baterai sebagai penyimpan tegangan, sensor pzem digunakan untuk membaca arus,tegangan, serta daya pada beban, Lcd I2c digunakan untuk menampilkan hasil dari pembacaan sensor pzem, Voltmeter-Amperemeter Digital Dual Display yang digunakan untuk menampikan tegangan dan arus pada panel surya dan baterai, mcb yang digunakan untuk Sakelar Pemutus Sirkuit, dan ada scc yang digunakan untuk mengatur lalu lintas arus listrik dari panel surya menuju baterai dan beban. Sistem pada box tersebut menggunakan sumber dari panel surya yang menghasilkan tegangan maksimal yang dihasilkan yaitu 20 V,kemudian arduino mendapatkan sumber dari scc langsung,dan untuk Voltmeter-Amperemeter Digital Dual Display mendapatkan sumber langsung dari panel surya dan baterai.

**Validasi Sensor PZEM-004T**

Sebagai instrumen utama dalam proses pengambilan data, sensor PZEM-004T terlebih dahulu divalidasi dengan membandingkan hasil pengukurannya terhadap multimeter digital sebagai alat ukur referensi. Proses validasi dilakukan pada kondisi pembebanan yang

berbeda dengan membandingkan parameter tegangan, arus, dan daya. Persentase kesalahan dihitung menggunakan Persamaan (1) untuk mengetahui tingkat akurasi sensor.

**Tabel 1. Hasil Validasi Sensor PZEM-004T terhadap Multimeter Digital**

| No | Multimeter (Referensi) | | | Sensor | | | Persentase Error (%) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | V (Volt) | I (Ampere) | P (Watt) | V (Volt) | I (Ampere) | P (Watt) | Error V | Error I | Error P |
| 1 | 210 | 0,12 | 25,18 | 210 | 0,12 | 24,99 | 0,10% | 0,83% | 0,74% |
| 2 | 210 | 0,14 | 29,34 | 210 | 0,14 | 29,15 | 0,05% | 0,71% | 0,67% |
| 3 | 211 | 0,13 | 27,38 | 211 | 0,13 | 27,68 | 0,33% | 0,77% | 1,10% |
| 4 | 210 | 0,12 | 25,14 | 210 | 0,12 | 25,36 | 0,05% | 0,83% | 0,88% |
| 5 | 211 | 0,12 | 25,26 | 211 | 0,12 | 25,52 | 0,19% | 0,83% | 1,02% |
| **Rata-rata** | **210,0** | **0,13** | **26,46** | **210,3** | **0,13** | **26,54** | **0,14%** | **0,80%** | **0,88%** |

Berdasarkan hasil validasi yang disajikan pada Tabel 1, sensor PZEM-004T menunjukkan tingkat kesesuaian yang sangat baik terhadap hasil pengukuran multimeter digital. Nilai rata-rata tegangan yang diukur menggunakan multimeter sebesar 210,0 V, sedangkan sensor PZEM-004T menghasilkan rata-rata 210,3 V. Pada parameter arus, kedua alat menunjukkan nilai rata-rata yang sama, yaitu 0,13 A, sedangkan rata-rata daya yang diukur menggunakan multimeter sebesar 26,46 W dan sensor PZEM-004T sebesar 26,54 W.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa rata-rata persentase kesalahan pengukuran tegangan sebesar 0,14%, arus sebesar 0,80%, dan daya sebesar 0,88%. Seluruh nilai kesalahan berada di bawah 1%, yang menunjukkan bahwa sensor PZEM-004T memiliki tingkat akurasi yang tinggi dalam mengukur parameter kelistrikan. Perbedaan kecil antara hasil pengukuran sensor dan multimeter diduga dipengaruhi oleh toleransi komponen elektronik, resolusi pembacaan sensor, serta proses konversi sinyal pada modul PZEM-004T. Namun demikian, perbedaan tersebut masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima sehingga tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap hasil pengukuran.

Dengan tingkat kesalahan yang relatif rendah, sensor PZEM-004T dinilai mampu menghasilkan data pengukuran yang akurat dan konsisten untuk memantau parameter tegangan, arus, serta daya pada sistem PLTS terapung. Oleh karena itu, sensor ini layak digunakan sebagai instrumen utama dalam proses pengambilan data pada penelitian ini, sehingga data yang diperoleh dapat dijadikan dasar dalam analisis kinerja sistem PLTS terapung berbasis panel surya bifacial. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Wibowo et al. (2024) yang melakukan validasi sensor PZEM-004T pada sistem monitoring PLTS berbasis IoT. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan memiliki tingkat akurasi sebesar 96,37%, dengan akurasi pengukuran tegangan mencapai 99,86%, sehingga sistem dinyatakan sangat akurat dan andal untuk pemantauan parameter kelistrikan pada sistem fotovoltaik.

**Pengujian sifat *bi-facial***

**Tabel 2. Data pengujian bifacial dengan alas permukaan lembaran Seng**

| Waktu | Radiasi (W/m²) | PL (Panel Listrik / Surya) | | | Batt (Baterai) | | | Beban | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Waktu | | V (Volt) | I (Ampere) | P (Watt) | V (Volt) | I (Ampere) | P (Watt) | V (Volt) | I (Ampere) | P (Watt) |
| 10:00 | 337 | 12,04 | 2,70 | 32,51 | 11,80 | 1,32 | 15,58 | 221,00 | 0,18 | 39,78 |
| 10:30 | 322 | 12,10 | 2,70 | 32,67 | 12,10 | 1,42 | 17,18 | 220,00 | 0,19 | 41,80 |
| 11:00 | 352 | 12,00 | 2,52 | 30,24 | 12,00 | 1,35 | 16,20 | 218,00 | 0,17 | 37,06 |
| 11:30 | 349 | 12,04 | 2,87 | 34,55 | 12,30 | 1,08 | 13,28 | 219,00 | 0,20 | 43,80 |
| 12:00 | 354 | 12,03 | 2,53 | 30,44 | 12,50 | 1,09 | 13,63 | 221,00 | 0,19 | 41,99 |
| 12:30 | 332 | 10,90 | 3,21 | 34,99 | 10,90 | 1,41 | 15,37 | 224,00 | 0,20 | 44,80 |
| 13:00 | 329 | 10,80 | 3,26 | 35,21 | 10,90 | 1,30 | 14,17 | 223,00 | 0,20 | 44,60 |
| 13:30 | 317 | 10,90 | 3,00 | 32,70 | 10,90 | 1,90 | 20,71 | 210,00 | 0,22 | 46,20 |
| 14:00 | 314 | 11,00 | 2,88 | 31,68 | 11,01 | 1,92 | 21,14 | 206,00 | 0,21 | 43,26 |
| 14:30 | 313 | 10,90 | 2,91 | 31,72 | 11,00 | 1,91 | 21,01 | 205,00 | 0,21 | 43,05 |
| **Rata-rata** | **332** | **11,47** | **2,86** | **32,67** | **11,54** | **1,47** | **16,83** | **216,70** | **0,20** | **42,63** |

**Tabel 3. Data pengujian bifacial dengan alas permukaan lembaran Galvalum**

| Waktu | Radiasi (W/m²) | PV (Solar Panel) | | | Baterai (Batt) | | | Beban | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | V (Volt) | I (Ampere) | P (Watt) | V (Volt) | I (Ampere) | P (Watt) | V (Volt) | I (Ampere) | P (Watt) |
| 10:00 | 325 | 12,02 | 2,720 | 32,69 | 11,30 | 1,230 | 13,90 | 231 | 0,18 | 41,58 |
| 10:30 | 333 | 12,02 | 3,060 | 36,78 | 11,30 | 1,050 | 11,87 | 220 | 0,18 | 39,60 |
| 11:00 | 327 | 12,09 | 2,560 | 30,95 | 11,30 | 1,100 | 12,43 | 219 | 0,17 | 37,23 |
| 11:30 | 326 | 11,40 | 2,970 | 33,86 | 11,30 | 1,080 | 12,20 | 221 | 0,18 | 39,78 |
| 12:00 | 346 | 12,20 | 2,830 | 34,53 | 12,00 | 1,080 | 12,96 | 218 | 0,18 | 39,24 |
| 12:30 | 330 | 12,90 | 2,420 | 31,22 | 12,30 | 1,010 | 12,42 | 215 | 0,18 | 38,70 |
| 13:00 | 319 | 11,20 | 3,360 | 37,63 | 11,30 | 1,570 | 17,74 | 219 | 0,21 | 45,99 |
| 13:30 | 338 | 11,20 | 3,340 | 37,41 | 11,30 | 1,530 | 17,29 | 221 | 0,22 | 48,62 |
| 14:00 | 338 | 10,90 | 3,210 | 34,99 | 11,00 | 1,194 | 13,13 | 206 | 0,21 | 43,26 |
| 14:30 | 348 | 11,40 | 3,150 | 35,91 | 11,10 | 1,167 | 12,95 | 202 | 0,20 | 40,40 |
| **Rata-rata** | **333** | **11,73** | **2,962** | **34,60** | **11,42** | **1,201** | **13,69** | **217** | **0,19** | **41,44** |

**Tabel 4. Data pengujian bifacial dengan alas permukaan Air**

| Waktu | Irradiasi (W/m²) | Panel Surya (PV) | | | Baterai (Batt) | | | Beban (Load) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | V (V) | I (A) | P (W) | V (V) | I (A) | P (W) | V (V) | I (A) | P (W) |
| 10:00 | 341 | 12,2 | 2,62 | 32,0 | 12,2 | 1,350 | 16,5 | 221 | 0,21 | 46,4 |
| 10:30 | 326 | 12,1 | 2,77 | 33,5 | 12,2 | 1,040 | 12,7 | 220 | 0,20 | 44,0 |
| 11:00 | 333 | 12,0 | 2,77 | 33,2 | 12,1 | 1,110 | 13,4 | 217 | 0,18 | 39,1 |
| 11:30 | 353 | 12,1 | 2,98 | 36,1 | 12,1 | 1,320 | 16,0 | 221 | 0,21 | 46,4 |
| 12:00 | 358 | 12,2 | 2,97 | 36,2 | 12,2 | 1,010 | 12,3 | 222 | 0,20 | 44,4 |
| 12:30 | 322 | 11,9 | 2,87 | 34,2 | 12,0 | 1,200 | 14,4 | 218 | 0,19 | 41,4 |
| 13:00 | 333 | 12,0 | 2,94 | 35,3 | 12,0 | 1,320 | 15,8 | 211 | 0,22 | 46,4 |
| 13:30 | 321 | 11,9 | 2,91 | 34,6 | 12,0 | 1,170 | 14,0 | 223 | 0,20 | 44,6 |
| 14:00 | 318 | 11,9 | 3,03 | 36,1 | 11,9 | 1,090 | 13,0 | 221 | 0,21 | 46,4 |
| 14:30 | 317 | 11,8 | 2,58 | 30,4 | 11,8 | 1,240 | 14,6 | 218 | 0,19 | 41,4 |
| **Rata - Rata** | **332** | **12,0** | **2,84** | **34,2** | **12,1** | **1,185** | **14,3** | **219** | **0,20** | **44,1** |

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh media reflektor seng, galvalum, dan air terhadap kinerja panel surya bifacial dengan konfigurasi sistem, sudut kemiringan panel, serta variasi beban yang sama. Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4, media air menunjukkan performa terbaik dengan daya beban rata-rata sebesar 44,06 W, lebih tinggi dibandingkan media seng (42,63 W) dan galvalum (41,44 W). Penggunaan media air mampu meningkatkan daya keluaran sekitar 3,33% dibandingkan seng dan 6,31% dibandingkan

galvalum. Selain itu, media air menghasilkan power losses terendah sebesar 4,38 W, sedangkan seng dan galvalum masing-masing sebesar 6,86 W dan 6,85 W. Perbedaan kinerja tersebut tidak hanya dipengaruhi oleh intensitas iradiasi karena nilai rata-rata penyinaran pada ketiga media relatif serupa, yaitu sekitar 331,70–335,93 W/m², sehingga peningkatan daya pada media air lebih berkaitan dengan karakteristik reflektor yang digunakan.

Keunggulan media air berkaitan dengan kemampuan panel surya bifacial dalam memanfaatkan radiasi pantul dari permukaan bawah panel (albedo). Pantulan cahaya dari permukaan air memberikan tambahan radiasi pada sisi belakang modul sehingga meningkatkan jumlah energi yang diterima sel surya dan berdampak pada peningkatan daya keluaran. Namun, besarnya peningkatan daya dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti kejernihan air, riak permukaan, posisi matahari, dan perubahan intensitas radiasi selama pengujian yang menyebabkan variasi rear irradiance. Hasil ini sejalan dengan penelitian Ganesan et al. (2023) yang menyatakan bahwa karakteristik permukaan reflektor berperan penting dalam meningkatkan irradiansi belakang (rear irradiance) dan kinerja panel surya bifacial.

**Pengujian kinerja harian Sistem dengan permukaan air**

Pengujian sistem PLTS terapung dilakukan untuk mengetahui pengaruh perubahan intensitas radiasi matahari terhadap kinerja panel surya pada dua periode pengamatan, yaitu pagi sampai sore, dan sore sampai pagi hari. Pengambilan data dilakukan menggunakan sensor BH1750 untuk mengukur intensitas radiasi matahari, sedangkan parameter listrik berupa tegangan, arus, dan daya diukur menggunakan sensor PZEM-004T secara real-time. Pengamatan pada dua rentang waktu tersebut bertujuan untuk mengetahui perubahan performa sistem akibat perbedaan posisi matahari dan kondisi lingkungan selama satu hari,pengujian tersebut dilakukan selama 3 hari dan berikut hasil pengujian yang disajikan dalam tabel tabel dibawah ini sebagai dasar performa panel surya bifacial terhadap intensitas radiasi matahari.

**Tabel 5. Data pengujian sistem hari pertama pagi hingga sore**

| Waktu | Irradiasi (W/m²) | Panel Surya (PV) | | | Baterai (Batt) | | | Beban (Load) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | V (V) | I (A) | P (W) | V (V) | I (A) | P (W) | V (V) | I (A) | P (W) |
| 10:00 | 358 | 12,9 | 2,51 | 32,4 | 12,2 | 1,280 | 15,6 | 205 | 0,22 | 45,1 |
| 10:30 | 336 | 11,8 | 2,67 | 31,5 | 11,9 | 1,270 | 15,1 | 219 | 0,18 | 39,4 |
| 11:00 | 356 | 12,0 | 2,53 | 30,4 | 12,0 | 1,240 | 14,9 | 225 | 0,17 | 38,3 |
| 11:30 | 341 | 12,0 | 2,58 | 31,0 | 12,0 | 1,250 | 15,0 | 218 | 0,20 | 43,6 |
| 12:00 | 359 | 12,5 | 2,52 | 31,5 | 12,4 | 1,380 | 17,1 | 224 | 0,19 | 42,6 |
| 12:30 | 361 | 12,6 | 2,48 | 31,2 | 12,7 | 1,010 | 12,8 | 222 | 0,18 | 40,0 |
| 13:00 | 361 | 12,6 | 2,41 | 30,4 | 12,6 | 1,260 | 15,9 | 221 | 0,19 | 40,9 |
| 13:30 | 312 | 12,1 | 2,65 | 32,1 | 11,9 | 1,420 | 16,9 | 222 | 0,20 | 44,4 |
| 14:00 | 364 | 12,7 | 2,57 | 32,6 | 12,6 | 1,150 | 14,5 | 220 | 0,19 | 41,8 |
| 14:30 | 337 | 11,9 | 2,92 | 34,7 | 12,0 | 1,170 | 14,0 | 223 | 0,20 | 44,6 |
| **Rata - Rata** | **349** | **12,3** | **2,58** | **31,8** | **12,2** | **1,243** | **15,2** | **220** | **0,19** | **42,1** |

**Tabel 6. Data pengujian sistem hari pertama sore hingga malam**

| Waktu | Irradiasi ($W/m^2$) | Panel Surya (PV) | | | Baterai (Batt) | | | Beban (Load) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | V (V) | I (A) | P (W) | V (V) | I (A) | P (W) | V (V) | I (A) | P (W) |
| 16:35 | 35 | 11,6 | 0,00 | 0,0 | 12,1 | 2,380 | 28,8 | 225 | 0,11 | 24,8 |
| 17:00 | 7 | 11,6 | 0,00 | 0,0 | 11,9 | 2,430 | 28,9 | 225 | 0,10 | 22,5 |
| 17:30 | 7 | 10,7 | 0,00 | 0,0 | 11,9 | 2,290 | 27,3 | 228 | 0,09 | 20,5 |
| 18:00 | 6 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 11,8 | 2,320 | 27,4 | 228 | 0,09 | 20,5 |
| 18:30 | 0 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 11,8 | 1,940 | 22,9 | 223 | 0,08 | 17,8 |
| 19:00 | 0 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 11,7 | 1,790 | 20,9 | 223 | 0,08 | 17,8 |
| 19:30 | 0 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 11,6 | 1,640 | 19,0 | 219 | 0,07 | 15,3 |
| 20:00 | 0 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 11,5 | 1,450 | 16,7 | 213 | 0,06 | 12,8 |
| 20:30 | 0 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 11,4 | 1,450 | 16,5 | 210 | 0,05 | 10,5 |
| 21:30 | 0 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 11,3 | 1,400 | 15,8 | 214 | 0,05 | 10,7 |
| **Rata - Rata** | **6** | **3,4** | **0,00** | **0,0** | **11,7** | **1,909** | **22,4** | **221** | **0,08** | **17,3** |

**Tabel 7. Data pengujian hari kedua pagi hingga sore**

| Waktu | Irradiasi ($W/m^2$) | Panel Surya (PV) | | | Baterai (Batt) | | | Beban (Load) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | V (V) | I (A) | P (W) | V (V) | I (A) | P (W) | V (V) | I (A) | P (W) |
| 10:00 | 358 | 12,1 | 2,48 | 30,0 | 12,3 | 1,140 | 14,0 | 213 | 0,19 | 40,5 |
| 10:30 | 336 | 11,4 | 2,63 | 30,0 | 11,7 | 1,420 | 16,6 | 217 | 0,19 | 41,2 |
| 11:00 | 356 | 12,3 | 2,63 | 32,3 | 11,8 | 1,390 | 16,4 | 221 | 0,20 | 44,2 |
| 11:30 | 339 | 11,9 | 2,64 | 31,4 | 12,1 | 1,270 | 15,4 | 205 | 0,21 | 43,1 |
| 12:00 | 341 | 11,9 | 2,64 | 31,4 | 12,0 | 1,290 | 15,5 | 219 | 0,19 | 41,6 |
| 12:30 | 326 | 11,8 | 2,55 | 30,1 | 12,0 | 1,240 | 14,9 | 221 | 0,18 | 39,8 |
| 13:00 | 342 | 11,9 | 2,57 | 30,6 | 12,1 | 1,500 | 18,2 | 217 | 0,21 | 45,6 |
| 13:30 | 359 | 12,1 | 2,51 | 30,4 | 12,0 | 1,530 | 18,4 | 218 | 0,19 | 41,4 |
| 14:00 | 356 | 12,0 | 2,51 | 30,1 | 12,0 | 1,230 | 14,8 | 216 | 0,19 | 41,0 |
| 14:30 | 361 | 12,3 | 2,53 | 31,1 | 12,2 | 1,240 | 15,1 | 218 | 0,18 | 39,2 |
| **Rata - Rata** | **347** | **12,0** | **2,57** | **30,7** | **12,0** | **1,325** | **15,9** | **217** | **0,19** | **41,8** |

**Tabel 8. Data pengujian hari kedua sore hingga malam**

| Waktu | Irradiasi ($W/m^2$) | Panel Surya (PV) | | | Baterai (Batt) | | | Beban (Load) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | V (V) | I (A) | P (W) | V (V) | I (A) | P (W) | V (V) | I (A) | P (W) |
| 17:00 | 36 | 11,6 | 0,00 | 0,0 | 12,2 | 2,360 | 28,8 | 219 | 0,11 | 24,1 |
| 17:30 | 9 | 10,5 | 0,00 | 0,0 | 12,1 | 2,030 | 24,6 | 222 | 0,09 | 20,0 |
| 18:00 | 0 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 12,0 | 2,320 | 27,9 | 210 | 0,10 | 21,0 |
| 18:30 | 0 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 11,8 | 2,430 | 28,7 | 210 | 0,10 | 21,0 |
| 19:00 | 0 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 11,7 | 2,010 | 23,5 | 206 | 0,10 | 20,6 |
| 19:30 | 0 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 11,5 | 1,940 | 22,3 | 212 | 0,08 | 17,0 |
| 20:00 | 0 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 11,5 | 1,450 | 16,6 | 213 | 0,05 | 11,3 |
| 20:30 | 0 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 11,4 | 1,450 | 16,6 | 211 | 0,05 | 10,6 |
| 21:30 | 0 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 11,3 | 1,470 | 16,6 | 209 | 0,05 | 10,5 |
| 22:00 | 0 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 11,3 | 1,410 | 15,9 | 218 | 0,05 | 10,9 |
| **Rata - Rata** | **4** | **2,2** | **0,00** | **0,0** | **11,7** | **1,887** | **22,2** | **213** | **0,08** | **16,7** |

**Tabel 9. Data pengujian hari ketiga pagi hingga sore**

| Waktu | Irradiasi ($W/m^2$) | Panel Surya (PV) | | | Baterai (Batt) | | | Beban (Load) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | V (V) | I (A) | P (W) | V (V) | I (A) | P (W) | V (V) | I (A) | P (W) |
| 10:00 | 358 | 12,5 | 2,50 | 31,3 | 12,1 | 1,210 | 14,6 | 210 | 0,20 | 42,0 |
| 10:30 | 336 | 11,6 | 2,65 | 30,7 | 11,8 | 1,340 | 15,8 | 218 | 0,18 | 39,2 |
| 11:00 | 356 | 12,1 | 2,58 | 31,2 | 11,9 | 1,310 | 15,6 | 223 | 0,18 | 40,1 |
| 11:30 | 339 | 11,9 | 2,61 | 31,1 | 12,0 | 1,260 | 15,1 | 212 | 0,20 | 42,4 |
| 12:00 | 341 | 11,8 | 2,58 | 30,4 | 12,2 | 1,340 | 16,3 | 221 | 0,19 | 42,0 |
| 12:30 | 326 | 11,9 | 2,58 | 30,7 | 12,3 | 1,120 | 13,8 | 221 | 0,18 | 39,8 |
| 13:00 | 354 | 12,2 | 2,49 | 30,4 | 12,3 | 1,380 | 17,0 | 219 | 0,20 | 43,8 |
| 13:30 | 352 | 12,0 | 2,58 | 31,0 | 11,9 | 1,470 | 17,5 | 220 | 0,19 | 41,8 |
| 14:00 | 354 | 12,3 | 2,54 | 31,2 | 12,3 | 1,190 | 14,6 | 218 | 0,19 | 41,4 |
| 14:30 | 352 | 12,1 | 2,51 | 30,4 | 12,1 | 1,200 | 14,5 | 220 | 0,18 | 39,6 |
| **Rata - Rata** | **347** | **12,0** | **2,56** | **30,8** | **12,1** | **1,282** | **15,5** | **218** | **0,19** | **41,2** |

**Tabel 10. Data pengujian hari ketiga sore hingga malam**

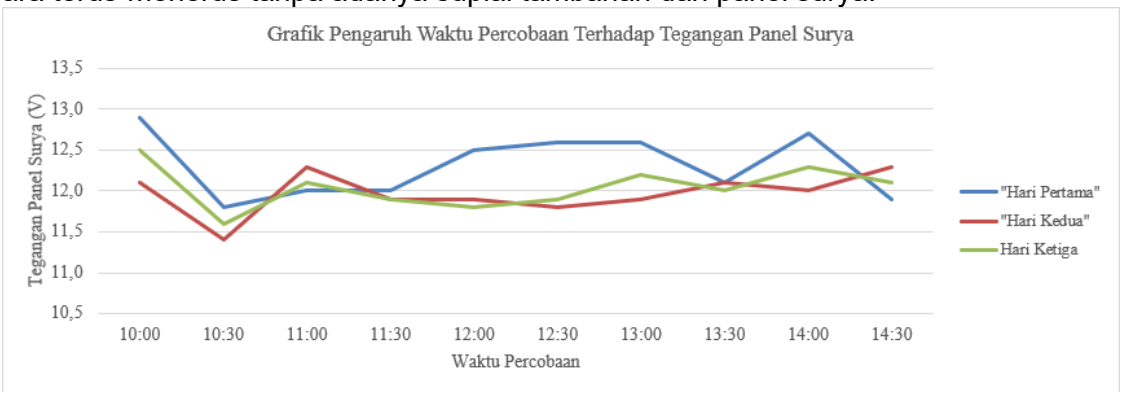
| Waktu | Irradiasi ($W/m^2$) | Panel Surya (PV) | | | Baterai (Batt) | | | Beban (Load) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | V (V) | I (A) | P (W) | V (V) | I (A) | P (W) | V (V) | I (A) | P (W) |
| 17:00 | 32 | 11,6 | 0,00 | 0,0 | 12,1 | 2,37 | 28,7 | 221 | 0,11 | 24,3 |
| 17:30 | 7 | 11 | 0,00 | 0,0 | 12,0 | 2,21 | 26,5 | 223 | 0,09 | 20,1 |
| 18:00 | 5 | 5,5 | 0,00 | 0,0 | 11,9 | 2,31 | 27,5 | 215 | 0,10 | 21,5 |
| 18:30 | 0 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 11,8 | 2,15 | 25,4 | 216 | 0,09 | 19,4 |
| 19:00 | 0 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 11,7 | 1,98 | 23,2 | 218 | 0,09 | 19,6 |
| 19:30 | 0 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 11,6 | 1,86 | 21,6 | 215 | 0,08 | 17,2 |
| 20:00 | 0 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 11,5 | 1,54 | 17,7 | 212 | 0,06 | 12,7 |
| 20:30 | 0 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 11,4 | 1,45 | 16,5 | 210 | 0,05 | 10,5 |
| 21:30 | 0 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 11,3 | 1,46 | 16,5 | 215 | 0,05 | 10,8 |
| 22:00 | 0 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 11,3 | 1,4 | 15,8 | 218 | 0,05 | 10,9 |
| **Rata - Rata** | **4** | **2,8** | **0,00** | **0,0** | **11,7** | **1,873** | **21,9** | **216** | **0,08** | **16,7** |

Berdasarkan hasil pengujian, performa panel surya bifacial menunjukkan perbedaan karakteristik keluaran pada setiap periode pengamatan yang dipengaruhi oleh perubahan intensitas radiasi matahari. Pada pengujian pagi hingga siang hari (Tabel 5, 7, dan 9), peningkatan iradiasi menyebabkan peningkatan arus dan daya keluaran panel karena semakin banyak pasangan elektron-hole yang terbentuk pada material semikonduktor silikon. Peningkatan arus tersebut berdampak langsung terhadap daya sistem sesuai hubungan P = V × I. Nilai iradiasi tertinggi pada pengujian mencapai 361 W/m² yang mampu menghasilkan tegangan panel sekitar 12,3–12,9 V dan daya beban hingga 45,1 W. Sebaliknya, saat intensitas radiasi menurun akibat kondisi cuaca dan pergerakan awan, tegangan serta daya keluaran sistem juga mengalami penurunan. Pada pengujian sore hari (Tabel 6), penurunan posisi matahari menyebabkan iradiasi berkurang hingga 0 W/m², sehingga panel tidak menghasilkan tegangan dan suplai beban sepenuhnya berasal dari baterai dengan daya keluaran 17,8 W. Hasil ini menunjukkan bahwa intensitas radiasi matahari menjadi faktor utama yang menentukan kemampuan panel surya dalam menghasilkan energi, sejalan dengan penelitian Siswanto dan Rahayu (2024) yang menyatakan bahwa peningkatan intensitas radiasi berbanding lurus dengan peningkatan arus dan daya keluaran panel surya.

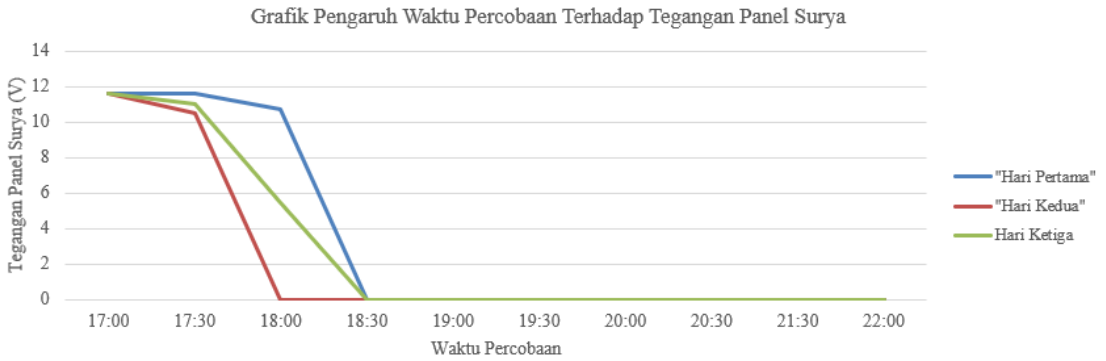
Selain intensitas radiasi langsung, kinerja panel surya bifacial juga berpotensi dipengaruhi oleh radiasi pantulan lingkungan (ground-reflected irradiance). Pemasangan panel di atas permukaan air memungkinkan terjadinya efek albedo, yaitu pantulan cahaya matahari dari permukaan air yang dapat diterima oleh sisi belakang modul bifacial sehingga berpotensi meningkatkan energi yang diserap panel. Hal ini sejalan dengan penelitian Cosgun & Demir et al. (2024) yang menjelaskan bahwa panel bifacial mampu memanfaatkan radiasi pantulan permukaan untuk meningkatkan produksi energi fotovoltaik, dengan permukaan air memiliki nilai albedo rata-rata sebesar 0,11. Namun, karena sensor BH1750 hanya mengukur intensitas cahaya dari satu arah dan tidak mengukur radiasi pada sisi belakang panel secara langsung, pengaruh albedo terhadap peningkatan performa sistem masih bersifat potensial dan belum dapat dibuktikan secara kausal. Pada pengujian sore hingga malam hari, performa sistem mengalami penurunan seiring berkurangnya intensitas cahaya matahari. Berdasarkan Tabel 8, ketika iradiasi hanya mencapai 36 W/m², panel masih menghasilkan tegangan 11,6 V, tetapi arus keluaran sudah mencapai 0 A sehingga seluruh kebutuhan beban sebesar 24,1 W disuplai oleh baterai. Ketika iradiasi mencapai 0 W/m², panel tidak menghasilkan daya dan sistem sepenuhnya bergantung pada baterai dengan daya beban sebesar 21 W.

Pada pengujian hari ketiga periode pagi hingga sore, sistem panel surya menunjukkan kinerja yang lebih stabil pada kondisi iradiasi tinggi. Berdasarkan Tabel 9, nilai iradiasi maksimum sebesar 358 W/m² mampu menghasilkan tegangan panel 12,5 V, arus 2,50 A, dan daya keluaran 31,3 W, sedangkan baterai menghasilkan daya sebesar 14,6 W untuk mendukung suplai beban hingga 42,0 W. Nilai rata-rata iradiasi sebesar 347 W/m² dengan arus keluaran panel yang stabil menunjukkan bahwa ketersediaan cahaya matahari berpengaruh signifikan terhadap kemampuan pembangkitan energi. Namun, pada pengujian sore hingga malam hari (Tabel 10), kinerja panel kembali menurun karena hilangnya insolasi. Meskipun iradiasi masih mencapai 32 W/m², panel tidak lagi menghasilkan arus sehingga suplai daya sepenuhnya berasal dari baterai. Kondisi tersebut menyebabkan tegangan baterai

mengalami penurunan bertahap dari 12,1 V hingga 11,3 V akibat proses pelepasan energi secara terus-menerus tanpa adanya suplai tambahan dari panel surya.




**Grafik 1.Grafik pengujian pagi hingga sore**




**Grafik 2. Grafik pengujian sore hingga malam**

Berdasarkan Grafik 1, karakteristik tegangan keluaran panel surya selama periode pengamatan pukul 10.00–14.30 WIB menunjukkan pola fluktuasi yang mengikuti perubahan kondisi iradiasi matahari. Pada awal pengamatan, tegangan panel berada pada kondisi yang relatif tinggi, kemudian mengalami penurunan pada pukul 10.30 WIB sebelum kembali meningkat hingga mencapai nilai maksimum sebesar 12,9 V pada saat intensitas radiasi matahari mencapai kondisi tertinggi. Setelah melewati periode puncak iradiasi, tegangan panel cenderung stabil dengan sedikit fluktuasi hingga akhir pengujian. Pola tersebut menunjukkan bahwa perubahan tegangan keluaran panel surya sangat dipengaruhi oleh besarnya energi radiasi matahari yang diterima permukaan modul selama proses konversi energi fotovoltaik.

Penurunan tegangan yang terjadi pada pukul 10.30 WIB diduga berkaitan dengan berkurangnya intensitas radiasi matahari akibat perubahan kondisi atmosfer selama proses pengujian. Berkurangnya energi radiasi yang diterima permukaan panel menyebabkan jumlah foton yang mengenai material semikonduktor menjadi lebih sedikit sehingga proses pembangkitan pasangan elektron-hole tidak berlangsung secara optimal. Kondisi tersebut berdampak pada menurunnya kemampuan panel surya dalam menghasilkan energi listrik, yang ditunjukkan dengan penurunan nilai tegangan keluaran. Setelah intensitas radiasi

kembali meningkat, proses konversi energi berlangsung lebih efektif sehingga tegangan panel kembali mengalami peningkatan dan mencapai kondisi yang relatif stabil.

Sebaliknya, Grafik 2 menunjukkan bahwa tegangan keluaran panel surya mengalami penurunan yang sangat signifikan selama periode transisi sore hingga malam hari (pukul 17.00–22.00 WIB) seiring berkurangnya intensitas radiasi matahari. Pada pukul 17.00 WIB, panel surya masih menghasilkan tegangan sekitar 11,6 V pada seluruh hari pengujian. Namun, setelah pukul 17.30 WIB tegangan menurun secara drastis hingga mencapai 0 V pada pukul 18.00 WIB untuk Hari kedua, sedangkan pada hari Pertama dan hari ketiga tegangan baru mencapai 0 V pada pukul 18.30 WIB. Perbedaan laju penurunan tersebut diduga dipengaruhi oleh variasi kondisi atmosfer selama pengujian yang menyebabkan perbedaan intensitas radiasi matahari yang diterima oleh permukaan panel surya.

Setelah pukul 18.30 WIB hingga akhir pengamatan, tegangan panel surya tetap berada pada nilai 0 V pada seluruh hari pengujian. Kondisi ini menunjukkan bahwa intensitas radiasi matahari telah berada di bawah ambang yang diperlukan untuk mengaktifkan proses konversi energi pada material semikonduktor panel surya, sehingga efek fotovoltaik tidak lagi berlangsung dan panel surya tidak menghasilkan tegangan listrik. Hasil penelitian ini sesuai dengan prinsip kerja sel fotovoltaik yang menyatakan bahwa pembangkitan energi listrik hanya terjadi apabila tersedia energi foton yang cukup untuk mengeksitasi elektron pada material semikonduktor. Oleh karena itu, penurunan tegangan hingga mencapai 0 V pada malam hari merupakan karakteristik operasional yang normal dan menunjukkan bahwa sistem panel surya bekerja sesuai dengan prinsip dasar konversi energi fotovoltaik.

Fenomena tersebut menunjukkan bahwa karakteristik tegangan panel surya tidak hanya dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari, tetapi juga oleh kondisi lingkungan selama proses pengoperasian. Hasil penelitian ini sejalan dengan Kalmani et al. (2026), yang menjelaskan bahwa performa sistem *floating photovoltaic* dipengaruhi oleh variasi kondisi mikroklimat, seperti intensitas radiasi matahari, temperatur, kelembapan udara, dan kecepatan angin. Variasi parameter tersebut memengaruhi temperatur operasi modul sehingga berdampak pada karakteristik tegangan, efisiensi konversi energi, dan performa sistem secara keseluruhan.

Selain faktor lingkungan, kestabilan tegangan juga dipengaruhi oleh karakteristik termal sistem PLTS terapung. Efek pendinginan alami (*natural cooling effect*) dari media air membantu menurunkan temperatur operasi modul sehingga rugi-rugi termal dapat diminimalkan dan karakteristik listrik panel tetap optimal. Hal ini diperkuat oleh Arucu (2026), yang menyatakan bahwa efek pendinginan pada sistem *floating photovoltaic* mampu mempertahankan nilai *open-circuit voltage* (Voc) serta meningkatkan daya maksimum dibandingkan sistem fotovoltaik konvensional.

Berdasarkan hasil pengujian, tegangan panel surya tetap berada pada kisaran 12 V selama periode intensitas radiasi tinggi meskipun terjadi fluktuasi kondisi lingkungan. Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi PLTS terapung yang diterapkan mampu mempertahankan kestabilan tegangan selama proses pengoperasian. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa performa tegangan panel surya merupakan hasil interaksi antara intensitas radiasi matahari dan kondisi termal modul, sehingga penerapan panel surya *bifacial*

pada sistem PLTS terapung berpotensi meningkatkan keandalan penyediaan energi listrik pada area keramba waduk.

## SIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) terapung berbasis panel surya bifacial pada keramba di Waduk Cengklik dengan komponen utama berupa panel surya, baterai, dan Solar Charge Controller (SCC). Hasil validasi menunjukkan bahwa sensor PZEM-004T memiliki akurasi pengukuran yang baik dengan rata-rata kesalahan tegangan 0,14%, arus 0,80%, dan daya 0,88%. Pengujian menunjukkan bahwa media air menghasilkan performa terbaik dengan rata-rata daya beban sebesar 44,06 W dan rugi-rugi daya terendah sebesar 4,38 W dibandingkan media seng dan galvalum, yang menunjukkan potensi pemanfaatan efek albedo pada panel bifacial. Kinerja sistem sangat dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari, di mana peningkatan iradiasi meningkatkan tegangan, arus, dan daya keluaran, sedangkan saat iradiasi menurun suplai energi dialihkan ke baterai. Sistem mampu menghasilkan daya maksimum 60 W, melampaui target penelitian sebesar 50 W, sehingga tujuan perancangan berhasil tercapai. Namun, penelitian ini masih terbatas pada durasi pengujian tiga hari dan belum mengukur radiasi sisi belakang panel secara langsung, sehingga penelitian selanjutnya disarankan melakukan pengujian jangka panjang serta mengevaluasi pengaruh faktor lingkungan terhadap performa PLTS terapung bifacial.

## DAFTAR PUSTAKA

Achmadany, F. G., Saputra, G. S., & Nurpulaela, L. (2024). Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Pada Sistem Lightning Protection And Monitoring Device Fajar. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan, 10*(21), 290–303.

Alnavis, N. B., Wirawan, R. R., Solihah, K. I., & Nugroho, V. H. (2024). Energi Listrik Berkelanjutan: Potensi Dan Tantangan Penyediaan Energi Listrik Di Indonesia. *Journal Of Innovation Materials, Energy, And Sustainable Engineering*, *1*(2), 119–139. Https://Doi.Org/10.61511/Jimese.V1i2.2024.544

Arucu, M. (2026). Electrothermal Coupling In Floating Photovoltaic Systems : A Modi Ed Shockley Framework For Performance Enhancement. *Acta Physica Polonica A*, *149*(4). Https://Doi.Org/10.12693/Aphyspola.149.157

Bening, A. K., Nadhiroh, N., Satrio, G. S., Putra, H. R., & Catur, M. D. (2025). Analisa Perbandingan Suhu Panel Dan Daya Plts Terapung Vsgrounded Berbasis Iot. *Jurnal Otomasi Kelistrikan Dan Energi Terbarukan*, *7*, 18–26.

Cinantya, P., Widiastuti, H., & Lumombo, L. (2025). Studi Kelayakan Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terapung Pada Waduk Sumber Air Minum Di Batam. *Jurnal Profesi Insinyur Indonesia*, *2*(2), 65–70.

Cosgun, A. E., & Demir, H. (2024). Investigating The Effect Of Albedo In Simulation-Based Floating Photovoltaic System: 1 Mw Bifacial Floating Photovoltaic System Design. *Energies*, *17*(4). Https://Doi.Org/10.3390/En17040959

Farrar, L. W., Bahaj, A. S., James, P., Anwar, A., & Amdar, N. (2022). Floating Solar Pv To Reduce Water Evaporation In Water Stressed Regions And Powering Water Pumping:

Case Study Jordan. *Energy Conversion And Management*, *260*(1), 1–16. Https://Doi.Org/10.1016/J.Enconman.2022.115598

Ganesan, K., Winston, D. P., Sugumar, S., & Jegan, S. (2023). Performance Analysis Of N-Type Pert Bifacial Solar Pv Module Under Diverse Albedo Conditions. *Solar Energy*, *252*(June 2022), 81–90. Https://Doi.Org/10.1016/J.Solener.2023.01.020

Garrod, A., & Ghosh, A. (2023). A Review Of Bifacial Solar Photovoltaic Applications. *Front Energy*, *17*(1), 704–726.

Hammoumi, A. El, Chita, S., Motahhir, S., & Ghzizal, A. El. (2022). Solar Pv Energy: From Material To Use, And The Most Commonly Used Techniques To Maximize The Power Output Of Pv Systems: A Focus On Solar Trackers And Floating Solar Panels. *Energy Reports*, *8*(1), 11992–12010.

Harahap, P., Pasaribu, F. I., & Adam, M. (2020). Prototype Measuring Device For Electric Load In Households Using The Pzem-004t Sensor. *Budapest International Research In Exact Science*, *2*(3), 347–361. Https://Doi.Org/10.33258/Birex.V2i3.1074

Herlambang, Y. D., Prasetiyo, B., Wahyono, Apriandi, N., Marliyanti, & Sutanto, B. (2023). Unjukkerja Panel Surya Tipe Terapung Untuk Pembangkit Listrik. *Jurnal Rekayasa Mesin*, *18*(3), 435–444.

Hidayat, T. N., Rohmat, S., & Sutrisno, S. (2021). Analisis Output Daya Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya Dengan Kapasitas 10wp, 20wp, Dan 30wp. *Jurnal Crankshaft*, *4*(2), 9–18. Https://Doi.Org/10.24176/Crankshaft.V4i2.6013

Kalmani, S., Goswami, A., Bethel, B., & Kumba, K. (2026). Performance Analysis Of Floating Solar Pv Performance Under Microclimatic Variations. *Cogent Engineering*, *13*(1). Https://Doi.Org/10.1080/23311916.2026.2640730

Karjadi, M. (2025). Optimalisasi Efisiensi Panel Surya Dalam Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Plts) Skala Rumah Tangga. *Ranah Research: Journal Of Multidisciplinary Research And Development*, *7*(4), 3002–3010.

Kusuma, H. A., Refly, S., & Pramana, R. (2024). Implementasi Sistem Penerangan Dan Proteksi Panel Surya Bugis Di Kota Kotamadya Tanjung Pinang. *Jurnal Hilirisasi Ipteks*, *7*(3), 288–300.

Liestyowati, D., Rachman, I., Firmansyah, E., & Mujiburrohman. (2022). Rancangan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Plts) Berkapasitas 100 Wp Dengan Inverter 1000 Watt. *Insologi: Jurnal Sains Dan Teknologi*, *1*(5), 623–634. Https://Doi.Org/10.55123/Insologi.V1i5.1027

Mangatur, C. O., Setiawan, I. N., & Kumara, I. N. S. (2023). Studi Potensi Dan Perancangan Plts Apung Di Danau Batur Guna Mendukung Bali Clean Energy. *Jurnal Spektrum*, *10*(4), 317–328.

Mouhib, E., Micheli, L., Almonacid, F. M., & Fernandez, E. F. (2022). Overview Of The Fundamentals And Applications Of Bifacial Photovoltaic Technology: Agrivoltaics And Aquavoltaics. *Energies*, *15*(23), 1–30.

Muntoha, G. B., Afifah, D. S. N., & Hayuhantika, D. (2023). Potensi Pantai Sine Kabupaten Tulungagung Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Plts). *Jurnal Riset Rekayasa Elektro*, *5*(2), 115. Https://Doi.Org/10.30595/Jrre.V5i2.19650

Nava-Pintor, J. A., Alcalá-Rodríguez, U. E., Guerrero-Osuna, H. A., Mata-Romero, M. E., Lopez-Neri, E., García-Vázquez, F., Solís-Sánchez, L. O., Carrasco-Navarro, R., & Luque-Vega, L. F. (2025). Development And Evaluation Of Solar Radiation Sensor Using Cost-Effective Light Sensors And Machine Learning Techniques. *Technologies*, *13*(5), 1–31. Https://Doi.Org/10.3390/Technologies13050182

Prabawanti, I. I. D. A. A., Juwono, P. T., & Saputra, A. W. (2025). Analisis Penambahan Volume Waduk Dan Peningkatan Nilai Manfaat Operasi Waduk Akibat Penggunaan Plts Terapung Di Waduk Gerokgak. *Stabilita: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, *13*(2), 69–74.

Pujianto, Aripriantoni, Sakey, P. A., & Waskito, W. (2019). *Kinerja Sistem Array 13 Plts Terapung 145 Mw Ac Cirata*. 2–11.

Rinaldi, A., & Mulyono, J. (2021). Peluang Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Plts) Pada Genangan Waduk. *Jurnal Infrastruktur Kementerian Pupr*, *07*(01), 1–11.

Riskiono, S. D., Oktaviani, L., & Sari, F. M. (2021). Implementation Of The School Solar Panel System To Support The Availability Of Electricity Supply At Sdn 4 Mesuji Timur. *Ijiscs (International Journal Of Information System And Computer Science)*, *5*(1), 34. Https://Doi.Org/10.56327/Ijiscs.V5i1.960

Tina, G. M., Osama, A., Mannino, G., Gagliano, A., Cucuzza, A. V., & Bizzari, F. (2025). Thermal Comparison Of Floating Bifacial And Monofacial Photovoltaic Modules Considering Two Laying Configuration. *Applied Energy*, *389*(3), 1–20.

Wibowo, L., Wahyusari, R., Yuwono, T., & Shofia, A. (2024). Iot-Based High-Accuracy Monitoring System For On-Grid Photovoltaic Power System Using Nodemcu Esp8266 And Pzem004t. *Journal Of Mechatronics, Electrical Power, And Vehicular Technology*, *15*(2), 230–241. Https://Doi.Org/10.55981/J.Mev.2024.823

Yasin, M., Apriaskar, E., & Djuniadi. (2023). Simulasi Monitoring Arus, Tegangan, Dan Daya Panel Surya. *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, *23*(2), 87–92