

Implementasi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya untuk Mendukung Operasional Sistem Prototipe Aquaponik

Erik Agustian Yulanda^{*1}, Karel Octavianus Bachri², Nur Rahman³, Agi Tama⁴, Joko Tri Susilo⁵

^{1,2}Program Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya
^{1,2}Jl. Raya Cisauk Lapan, Sampora, Kec. Cisauk, Kab. Tangerang, Banten 15345, Indonesia
^{1,3,4,5}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Pamulang
^{1,3,4,5}Jl. Raya Puspiptek No. 46, Buaran, Serpong, Tangerang Selatan, Banten 15316, Indonesia

¹dosen02636@unpam.ac.id
²karel.bachri@atmajaya.ac.id
³nurahman0681@gmail.com
⁴dosen02635@unpam.ac.id
⁵dosen02659@unpam.ac.id

INFORMASI ARTIKEL

diajukan : 01-02-2026
revisi : 08-02-2026
diterima : 12-03-2026
dipublish : 30-06-2026

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai sumber energi utama dalam operasional sistem aquaponik skala *prototipe*. Sistem dirancang secara *off-grid*, di mana seluruh kebutuhan energi diperoleh dari panel surya berdaya 120 Wp yang terhubung dengan *Solar Charge Controller* (SCC) tipe MPPT, baterai 12 V 35 Ah, dan sistem proteksi *Low Voltage Disconnect* (LVD). Beban utama sistem adalah pompa sirkulasi air dan unit kendali berbasis Arduino Mega. Pengujian dilakukan selama tujuh hari untuk mengamati performa tegangan, arus, dan daya keluaran panel surya serta efisiensi distribusi energi ke beban. Hasil menunjukkan bahwa tegangan panel surya berkisar antara 10,9–18,25 VDC dengan arus antara 1,3–5,5 A. Daya maksimum yang dihasilkan mencapai 96,73 W dengan rata-rata 47,85 W. Daya yang dikonsumsi sistem aquaponik rata-rata sebesar 36,93 W, menandakan sistem bekerja secara efisien dengan daya keluaran panel lebih besar daripada konsumsi beban. Implementasi sistem PLTS ini berhasil menyediakan suplai daya yang cukup untuk mendukung operasional aquaponik secara berkelanjutan tanpa ketergantungan terhadap jaringan listrik eksternal.

Kata Kunci: PLTS; Aquaponik; Energi Terbarukan; Off-Grid; Arduino Mega; Efisiensi Energi.

PENDAHULUAN

Pemanfaatan energi terbarukan semakin menjadi prioritas dalam mendukung keberlanjutan sistem pertanian modern. Salah satu pendekatan inovatif adalah integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dengan sistem aquaponik, yaitu sistem yang menggabungkan budidaya ikan dan penanaman tanaman dalam suatu ekosistem sirkulasi tertutup. Sistem aquaponik menawarkan efisiensi sumber daya air dan nutrisi, di mana limbah organik dari ikan digunakan sebagai pupuk alami bagi tanaman, serta tanaman membantu memurnikan air untuk digunakan kembali (Nasri et al., 2023), (Waliuddin et al., 2023).

Meskipun sistem aquaponik memiliki banyak keunggulan, namun operasionalnya bergantung pada pasokan listrik yang stabil untuk menjalankan pompa sirkulasi, dan sistem monitoring berbasis sensor. Di daerah dengan akses listrik terbatas, kebutuhan energi menjadi tantangan yang menghambat pengembangan sistem aquaponik. Maka, energi surya menjadi solusi potensial karena karakteristiknya yang ramah lingkungan, berkelanjutan, dan mudah diimplementasikan di wilayah tropis seperti Indonesia (Tarigan, 2022).

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa penerapan sistem aquaponik bertenaga surya mampu meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan ketergantungan terhadap jaringan listrik konvensional (Alam et al., 2023), (Effendy et al., 2025). Penggunaan sistem tenaga surya juga memungkinkan operasi perangkat berbasis IoT untuk pemantauan kualitas air dan pemberian pakan ikan otomatis secara mandiri. Integrasi ini menjadikan sistem

aquaponik lebih fleksibel, efisien, serta mudah diterapkan di berbagai skala produksi, mulai dari rumah tangga hingga pertanian komersial (Waliuddin et al., 2023). Selain itu, penelitian terbaru menunjukkan bahwa sistem PLTS hybrid-off grid dapat mendukung keberlanjutan sistem budidaya ikan dengan efisiensi energi yang signifikan (Effendy et al., 2025). Inovasi lain di bidang teknologi aquaponik juga berfokus pada pembangunan infrastruktur pertanian berkelanjutan dengan memanfaatkan sumber energi terbarukan (Ghaffar et al., 2024).

Berdasarkan latar belakang yang telah dijabarkan, maka penelitian ini berfokus pada implementasi sistem PLTS sebagai sumber energi utama untuk mendukung operasional prototipe aquaponik skala kecil. Penelitian ini mencakup perancangan sistem kelistrikan, integrasi perangkat, serta pengujian performa daya dan efisiensi energi. Integrasi sistem PLTS dan aquaponik berpotensi menciptakan model pertanian modern yang mandiri energi, efisien, dan berorientasi pada keberlanjutan lingkungan.

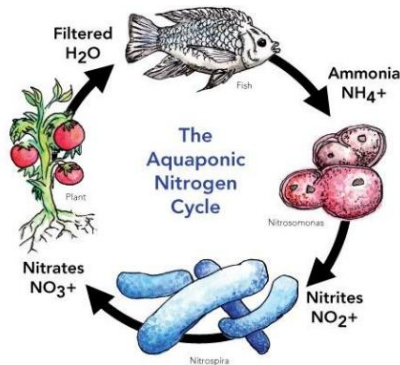
TEORI

Konsep Dasar Aquaponik

Aquaponik merupakan sistem pertanian terpadu yang menggabungkan akuakultur (budidaya ikan) dengan hidroponik (penanaman tanaman tanpa tanah) dalam satu sistem sirkulasi air tertutup. Limbah organik hasil metabolisme ikan diubah oleh bakteri menjadi senyawa nitrat yang dapat diserap oleh tanaman, sementara akar tanaman berfungsi sebagai

biofilter untuk menjaga kualitas air tetap optimal (Okomoda et al., 2023).

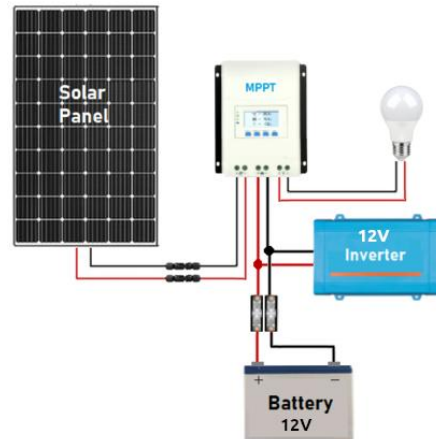
Sistem aquaponik efisien dalam penggunaan air, tidak membutuhkan pupuk kimia, dan ramah lingkungan. Namun, stabilitas sistem sangat dipengaruhi oleh pengendalian pH, suhu, oksigen terlarut, dan kadar amonia dalam air. Operasional yang berkelanjutan memerlukan pasokan energi listrik yang konstan untuk menggerakkan pompa air dan sistem monitoring otomatis (Dhal et al., 2022).



Gambar 1. Skema Aliran Nutrisi pada Sistem Aquaponik

Prinsip Kerja PLTS

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui sel *fotovoltaik* (PV). Ketika cahaya mengenai modul PV, energi *foton* menyebabkan perpindahan elektron yang menghasilkan arus listrik searah (DC). Energi listrik kemudian disimpan di dalam baterai atau langsung digunakan oleh beban listrik (Chel & Kaushik, 2011).

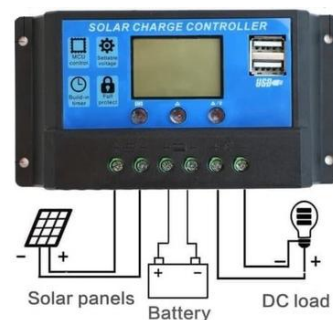


Gambar 2. Prinsip Kerja Sistem PLTS Off-Grid

Efisiensi sistem PLTS bergantung pada faktor intensitas radiasi matahari, suhu modul, sudut kemiringan panel, serta kondisi atmosfer. Untuk aplikasi *off-grid*, sistem biasanya terdiri dari panel surya, *solar charge controller*, baterai, dan inverter. PLTS skala kecil mampu menyediakan kebutuhan energi untuk sistem pertanian dan irigasi secara berkelanjutan (Santra, 2021).

Solar Charge Controller (SCC)

Solar Charge Controller (SCC) adalah komponen yang mengatur proses pengisian dan pengosongan baterai pada sistem PLTS. Fungsi utamanya adalah melindungi baterai dari *overcharge* dan *overdischarge*, sekaligus menjaga kestabilan tegangan *output* ke beban (Azhar et al., 2025).

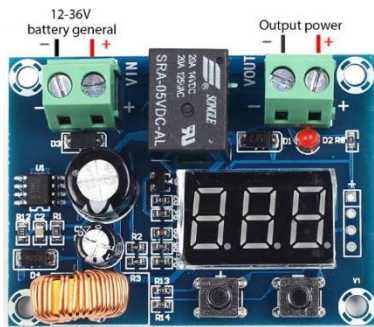


Gambar 3. Solar Charge Controller (SCC)

Terdapat dua jenis utama SCC, yaitu *Pulse Width Modulation* (PWM) dan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Tipe MPPT memiliki efisiensi lebih tinggi karena dapat melacak titik daya maksimum panel surya untuk menghasilkan arus pengisian optimal, terutama saat kondisi radiasi matahari berubah (Rokonuzzaman & Hossam-E-Haider, 2017). Penggunaan SCC tipe MPPT mampu meningkatkan efisiensi sistem PLTS 15–25% dibanding tipe PWM (Putra et al., 2023).

Sistem Proteksi LVD

Low Voltage Disconnect (LVD) berfungsi untuk memutus beban secara otomatis ketika tegangan baterai turun di bawah batas tertentu. Manfaat mencegah kerusakan sel baterai akibat *overdischarge* yaitu dapat menurunkan umur pakai baterai secara signifikan (Goksu et al., 2020).



Gambar 4. Diagram Kerja Sistem Proteksi LVD pada Baterai PLTS

Sistem LVD biasanya terintegrasi pada SCC modern atau dirancang sebagai modul tambahan dengan pengaturan ambang batas tegangan (*threshold voltage*) yang disesuaikan dengan jenis baterai. Penerapan sistem proteksi LVD dapat meningkatkan *lifetime* baterai hingga 30% dan menjaga stabilitas sumber daya pada sistem PLTS skala kecil (Talib et al., 2022).

Integrasi PLTS dan Sistem Aquaponik

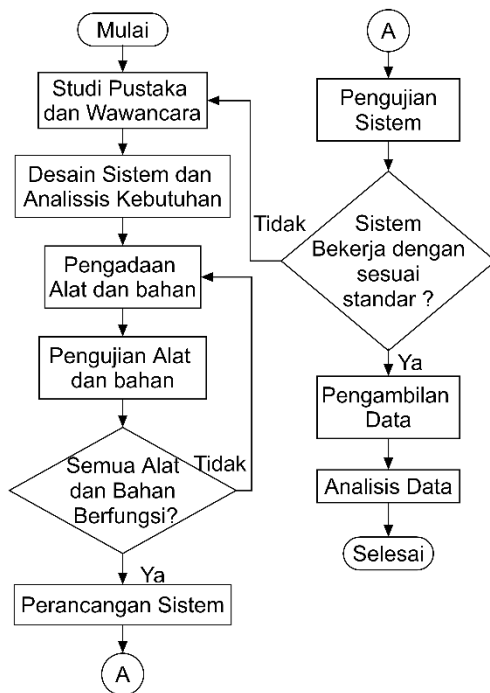
Integrasi PLTS dengan sistem aquaponik merupakan pendekatan inovatif dalam bidang pertanian cerdas (*smart farming*) yang memanfaatkan energi terbarukan. Dengan memanfaatkan panel surya sebagai sumber energi utama, seluruh komponen aquaponik seperti pompa air, dan sistem monitoring IoT dapat beroperasi tanpa ketergantungan pada jaringan listrik konvensional (Alam et al., 2023).

Sistem aquaponik bertenaga surya dapat beroperasi selama 24 jam penuh dengan efisiensi energi mencapai 85%, serta menurunkan emisi karbon secara signifikan dibanding sistem berbasis jaringan listrik (Patil et al., 2025). Integrasi dengan sistem IoT memungkinkan pemantauan parameter air dan status daya secara *real-time*, meningkatkan keandalan dan produktivitas sistem pertanian terintegrasi (Waliuddin et al., 2023).

METODOLOGI

Tahapan Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan eksperimen rekayasa sistem yang berfokus pada perancangan, integrasi, dan pengujian sistem PLTS untuk mendukung operasional sistem aquaponik otomatis skala prototipe. Tahapan penelitian mencakup perancangan sistem, perakitan perangkat, pengujian kinerja energi listrik, serta Analisis PLTS.



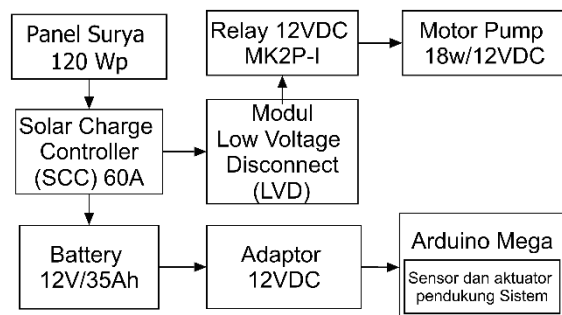
Gambar 5. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 5. Penelitian terdiri atas lima tahapan utama, yaitu:

1. Studi literatur, untuk memperoleh dasar teori mengenai PLTS, sistem aquaponik, dan integrasi keduanya dalam sistem otomatis.
2. Perancangan sistem, mencakup penentuan konfigurasi PLTS, kapasitas komponen, serta rancangan rangkaian kendali.
3. Perakitan dan implementasi perangkat, meliputi instalasi panel surya, sistem penyimpanan energi, serta sistem kendali mikrokontroler.
4. Pengujian sistem, untuk mengukur performa PLTS terhadap operasi sistem aquaponik.
5. Analisis dan evaluasi hasil, untuk menilai kinerja sistem secara keseluruhan.

Desain Sistem PLTS Aquaponik

Desain sistem PLTS Aquaponik dibuat dengan tujuan mendukung operasional sistem pertanian terpadu yang mengandalkan energi terbarukan. Sistem dirancang *off-grid*, sehingga seluruh kebutuhan energi listrik diperoleh dari panel surya tanpa ketergantungan pada jaringan PLN. Energi dari panel surya diatur oleh *Solar Charge Controller* (SCC) untuk mengisi baterai sebagai penyimpan energi.



Gambar 6. Blok Diagram Sistem

Energi listrik yang tersimpan kemudian dialirkan ke modul proteksi *Low Voltage Disconnect* (LVD) untuk mencegah baterai mengalami penurunan tegangan berlebih. Melalui modul LVD arus diteruskan ke *relay* MK2P-I yang mengatur suplai daya ke motor pompa 18 W/12 VDC, serta sistem kendali dan monitoring berbasis Arduino Mega.

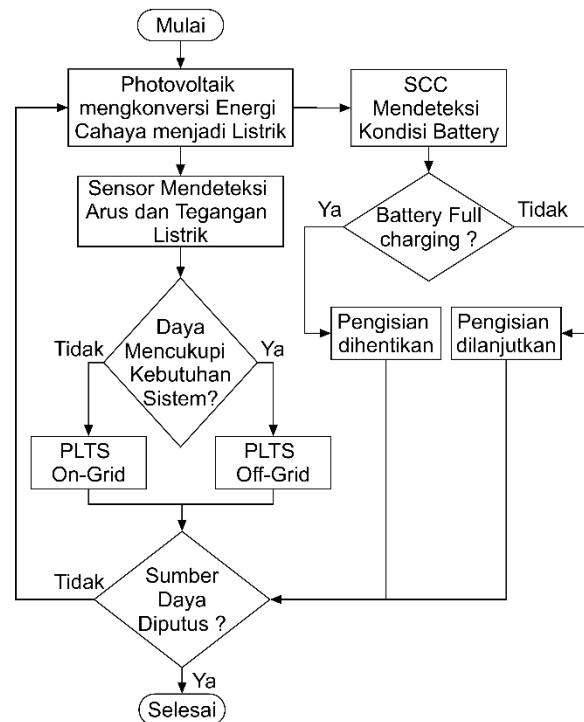
Arduino Mega berperan sebagai pusat kendali dan pemantauan sistem. Arduino Mega menerima data dari berbagai sensor lingkungan, seperti sensor pH, suhu air, *turbidity*, suhu luar, intensitas cahaya dan sensor jarak untuk mengukur volume air dan ketinggian tanaman. Semua sensor digunakan untuk memantau kondisi ekosistem aquaponik.

Sistem dirancang agar mampu beroperasi selama 24 jam dengan pembagian sumber energi: panel surya

berfungsi sebagai sumber utama pada siang hari, sedangkan baterai menjadi sumber cadangan saat malam hari atau ketika radiasi matahari rendah. Desain keseluruhan sistem ditunjukkan pada Gambar 6 yang memperlihatkan hubungan antara panel surya, SCC, baterai, modul LVD, relay, pompa DC, dan modul kendali Arduino Mega.

Perakitan dan Implementasi Sistem

Tahap implementasi diawali dengan pemasangan panel surya berdaya 120 Wp pada sudut kemiringan 15° menghadap utara untuk mendapatkan intensitas radiasi maksimum. Panel dihubungkan ke SCC tipe MPPT 10 A untuk memaksimalkan penyerapan daya. Keluaran SCC dihubungkan ke baterai 12 V 35 Ah melalui sekering pengaman dan sistem proteksi LVD. Selanjutnya, relay MK2P-I dihubungkan dengan beban utama berupa motor pompa 18 W/12 VDC. Arduino Mega digunakan untuk membaca data sensor dan mengendalikan aktuator pada sistem aquaponik. Semua rangkaian ditempatkan dalam panel ukuran 50 x 40 cm.



Gambar 7. Alur Kerja PLTS

Cara kerja sistem dimulai ketika panel surya menerima energi radiasi matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik arus searah (DC). Arus listrik kemudian dialirkan ke SCC untuk mengatur proses pengisian baterai agar tetap stabil dan efisien. Energi yang tersimpan dalam baterai menjadi sumber cadangan ketika intensitas matahari rendah atau saat malam hari. Sebelum energi disalurkan ke beban, arus melewati modul proteksi LVD yang berfungsi memutus aliran listrik apabila tegangan baterai turun di bawah batas aman. Proteksi LVD penting untuk menjaga umur pakai baterai dan mencegah kerusakan akibat pelepasan daya berlebih.

Setelah melewati sistem proteksi, energi listrik diteruskan menuju relay MK2P-I, yang bertindak sebagai sakelar otomatis untuk mengendalikan motor pompa air 18 W/12 VDC. Arduino Mega digunakan untuk

memantau parameter lingkungan yaitu pH air, suhu air, oksigen terlarut, suhu udara, intensitas cahaya, volume air dan ketinggian tanaman. Data dari sensor dibaca secara berkala dan diolah untuk memantau kondisi ekosistem akuaponik. Jika nilai sensor berada di luar rentang ideal, sistem dapat memberikan respons otomatis, misalnya memperpanjang waktu kerja pompa atau mengaktifkan alarm peringatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

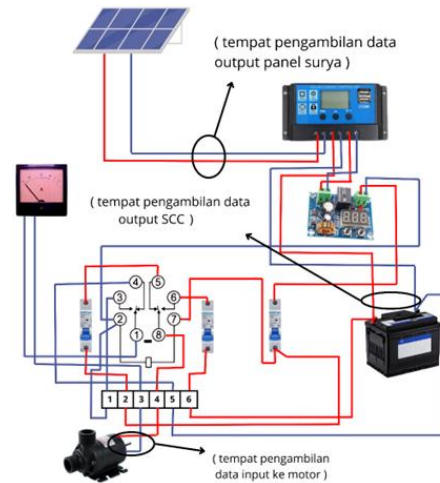
Visualisasi Hasil Perancangan

Rangka penyangga panel surya dirancang untuk menopang modul pada sudut kemiringan optimal sehingga penerimaan radiasi matahari maksimal sepanjang hari. Rangka terbuat dari material ringan namun kuat yaitu: besi siku untuk memastikan kestabilan dan daya dukung yang memadai terhadap beban panel.



Gambar 8. Hasil Perancangan

Tata letak dan konstruksi saluran air pada unit aquaponik juga diperhitungkan untuk menjamin efisiensi sirkulasi antara bak ikan dan media tanam, termasuk penempatan pompa, filter biologis, dan jalur pembuangan sehingga aliran air bersirkulasi secara kontinu dan seragam.



Gambar 9. Pengkabelan Sistem

Rancangan kelistrikan meliputi sistem manajemen energi yang menerima keluaran dari panel surya dan mendistribusikannya ke beban serta penyimpanan. Sistem kendali menggunakan relay sebagai sakelar utama untuk mengatur penyaluran energi ke pompa sirkulasi secara otomatis. Selain itu, dipasang sensor tegangan dan arus untuk memantau status keluaran panel dan kondisi baterai, sehingga distribusi energi antara sumber utama (panel PV) dan sumber cadangan (*battery*) dapat dikendalikan dengan aman dan efisien. Seluruh pengkabelan terintegrasi dalam panel kendali dengan proteksi sekering pada jalur DC untuk mencegah gangguan hubung singkat dan overcurrent.

Pengujian Tahap Awal

Pengujian tahap awal dilakukan untuk menilai kinerja keseluruhan sistem, khususnya pada aspek daya keluaran panel surya dan distribusi energi ke perangkat pendukung aquaponik. Pengujian dilakukan untuk melihat kinerja PLTS dalam menghasilkan daya listrik yang memadai untuk memenuhi kebutuhan pompa sirkulasi air dan sistem Arduino Mega.

Pengujian dilakukan untuk memperoleh data kinerja sistem PLTS meliputi tegangan keluaran panel surya, arus beban, dan tegangan baterai selama periode operasi. Data hasil pengukuran dicatat pada kondisi cuaca cerah untuk mengetahui kinerja optimal. Nilai hasil pengukuran disajikan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Hasil Pengukuran	
Pengujian	Hasil pengujian
Output Panel Surya 120 Wp	12 VDC – 18.25 VDC 2 A – 8.3 A
Input SCC	12 VDC – 18.25 VDC 1 A – 8.3 A
Battery 12 V/ 35 Ah	12 VDC – 13 VDC 2 A – 5.8 A
Input LVD	12 VDC – 13 VDC
Input Relay 12 VDC	12 VDC – 13 VDC
Pompa 12 VDC	12 VDC 3.7 A

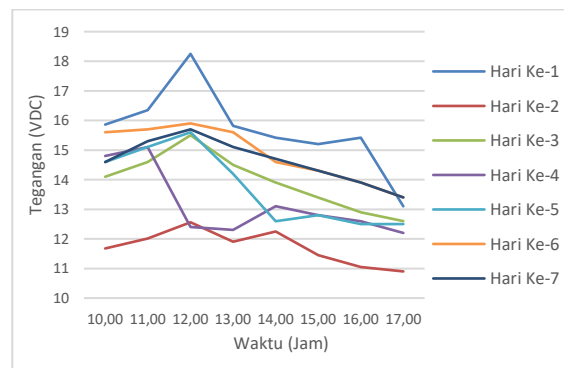
Berdasarkan data pada Tabel 4.1, terlihat bahwa tegangan keluaran panel surya mengalami variasi sesuai dengan intensitas cahaya matahari. Pada kondisi cuaca cerah, tegangan panel mencapai nilai maksimum di kisaran 17–18 V, sedangkan pada kondisi berawan nilainya menurun hingga sekitar 14 V. Perubahan tegangan menunjukkan bahwa performa panel surya sangat dipengaruhi oleh radiasi matahari yang diterima permukaannya.

Arus beban dan tegangan baterai menunjukkan kestabilan yang cukup baik selama pengujian. Tegangan baterai rata-rata berada pada kisaran 12.3–12.8 V, yang masih berada di atas batas proteksi sistem LVD sebesar 11.8 V. Daya listrik yang dihasilkan panel surya mampu memenuhi kebutuhan pompa air 18 W, dengan waktu operasi rata-rata 6–8 jam per hari. Kondisi ini menunjukkan bahwa rancangan kapasitas panel, baterai, dan beban telah sesuai dengan kebutuhan sistem aquaponik skala prototipe.

Analisi Kinerja PLTS

Pengujian dilakukan untuk mengetahui performa panel surya dalam menghasilkan energi listrik selama tujuh hari berturut-turut. Data pengukuran meliputi tegangan keluaran (VDC), arus keluaran (A), dan daya keluaran (W) dari panel surya pada kondisi cuaca yang berbeda. Setiap parameter ditampilkan dalam grafik harian untuk menggambarkan stabilitas kinerja sistem PLTS terhadap variasi intensitas radiasi matahari.

Tegangan keluaran panel surya mencerminkan kemampuan sistem dalam menghasilkan sumber energi utama bagi sistem aquaponik. Pengukuran dilakukan selama tujuh hari untuk mengamati perubahan tegangan akibat variasi kondisi cuaca dan intensitas cahaya matahari. Nilai tegangan rata-rata per hari ditunjukkan pada Gambar 10.

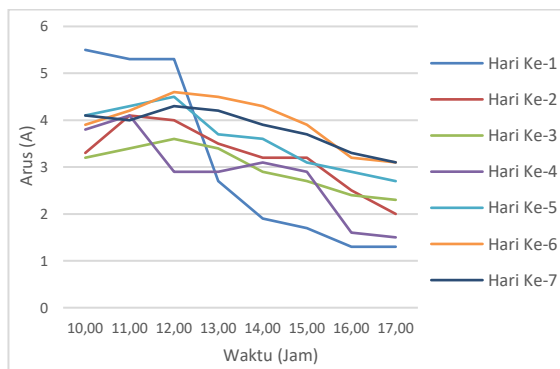


Gambar 10. Grafik Perbandingan Output Tegangan Listrik

Berdasarkan Gambar 10, terlihat bahwa tegangan keluaran panel surya bervariasi antara 10.9 – 18.25 VDC. Nilai tertinggi dicapai pada hari ke-1, ke-2, dan ke-7 saat cuaca cerah dengan intensitas radiasi maksimum. Sedangkan pada hari ke-3 dan ke-4, nilai tegangan menurun hingga

sekitar 12.2 VDC akibat kondisi berawan. Perbedaan luaran tegangan menunjukkan bahwa kinerja panel surya sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya yang diterima permukaannya. Meskipun demikian, tegangan masih berada dalam rentang kerja aman untuk sistem pengisian baterai 12 V, yang menunjukkan kinerja panel masih stabil sepanjang periode pengujian.

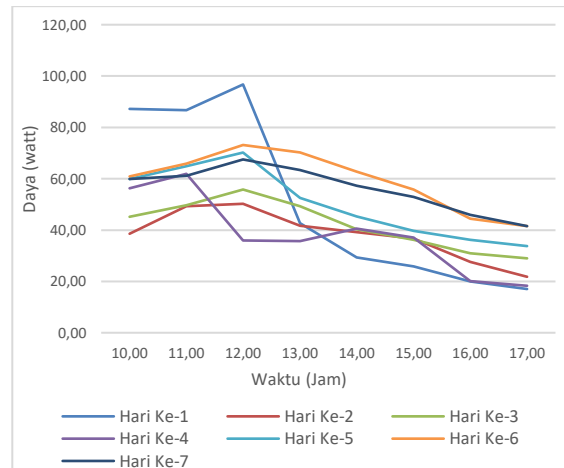
Berikutnya, dilakukan pengukuran arus keluaran panel surya yang dari panel surya menuju beban melalui SCC. Nilai arus sangat bergantung pada intensitas cahaya dan suhu permukaan panel. Perbandingan rata-rata arus selama tujuh hari pengujian ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Grafik Perbandingan Output Arus Listrik

Terlihat pada Gambar 11, arus keluaran panel cenderung meningkat pada hari-hari cerah dan menurun saat berawan. Nilai arus tertinggi mencapai 5.5 A, sedangkan pada kondisi mendung nilainya turun hingga 1.3 A. Penurunan arus listrik disebabkan oleh berkurangnya jumlah foton yang mengenai permukaan sel surya. Meskipun terjadi fluktuasi, sistem SCC tipe MPPT tetap mampu menyesuaikan titik daya maksimum, sehingga arus pengisian ke baterai tetap stabil dan efisien.

Kemudian, Daya dihitung dari hasil kali antara tegangan dan arus, sehingga menjadi indikator utama dalam menilai performa panel surya. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Grafik Perbandingan Output Daya Listrik

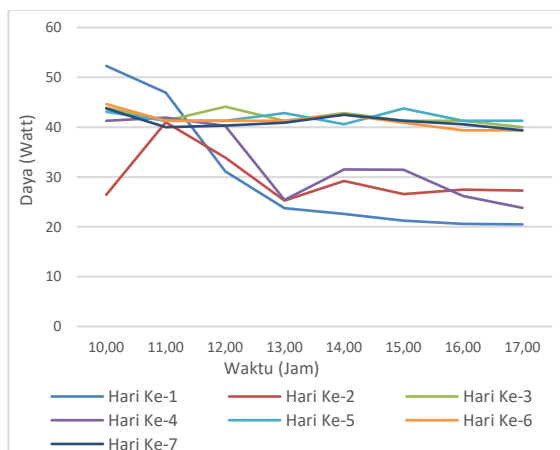
Dari Gambar 12 dapat dilihat bahwa daya yang dihasilkan panel surya mencapai nilai maksimum pada hari cerah, yaitu sebesar 96.73 Watt, sedangkan pada hari berawan menurun hingga 17.03 Watt. Fluktuasi daya menunjukkan hubungan langsung antara intensitas cahaya matahari dan keluaran energi listrik panel surya. Rata-rata daya selama tujuh hari pengujian adalah 47.85 Watt, nilai daya rata-rata menunjukkan bahwa sistem PLTS mampu menghasilkan energi yang cukup untuk mengoperasikan pompa air 18 W secara berkelanjutan, tanpa ketergantungan terhadap suplai listrik eksternal.

Analisis Distribusi Energi ke Sistem Aquaponik

Distribusi energi merupakan tahap penting dalam sistem PLTS karena menentukan seberapa efisien energi yang dihasilkan panel surya dapat dimanfaatkan

untuk mengoperasikan sistem aquaponik. Energi dari panel surya disalurkan melalui SCC menuju baterai, kemudian diteruskan ke beban utama, yaitu pompa air DC. Selama pengujian, dilakukan pencatatan tegangan dan arus beban untuk menghitung daya aktual yang digunakan oleh sistem.

Untuk menilai seberapa besar energi yang dikonsumsi oleh sistem aquaponik, dilakukan pengukuran daya beban (W) setiap hari selama tujuh hari berturut-turut. Nilai daya beban diperoleh dari hasil kali tegangan dan arus yang mengalir pada pompa dan Arduino Mega. Daya beban per hari ditunjukkan pada Gambar 13 berikut.

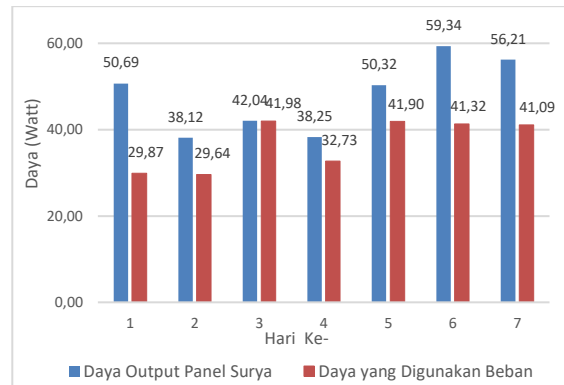


Gambar 13. Grafik Daya Listrik pada Beban

Berdasarkan Gambar 13, terlihat bahwa daya yang digunakan oleh sistem relatif stabil, dengan rata-rata 36.93 Watt, dengan variasi kecil yang disebabkan oleh perubahan tegangan suplai dari baterai. Hasil analisa daya pada beban menunjukkan bahwa kapasitas sistem PLTS yang dirancang sudah sesuai dengan kebutuhan daya beban utama, yaitu pompa air 18 W dan Arduino Mega.

Untuk mengetahui efisiensi distribusi energi dari panel surya ke beban, dilakukan

perbandingan antara daya rata-rata yang dihasilkan oleh panel surya dan daya yang dikonsumsi oleh sistem aquaponik setiap harinya. Hasil perbandingan disajikan pada Gambar 14.



Gambar 14. Grafik Perbandingan Daya

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa daya keluaran panel surya selalu lebih tinggi dibandingkan daya yang dikonsumsi beban, menandakan sistem bekerja dalam kondisi efisien. Pada hari cerah, arus pengisian dan suplai daya berlangsung secara bersamaan. Sebaliknya, pada hari berawan atau mendung, sebagian energi hilang akibat penurunan tegangan input dan rugi-rugi konversi pada SCC.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis dari implementasi sistem pembangkit listrik tenaga surya untuk mendukung operasional sistem prototipe aquaponik, dapat disimpulkan bahwa:

1. Sistem PLTS yang dirancang dengan konfigurasi panel 120 Wp, SCC tipe MPPT, baterai 12 V 35 Ah, dan proteksi LVD mampu menghasilkan daya listrik yang cukup untuk mengoperasikan sistem aquaponik otomatis skala prototipe.

2. Tegangan dan arus keluaran panel surya berfluktuasi mengikuti intensitas radiasi matahari, namun masih berada pada rentang aman untuk pengisian baterai.
3. Rata-rata daya keluaran sebesar 47,85 W menunjukkan bahwa sistem memiliki kapasitas yang cukup untuk memenuhi kebutuhan beban rata-rata 36,93 W, dengan efisiensi distribusi energi di atas 75%.
4. Sistem PLTS yang diimplementasikan berhasil mendukung keberlanjutan sistem aquaponik tanpa ketergantungan pada sumber listrik eksternal, sekaligus membuktikan potensi penerapan energi surya dalam bidang smart farming dan pertanian berkelanjutan.
5. Penelitian ini membuka peluang pengembangan lebih lanjut dalam integrasi sistem *monitoring* berbasis IoT untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi pengelolaan energi serta kualitas air dalam sistem aquaponik.

DAFTAR PUSTAKA

- Alam, M. N. H. Z., Kamaruddin, M. J., Samsudin, S. A., Othman, R., Radzi, N. H. M., Emmanuel, A. A., & Abidin, M. S. Z. (2023). Smart Farming Using a Solar-Powered Aquaponics System for Sustainable Food Production. *Malaysian Journal of Science*, 42(1), 68–77.
<https://doi.org/10.22452/MJS.VOL42N01.7>
- Azhar, A. D., Arsad, A. Z., Yew, W. H., Ghazali, A., Chau, C. F., & Zuhdi, A. W. M. (2025). Recent Developments of Solar Charge Controllers Technologies: A Bibliometric Study. *Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering (Formerly Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering)*, 18(10), 1787–1816.
<https://doi.org/10.2174/0123520965347847241122182835>
- Chel, A., & Kaushik, G. (2011). Renewable energy for sustainable agriculture. *Agronomy for Sustainable Development*, 31(1), 91–118.
<https://doi.org/10.1051/AGRO/2010029>
- Dhal, S. B., Bagavathiannan, M., Braganeto, U., & Kalafatis, S. (2022). Nutrient optimization for plant growth in Aquaponic irrigation using Machine Learning for small training datasets. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 6, 68–76.
<https://doi.org/10.1016/J.AIIA.2022.05.001>
- Effendy, M., Dwi Jayanti Kartika Sari, R., Arifuddin, R., Ali Ridlo, M., Studi Teknik Elektro, P., & Merdeka Malang, U. (2025). Perencanaan Kebutuhan Energi Listrik PLTS Hybrid-Off Grid pada Kolam Budidaya Ikan Nila menggunakan Recirculating Aquaculture System (RAS). *SinarFe7*, 7(1), 88–95.
<https://journal.fortei7.org/index.php/sinarFe7/article/view/702>
- Ghaffar, A., Abbas, A., Afzal, K., Batool, K., Nawaz, B., Zafar, L., Shaheen, H., Sajid, S. A., & Yasin, R. (2024). Innovations in Aquaponics Technology and Building Sustainable Infrastructure for Agriculture. *Indonesian Journal of Agriculture and Environmental Analytics*, 3(2), 121–134.
<https://doi.org/10.55927/IJAEA.V3I2.11123>
- Goksu, O. F., Arabul, A. Y., & Vural, R. A. (2020). Low voltage battery management system with internal adaptive charger and fuzzy logic controller. *Energies*, 13(9).
<https://doi.org/10.3390/EN13092221>
- Nasri, D. I., Hanis, N., & Radzi, M. (2023). Portable Filtration with Solar Photovoltaic-Powered IoT-Based Water Quality Monitoring System for

- Aquaponics. *Evolution in Electrical and Electronic Engineering*, 4(2), 272–282. <https://doi.org/10.30880/eeee.2023.04.02.035>
- Okomoda, V. T., Oladimeji, S. A., Solomon, S. G., Olufeagba, S. O., Ogah, S. I., & Ikhwanuddin, M. (2023). Aquaponics production system: A review of historical perspective, opportunities, and challenges of its adoption. *Food Science and Nutrition*, 11(3), 1157–1165. <https://doi.org/10.1002/FSN3.3154>;WGROUP:STRING:PUBLICATION
- Patil, O. T., Parit, P. D., Salunkhe, N. B., & Mali, R. K. (2025). Solar Based Smart Aquaponic System. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 6(5), 5778–5782. <https://doi.org/10.55248/GENGPI.6.05.25.1774>
- Putra, A. S., Afianti, H., & Watiasih, R. (2023). Comparative Analysis of Solar Charge Controller Performance Between MPPT and PWM on Solar Panels. *JEECS (Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences)*, 7(1), 1197–1202. <https://doi.org/10.54732/JEECS.V7I1.217>
- Rokonuzzaman, M., & Hossam-E-Haider, M. (2017). Design and implementation of maximum power point tracking solar charge controller. 2016 3rd International Conference on Electrical Engineering and Information and Communication Technology, ICEEICT 2016. <https://doi.org/10.1109/CEEICT.2016.7873139>
- Santra, P. (2021). Performance evaluation of solar PV pumping system for providing irrigation through micro-irrigation techniques using surface water resources in hot arid region of India. *Agricultural Water Management*, 245, 106554. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2020.106554>
- Talib, A. N., Hafeez, K., Mnati, M. J., & Khan, S. A. (2022). Design and Implementation of New Battery Monitoring System for Photovoltaic Application. *Proceedings - 2022 IEEE 4th Global Power, Energy and Communication Conference, GPECOM 2022*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/GPECOM5540.4.2022.9815759>
- Tarigan, E. (2022). Simulasi Sistem PLTS Atap dan Harga Satuan Energi Listrik Untuk Skala Rumah Tangga di Surabaya. *Jurnal Rekayasa Elektrika*, 18(2). <https://doi.org/10.17529/JRE.V18I2.25535>
- Waliuddin, M., Shukeri, A., Hanis, N., & Radzi, M. (2023). Automatic Fish Feeder Integrated With Solar Photovoltaic For Nutrient Film Technique Aquaponic System. *Evolution in Electrical and Electronic Engineering*, 4(2), 332–341. <https://doi.org/10.30880/eeee.2023.04.02.042>