



Analisis Perancangan Hidroponik Rakit Apung Berbasis Energi Terbarukan Panel Surya untuk Budidaya Kangkung (*Ipomoea reptans*)

Lilis Sucahyo^{1*}, Fajar Faturrachman¹, Supriyanto¹, Edy Hartulistiyoso¹, Folkes Eduward Laumal², Erniati³

¹IPB University, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Kab. Bogor, Jawa Barat, Indonesia, 16680

²Politeknik Negeri Kupang, Program Studi Teknik Komputer, Nusa Tenggara Timur, Indonesia, 85228

³Politeknik Pembangunan Pertanian Bogor, Program Studi Teknologi Mekanisasi Pertanian, Kota Bogor, Jawa Barat, Indonesia, 16119

*Email correspondence: lilissucahyo@apss.ipb.ac.id

Informasi Artikel

Diterima 15 Mei 2025

Direvisi 28 November 2025

Disetujui terbit 31 Desember 2025

Diterbitkan online 31 Desember 2025

Keywords

Floating raft, hydroponics, off-grid PV system, solar panel, water spinach

Abstract

*The increasing demand for food and the limited availability of agricultural area have driven the development of innovative cultivation systems such as hydroponics. The utilization of solar energy in agricultural systems offers an environmentally friendly and sustainable solution. This study aims to analyze the design of a deep water culture (DWC) or floating raft hydroponic system powered by renewable energy using a solar photovoltaic system for cultivating water spinach (*Ipomoea reptans*). The system was designed as off-grid configuration using 80 Wp photovoltaic (PV) panel, 100 W inverter, and 30 Ah/12 V VRLA battery. The analysis covered the energy demand of the venturi pump, local solar radiation potential, and the performance of the solar power system through simulations using the Global Solar Atlas and PVSyst software. Results showed that the average daily energy output of 289.33 Wh was sufficient to the system's electricity requirements, with an annual Performance Ratio (PR) of 60.1% and a Solar Fraction (SF) of 97.2%. The solar-powered system proved to be reliable, efficient, and stable in supporting year-round hydroponic operations, achieving a crop yield of 2.57 kg/m² per cycle. The integration of hydroponics and solar energy presents a sustainable agricultural solution that is both energy-efficient and environmentally friendly.*



1. Pendahuluan

Pertanian modern dihadapkan pada tantangan semakin sempitnya lahan produktif, peningkatan kebutuhan pangan, serta krisis iklim yang mempengaruhi pola budidaya konvensional. Sementara itu, sistem hidroponik hadir sebagai salah satu pendekatan pertanian berkelanjutan yang tidak memerlukan tanah sebagai media tumbuh, serta mampu menghasilkan produksi yang tinggi dan efisien dalam penggunaan sumber daya. Hidroponik dikenal mampu mengoptimalkan penggunaan air, ruang, serta memberikan kontrol lingkungan yang lebih baik terhadap hama dan penyakit tanaman (Fauzan *et al.* 2022, Gillani *et al.* 2023). Ketersediaan air dan nutrisi yang cukup pada sistem hidroponik dapat membantu tanaman menyerap unsur hara dan oksigen secara optimal, sekaligus mencegah kehilangan zat berguna dan salinitas akibat akumulasi garam, karena larutan digunakan kembali dan dikelola dengan presisi (Karimzadeh *et al.* 2025). Salah satu metode hidroponik yang populer dan aplikatif adalah sistem rakit apung atau *Deep Water Culture (DWC)*, yang memungkinkan akar tanaman terendam penuh dalam larutan nutrisi. Keunggulan sistem ini terletak pada kemampuannya menjaga kontinuitas suplai nutrisi dan oksigen bagi tanaman, bahkan dalam kondisi sementara tanpa listrik (Swastika *et al.* 2018).

Namun demikian, sistem hidroponik DWC tetap bergantung pada konsumsi energi listrik secara konstan, terutama untuk mengoperasikan pompa air dan aerasi udara. Ketergantungan terhadap sumber listrik konvensional ini menimbulkan masalah tersendiri, terutama pada daerah yang belum terjangkau jaringan listrik atau mengalami tarif listrik tinggi. Dalam hal ini, energi surya dapat menjadi solusi potensial karena merupakan sumber energi terbarukan yang melimpah di wilayah tropis. Rata-rata intensitas radiasi matahari harian di Indonesia tercatat mencapai 4,5–5,2 kWh/m²/hari tergantung wilayah geografis yang menjadikannya sumber daya energi menjanjikan untuk dimanfaatkan di sektor pertanian (Yuliananda *et al.* 2015).

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atau sistem *photovoltaic (PV)* merupakan suatu unit pembangkit listrik yang terdiri dari susunan panel surya, *solar charge controller*, inverter, baterai dan komponen lain yang terintegrasi secara elektrik (Chamara dan Beneragama 2020, Tharo *et al.* 2022). Sistem PV dapat berupa konfigurasi yang terhubung ke jaringan listrik (*grid connected*) atau sistem mandiri (*standalone*) yang beroperasi secara independen. Sistem ini diklasifikasikan berdasarkan letak geografis penempatan PV dan kaitannya dengan posisi matahari (Khan dan Arsalan 2016). Integrasi antara sistem hidroponik dan PLTS tidak hanya dapat mengurangi emisi karbon dan ketergantungan pada bahan bakar fosil, tetapi juga mendukung kemandirian energi di sektor pangan. Beberapa studi telah menunjukkan bahwa pemanfaatan panel surya dalam pertanian mampu mendukung sistem irigasi otomatis (Ahmadi *et al.* 2015), pencahayaan rumah tanaman (Bararah dan Al-Aminah 2023), hingga sistem pendinginan yang memberikan keuntungan secara ekonomi (Choi *et al.* 2021). Bahkan pendekatan ini telah berkembang ke arah *agrivoltaic*, yaitu konsep pemanfaatan lahan secara simultan untuk produksi pangan dan energi surya (Dupraz *et al.* 2011, Lee *et al.* 2024), yang terbukti meningkatkan efisiensi lahan dan mengurangi penguapan air di lahan budidaya.

Beberapa hasil penelitian juga telah menunjukkan bahwa penerapan panel surya dalam sistem hidroponik memberikan solusi inovatif terhadap kekurangan energi dan pangan, terutama di wilayah perkotaan. Xu *et al.* (2022) menekankan bahwa sistem hidroponik yang pada dasarnya hemat air, justru memiliki konsumsi energi tinggi karena membutuhkan listrik untuk berbagai aktivitas seperti irigasi, aerasi, pemanas, pendingin, dan pencahayaan buatan. Oleh karena itu, pemanfaatan *photovoltaic (PV)* dinilai sebagai teknologi yang sangat menjanjikan untuk menyuplai sebagian kebutuhan energi bersih sistem hidroponik, termasuk

dalam perencanaan sistem berjangka panjang dengan efisiensi tinggi. Integrasi tenaga surya dengan sektor pertanian memiliki potensi untuk menghasilkan energi secara efisien dan terbarukan, sekaligus budidaya pertanian berkelanjutan dengan dampak lingkungan yang minimal (Nakoul *et al.* 2014, Shaikh 2017).

Tanaman kangkung darat (*Ipomoea reptans*) menjadi salah satu komoditas sayuran daun yang sangat digemari dalam konsumsi masyarakat Indonesia. Kangkung memiliki keunggulan dalam masa tumbuh yang relatif singkat, nilai gizi yang baik, serta permintaan pasar yang stabil. Oleh karena itu, pengembangan sistem budidaya kangkung yang efisien dan ramah lingkungan menjadi sangat relevan untuk mendukung ketahanan pangan skala rumah tangga maupun komersial (Fitrah 2020). Sistem hidroponik rakit apung sangat sesuai untuk budidaya kangkung karena adaptasi akar yang baik terhadap sistem perendaman larutan nutrisi dan respons pertumbuhan yang cepat terhadap ketersediaan air dan hara.

Meskipun demikian, tantangan dalam perancangan sistem hidroponik terletak pada kebutuhan daya listrik yang stabil dan berkelanjutan, terutama untuk pompa sirkulasi dan sistem kontrol lainnya (Kurniawan dan Lestari 2020, Sanjaya *et al.* 2019). Ramdhani *et al.* (2024) menyebutkan bahwa sistem hidroponik modern memerlukan pengaturan daya yang presisi untuk memastikan efisiensi pengisian dan pemakaian daya. Sementara itu, Mardiyono *et al.* (2018) menekankan perlunya integrasi antara sistem hidroponik dan energi surya sebagai strategi konservasi energi dan pemanfaatan sumber daya terbarukan untuk mendukung pertanian masa depan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis perancangan sistem PLTS untuk hidroponik rakit apung skala mikro yang digunakan dalam budidaya kangkung darat, dengan fokus pada estimasi kebutuhan energi pompa, desain kapasitas sistem surya, serta simulasi kinerja panel menggunakan perangkat lunak *Global Solar Atlas* (GSA) dan *PVsyst*. Evaluasi dilakukan terhadap profil *output* energi harian, kinerja sistem dengan dan tanpa gangguan cuaca, serta manajemen penyimpanan energi baterai. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan sistem pertanian berbasis energi terbarukan, yang tidak hanya efisien dan mandiri secara energi, tetapi juga dapat diterapkan secara luas di berbagai wilayah Indonesia.

2. Metode Penelitian

2.1. Waktu dan Tempat

Penelitian dilakukan selama periode tiga bulan yang bertempat di Laboratorium *Greenhouse* dan Hidroponik, Stasiun Lapang Siswadhi Supardjo, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknik dan Teknologi Pertanian, IPB University. Lokasi penelitian secara spesifik berada di wilayah Dramaga, Kabupaten Bogor, dengan titik koordinat - 6.563972 LS dan 106.727194 BT serta ketinggian 181 mdpl.

2.2. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan diantaranya set hidroponik rakit apung, pompa venturi listrik AC, panel surya, *solar charge controller* (SCC), inverter, baterai VRLA, saklar, kabel dan kelengkapan listrik. Kemudian alat ukur berupa *digital power meter*, *weather station*, *pyranometer*, *solar power meter* alat tulis, aplikasi *Global Solar Atlas* dan *PVsyst* Versi 7.4 untuk menjalankan simulasi perencanaan panel surya dan PLTS serta Microsoft Excel. Sedangkan bahan yang digunakan adalah bibit kangkung, media tanam *rockwool* serta larutan nutrisi AB Mix sayuran daun.

2.3. Prosedur Penelitian

Tahapan pada penelitian ini terdiri atas: (1) Pengukuran beban kerja kelistrikan dan instalasi hidroponik rakit apung, (2) Analisis potensi radiasi surya pada lokasi PLTS hidroponik, (3) Perancangan, simulasi dan uji kinerja PLTS hidroponik rakit apung, serta pengamatan pertumbuhan tanaman kangkung. Data yang diperoleh pada proses pengukuran dan pengamatan di antaranya adalah kebutuhan beban energi listrik total yang digunakan untuk pompa venturi selama periode budidaya kangkung, kondisi lingkungan dan radiasi matahari, produksi listrik dari PLTS serta hasil panen kangkung hidroponik yang meliputi tinggi dan bobot tanaman. Analisis deskriptif digunakan dalam penelitian ini untuk melakukan interpretasi pengolahan data yang dihasilkan.

a) Pengukuran Beban Kelistrikan pada Instalasi Hidroponik Rakit Apung

Hidroponik rakit apung memiliki ukuran sebesar 3 x 2,5 x 0,25 m. Bahan yang digunakan adalah rangka baja ringan, kolam terpal untuk penampungan air dan nutrisi, serta *styrofoam low density* dengan ketebalan 4 cm yang telah dilapisi oleh *aluminium foil* guna meningkatkan daya tahan material terhadap air dan sinar matahari, sekaligus mencegah pertumbuhan lumut dan alga. Lapisan *aluminium foil* tidak menimbulkan reaksi/berdampak terhadap larutan nutrisi AB-Mix. Jarak tanam yang digunakan adalah 15 cm, sehingga terdapat 200 lubang tanam. Setiap netpot dengan ukuran 5 cm, berisi 5-8 benih kangkung. Bentuk instalasi hidroponik ditunjukkan oleh Gambar 1. Selanjutnya, beban kerja kelistrikan pada hidroponik rakit apung terletak pada penggunaan pompa venturi untuk sirkulasi dan aerasi udara untuk meningkatkan oksigen terlarut pada larutan nutrisi. Pompa yang digunakan memiliki spesifikasi teknis daya 18 W, *Flow Max* 1500 L/H, dan *Hmax* 0,8 m. Secara aktual penggunaan listrik dapat diukur dan dicatat dengan menggunakan alat *digital power meter* dengan satuan dalam kWh. Selain itu diperoleh juga hasil parameter kelistrikan lainnya berupa tegangan (V), arus (I), faktor daya (PF), daya listrik (P) dan total energi listrik yang digunakan (kWh).



Gambar 1 Instalasi hidroponik rakit apung untuk budidaya kangkung

b) Analisis Potensi Radiasi Surya untuk PLTS

Potensi energi surya dilakukan dengan pengukuran data radiasi matahari secara spesifik pada lokasi penelitian. Pengumpulan data dibagi menjadi dua bagian yaitu data primer dan sekunder. Data primer didapatkan dari pengukuran langsung selama periode budidaya dengan menggunakan *solar power meter*. Sedangkan data sekunder untuk profil radiasi matahari tahunan diambil melalui website: <https://globalsolaratlas.com> dengan memasukkan titik koordinat lokasi budidaya hidroponik. Data yang kemudian diperoleh meliputi parameter DNI (*Direct normal irradiation*), GHI (*Global horizontal irradiation*), GTI (*Global tilted irradiation*)

at optimum angle), OPTA (Optimum tilt of PV modules), ELE (Terrain elevation) serta suhu udara lingkungan. Secara teoretis, untuk menghitung kapasitas rancangan sistem PLTS dalam satuan kWp (kilowatt peak) digunakan Persamaan (1).

$$\text{Kapasitas PLTS terpasang} = \frac{\text{Kapasitas Beban Listrik}}{I \times \eta} \quad (1)$$

Yaitu kapasitas PLTS terpasang dalam satuan kWp (kilowatt peak), I adalah radiasi harian GHI atau dengan GTI opta dalam kWh/m²/hari, dan η adalah efisiensi sistem PLTS. Besarnya nilai efisiensi yang digunakan umumnya berkisar antara 75–80% yang sudah mencakup efisiensi pada panel surya, inverter, kabel pengantar, debu, suhu dan fluktuasi cuaca. Kapasitas beban listrik yaitu jumlah total energi listrik harian yang dikonsumsi oleh semua peralatan dalam satuan kWh/hari. Rancangan PLTS juga harus dapat memenuhi minimal kebutuhan energi selama 1 tahun penuh yang sangat bergantung kepada cuaca dan intermitensi radiasi surya setempat.

c) Perancangan, Simulasi dan Uji Kinerja PLTS Hidroponik

Tahapan perancangan PLTS dimulai dari penentuan Kapasitas Beban Listrik (dalam satuan Wh/hari) dengan mempertimbangkan kebutuhan beban total harian (Wh/hari) sesuai dengan Persamaan (2). SFC adalah *safety factor* untuk mengakomodir lonjakan beban dan fluktuasi komponen kelistrikan, umumnya berkisar antara 15-25% Dalam hal ini Kapasitas Desain perlu disesuaikan juga dengan Energi Luaran dari sistem PLTS.

$$\text{Kapasitas Beban Listrik} = \text{Kebutuhan total beban harian} \times SFC \quad (2)$$

PLTS dirancang secara *off grid* dengan menggunakan baterai sebagai penyimpanan energi untuk menjaga stabilitas daya listrik yang dihasilkan serta meminimalisir intermitensi dari radiasi surya. Penentuan kapasitas baterai menggunakan Persamaan (3).

$$\text{Kapasitas Baterai} = \frac{\text{Kapasitas Beban PLTS}}{V_{\text{baterai}} \times DOD_{\text{baterai}}} \times \text{Hari Otonomi} \quad (3)$$

Satuan Kapasitas Baterai dalam Ah, V_{baterai} adalah tegangan kerja pada baterai yang ditentukan dalam satuan Volt (V), DoD (*Depth of Discharge*) adalah persentase (%) kapasitas baterai yang telah digunakan sebelum diisi ulang. DoD menunjukkan banyaknya energi yang telah diambil dari baterai relatif terhadap kapasitas penuhnya. Hari otonomi adalah hari ketika baterai tetap bisa menyuplai beban jika panel surya tidak menghasilkan listrik dikarenakan cuaca atau gangguan lainnya.

Kemudian untuk mengatur regulasi listrik dari PV ke baterai dan beban agar lebih stabil, digunakan komponen SCC (*solar charge controller*). Penentuan spesifikasi dari SCC yang sesuai dengan kapasitas desain PLTS menggunakan Persamaan (4). Lambang I_{sc} adalah arus maksimum pada SCC (dalam satuan A), P_{PV} adalah ukuran panel surya (Wp) yang digunakan dan V_{baterai} adalah tegangan kerja pada baterai (V).

$$KI_{sc} = \frac{P_{PV}}{V_{\text{baterai}}} \quad (4)$$

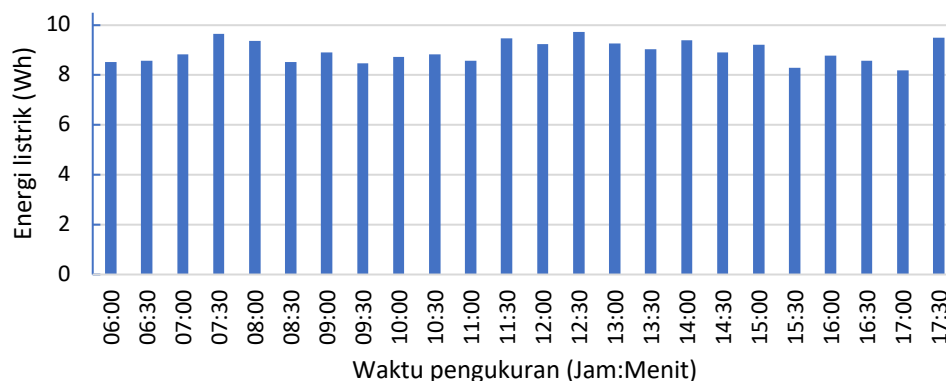
Selanjutnya, penentuan inverter dilakukan berdasarkan total daya beban listrik yang akan digunakan, dalam hal ini adalah pompa venturi hidroponik. Komponen inverter berfungsi untuk mengubah listrik DC dari PLTS menjadi listrik AC yang sesuai dengan peralatan listrik. Selain itu diperlukan komponen pendukung seperti kabel DC ukuran 4 mm² (untuk arus $\leq 10A$, jarak <5 m, serta mempertimbangkan faktor keamanan saat pengisian daya baterai), kabel AC ukuran 1,5 mm² (untuk beban ringan pompa) serta *fuse*/proteksi. Tahap simulasi dilakukan menggunakan aplikasi GSA dan PVsyst dengan memasukkan parameter titik kordinat lokasi panel surya/ PLTS, berbagai beban peralatan kelistrikan, kebutuhan energi per alat kelistrikan, waktu operasional harian, pemilihan kapasitas dan jumlah panel, kapasitas inverter, dan kapasitas baterai (Mansur 2021).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Beban Kelistrikan pada Instalasi Hidroponik Rakit Apung

Pompa venturi merupakan peralatan kelistrikan utama yang digunakan dalam sistem hidroponik rakit apung. Pompa tersebut memiliki dua fungsi utama, yaitu melakukan sirkulasi air dan aerasi oksigen terlarut ke dalam larutan nutrisi. Prinsip kerja venturi melibatkan efek hisapan akibat perbedaan tekanan, di mana aliran air berkecepatan tinggi menciptakan area bertekanan rendah yang mampu menarik udara ke dalam sistem, sehingga meningkatkan kadar oksigen terlarut tanpa memerlukan aerasi tambahan. Keberadaan oksigen terlarut yang cukup sangat penting untuk mendukung respirasi akar tanaman dan mencegah kondisi anaerobik yang dapat merusak pertumbuhan.

Berdasarkan hasil pengukuran pada Gambar 2, kinerja kelistrikan yang dilakukan pada sistem pompa venturi dengan sumber listrik AC, diperoleh nilai rata-rata tegangan sebesar sekitar 220,5 V, faktor daya sebesar 0,81, arus sebesar 0,10 A, dan daya aktif sebesar 17,86 W. Periode operasi pompa venturi yang digunakan adalah 12 jam per hari (pukul 06.00–18.00) dengan pertimbangan pemilihan waktu tersebut terjadi penyerapan unsur hara dan fotosintensis yang efektif pada tanaman. Pengukuran data kelistrikan dilakukan dengan interval setiap 30 menit. Diperoleh jumlah total energi yang dikonsumsi oleh pompa sebesar 214,32 Wh/hari. Hal ini menunjukkan efisiensi energi yang relatif baik untuk sistem hidroponik berskala kecil hingga menengah.



Gambar 2 Grafik energi listrik pompa venturi hidroponik rakit apung

Selama penggunaan pompa terlihat adanya fluktuasi pada parameter kelistrikan, baik tegangan, arus, maupun faktor daya. Fluktuasi tersebut disebabkan oleh beberapa faktor,

antara lain perubahan beban pada jaringan listrik, kualitas sambungan kabel serta variasi resistansi motor pompa akibat perubahan suhu. Secara umum, perubahan dan variasi kelistrikan tersebut masih dalam batas wajar dan normal. Untuk mengurangi fluktuasi yang terjadi, beberapa upaya yang dapat dilakukan meliputi penggunaan kabel dengan ukuran penampang lebih besar untuk mengurangi resistansi, memastikan sambungan listrik yang baik dan bersih dari korosi serta, penggunaan *stabilizer* tegangan (Ramadhan *et al.*, 2016). Hal tersebut bertujuan untuk meningkatkan kestabilan suplai listrik ke pompa, sehingga performa aerasi dan sirkulasi larutan nutrisi menjadi lebih konsisten.

Dalam pemilihan pompa untuk instalasi hidroponik, perlu diperhatikan hubungan antara kapasitas aliran (*flow rate*), tinggi tekanan (*head*), dan daya pompa. Menurut Jensen (2017), pompa untuk sistem hidroponik sebaiknya dipilih berdasarkan perhitungan volume larutan nutrisi dan kebutuhan sirkulasi minimal sebanyak 1–2 kali volume kolam per jam. Selain itu, pompa harus mampu menghasilkan tekanan yang cukup untuk mendukung operasi sistem venturi bila aerasi diperlukan. Untuk hidroponik rakit apung berskala kecil, pompa dengan daya sekitar 15–25 watt sudah cukup efektif, selama mampu mempertahankan aliran dan aerasi yang stabil (Jensen 2017).

3.2. Potensi Radiasi Surya Setempat untuk Hidroponik Rakit Apung

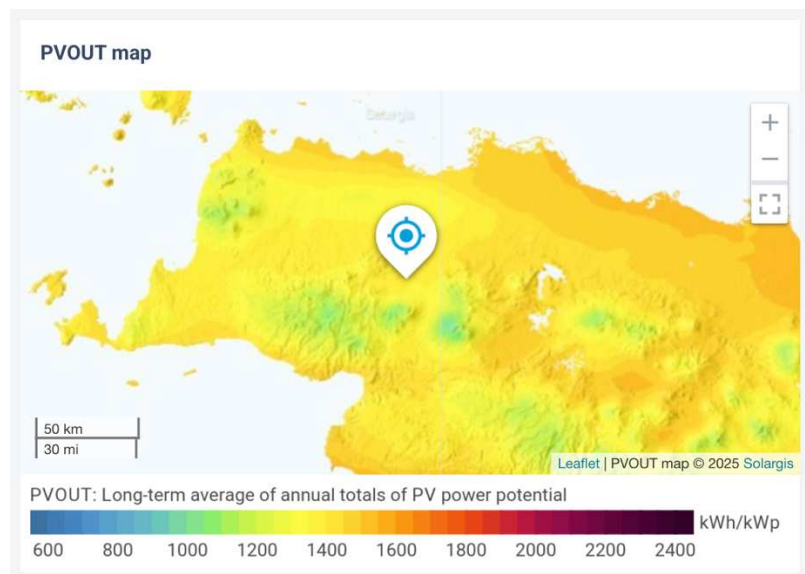
Instalasi hidroponik rakit apung pada wilayah tropis memiliki kondisi radiasi matahari tahunan yang relatif stabil namun tetap menunjukkan variasi musiman yang cukup signifikan. Analisis data yang diperoleh dari GSA (*Global Solar Atlas*) pada lokasi penelitian ditunjukkan oleh Tabel 1. Nilai *Global Horizontal Irradiation* (GHI) yang diperoleh sebesar sebesar 4,68 kWh/m²/hari. GHI merupakan total radiasi yang diterima permukaan horizontal bumi dan menjadi acuan penting dalam desain sistem PV atau PLTS konvensional tanpa kemiringan (*tilt*). Data ini selaras dengan temuan Widayana (2012) dan Joewono *et al.* (2023) yang menyatakan bahwa kawasan barat Indonesia memiliki potensi penyinaran matahari sekitar 4,5–4,8 kWh/m²/hari, sehingga cocok untuk aplikasi pertanian berbasis energi terbarukan. Sementara itu, *Global Tilted Irradiation* (GTI) Opta memiliki nilai lebih tinggi yaitu 4,73 kWh/m²/hari yang menunjukkan radiasi maksimal yang dapat diperoleh pada sudut kemiringan optimal panel PV, yang dalam hal ini dihitung untuk performa terbaik. Nilai *tilt* Optimum (Opta) yaitu 10 derajat dengan orientasi azimuth 0 derajat (menghadap utara), yang menunjukkan konfigurasi terbaik panel surya untuk menangkap energi matahari sepanjang tahun di lokasi tersebut. Rata-rata suhu udara harian adalah 25,3°C yang termasuk dalam kategori suhu sedang dan cukup ideal untuk operasi sistem PV, karena suhu yang terlalu tinggi dapat menurunkan efisiensi panel. Ketinggian lokasi pada 181 mdpl, tergolong rendah dan hanya sedikit mempengaruhi performa sistem PV, berbeda dengan lokasi di dataran tinggi yang dapat mengalami peningkatan efisiensi karena suhu lingkungan yang lebih rendah dan atmosfer yang lebih tipis.

Tabel 1 Nilai potensi energi surya pada titik kordinat lokasi instalasi hidroponik (GSA)

Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
<i>Global Horizontal Irradiation (GHI)</i>	4,68	kWh/m ² /hari	Total iradiasi pada permukaan horizontal, relevan untuk sistem PV tanpa <i>tilt</i>
<i>Global Tilted Irradiation (GTI opta)</i>	4,73	kWh/m ² /hari	Iradiasi optimal pada kemiringan panel surya terbaik

Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
Tilt Optimum (OPTA)	10 / 0	derajat	Sudut kemiringan dan azimuth optimal untuk panel PV (10° tilt, 0° arah utara)
Suhu udara rata-rata	25,3	°C	Suhu rata-rata harian di lokasi
Ketinggian lokasi	181	mdpl	Relatif rendah, mempengaruhi sedikit performa PV (lebih signifikan pada dataran tinggi)

Gambar 3 menunjukkan peta tematik sebaran potensi daya listrik dari sistem (PVout) berdasarkan rata-rata jangka panjang dari total tahunan. Peta ini merupakan analisis GSA yang menggambarkan potensi energi yang dapat dihasilkan dari sistem PV atau PLTS dalam satuan kilowatt-jam per *kilowatt peak* (kWh/kWp) di wilayah Jawa Barat, Indonesia. Warna pada peta mewakili skala intensitas potensi energi surya, dimulai dari biru untuk nilai terendah (sekitar 600 kWh/kWp) hingga ungu tua untuk nilai tertinggi (mendekati 2400 kWh/kWp). Berdasarkan spektrum warna di sekitar titik lokasi instalasi hidroponik, wilayah tersebut didominasi warna kuning hingga orange terang, yang mengindikasikan potensi produksi listrik tahunan dari sistem PVout berkisar antara 1400 hingga 1600 kWh/kWp. Hal ini menunjukkan bahwa wilayah lokasi penelitian hidroponik ini memiliki potensi energi surya yang cukup baik dan layak untuk dikembangkan sebagai lokasi instalasi sistem PLTS, terutama untuk pertanian dengan energi bersih yang berkelanjutan.



Gambar 3 Peta sebaran potensi daya listrik dari sistem PLTS pada wilayah Jawa Barat

3.3. Analisis Rancangan dan Uji Kinerja PLTS Hidroponik Rakit Apung

Hasil pengukuran menunjukkan kebutuhan daya listrik pompa venturi yaitu sebesar 214,32 Wh/hari. Berikutnya adalah menentukan kapasitas total sistem PLTS untuk memenuhi kebutuhan listrik harian tersebut. Dalam penelitian ini ditetapkan besarnya SFC sistem sebesar 20%, sehingga total kapasitas beban PLTS menjadi 257,18 Wh/hari. Kemudian besarnya efisiensi sistem PLTS (η) adalah 70%, dan radiasi GTI opta sebesar 4,73 kWh/m²/hari sehingga berdasarkan Persamaan (1) diperoleh kapasitas PLTS teoretis sebesar

77,60 Wp atau mendekati kapasitas 80 Wp. Berdasarkan ketersediaan panel surya di pasaran, dipilih dengan ukuran 80 Wp tersebut dengan tipe *monocrystalline*, spesifikasi Vmp sebesar 18,24 V dan Imp 4,58 A. Dimensi panel surya adalah 550 x 760 x 30 mm. Nilai kWp pada kapasitas PV terpasang bukanlah daya murni, tetapi kapasitas daya panel dalam kondisi uji standar (STC: *Standard Test Conditions*) dengan parameter radiasi matahari sebesar 1 kW/m² (1000 W/m²) dan suhu panel sebesar 25°C. Sebagai contoh, panel berkapasitas 0,08 kWp akan menghasilkan 0,08 kW daya jika menerima radiasi 1 kW/m² sehingga kapasitas tersebut sudah mengimplikasikan luas panel tertentu.

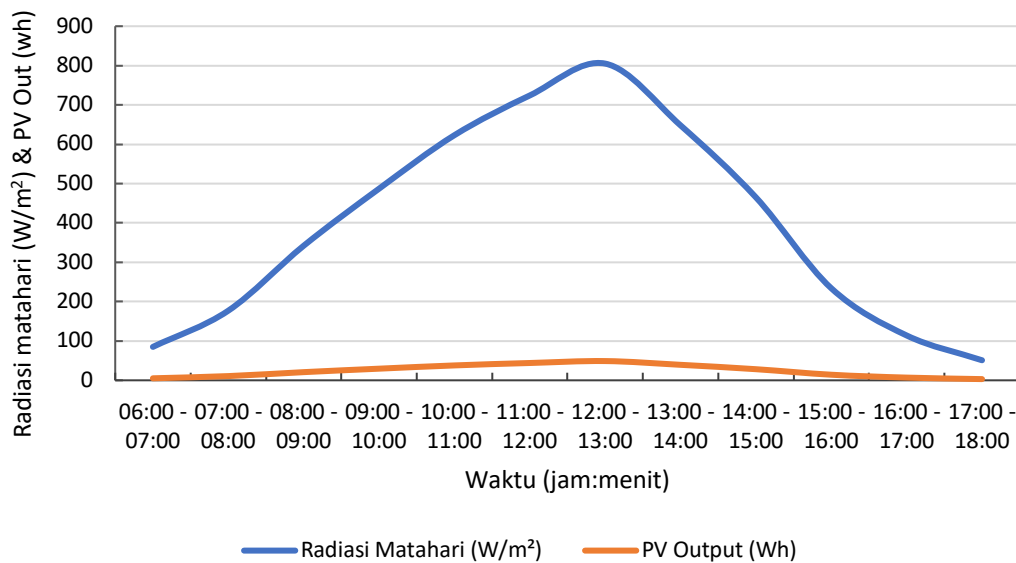
Tahap selanjutnya adalah melakukan analisis keandalan sistem PLTS dalam jangka waktu tahunan produksi mulai dari bulan Januari–Desember pada aplikasi GSA dan PVsyst. Gambar 4 menunjukkan data *Average Hourly Profiles PVout* (Wh) yang berupa variasi produksi energi PV sepanjang tahun di lokasi instalasi hidroponik penelitian dengan pola harian dan musiman sepanjang tahun. Berdasarkan data tersebut, produksi *PVout* rata-rata tahunan sistem PLTS 80 Wp sebesar 289,33 Wh/hari. Nilai tersebut masih lebih besar dari kebutuhan harian listrik hidroponik rakit apung sebesar 257,18 Wh/hari.

Produksi harian tertinggi terjadi pada bulan September (342 Wh/hari), yang mencerminkan kondisi musim kemarau dengan radiasi matahari optimal. Pada bulan ini, *output* PLTS mencapai puncaknya antara pukul 11:00–12:00 (50 Wh), dengan kinerja stabil di atas 40 Wh dari pukul 09:00 hingga 14:00. Sebaliknya, produksi terendah terjadi pada bulan Januari yang dipengaruhi oleh musim hujan dan tutupan awan dengan *output* harian sebesar 234 Wh. Bulan-bulan transisi seperti Maret dan April mencatat peningkatan bertahap menuju musim kemarau, dengan *output* harian masing-masing 284 Wh dan 296 Wh, sementara November dan Desember menunjukkan penurunan menuju awal musim hujan sebesar 272 Wh dan 251 Wh. Variasi bulanan ini berkorelasi dengan data radiasi global, di bulan September terjadi radiasi tertinggi (5,6 kWh/m²/hari) dan Januari terendah (3,3 kWh/m²/hari).

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0 - 1												
1 - 2												
2 - 3												
3 - 4												
4 - 5												
5 - 6									0	0	0	
6 - 7	3	2	2	3	3	2	2	2	4	7	7	5
7 - 8	11	10	14	16	16	14	14	16	19	20	18	15
8 - 9	21	20	26	29	29	27	27	30	33	33	29	25
9 - 10	28	28	36	39	39	37	38	41	44	42	37	33
10 - 11	32	33	43	44	44	43	44	47	49	45	41	36
11 - 12	33	35	44	45	44	44	46	49	50	45	40	37
12 - 13	32	34	40	41	42	42	44	46	47	41	36	34
13 - 14	28	30	33	34	36	36	38	40	41	35	29	28
14 - 15	21	23	23	24	26	27	29	31	30	24	20	20
15 - 16	15	15	14	14	15	16	18	19	18	14	11	12
16 - 17	8	8	7	6	6	7	8	9	8	6	5	6
17 - 18	2	2	2	1	0	1	1	1	1	0	1	1
18 - 19												
19 - 20												
20 - 21												
21 - 22												
22 - 23												
23 - 24												
Sum	234	239	284	296	300	295	308	331	342	310	272	251

Gambar 4 Profil luaran daya listrik PLTS per jam pada bulan Januari-Desember di titik koordinat instalasi hidroponik rakit apung

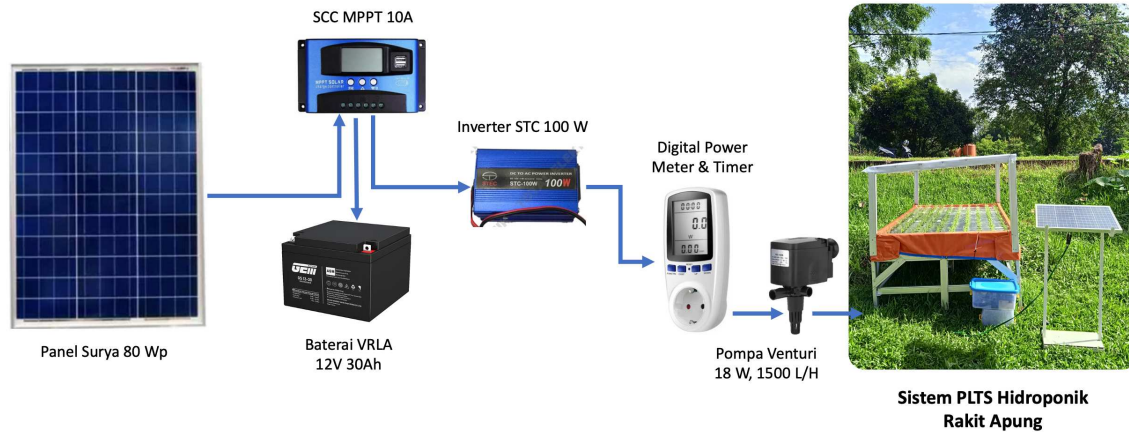
Data tersebut menunjukkan pengaruh kondisi iklim tropis, ketika musim hujan mendorong pengurangan produksi listrik dibandingkan musim kemarau. Pemantauan *real-time* dengan *pyranometer* dan integrasi data cuaca lokal dapat meningkatkan akurasi prediksi energi PLTS.



Gambar 5 Grafik radiasi matahari serta daya luaran PLTS harian pada instalasi hidroponik rakit apung

Gambar 5 menunjukkan hasil simulasi nilai rata-rata radiasi matahari tahunan dan *output* produksi listrik untuk kapasitas penggunaan panel 80 Wp. Tampak bahwa energi radiasi matahari yang tersedia jauh lebih besar dari daya luaran PV. Hal tersebut menunjukkan keandalan sistem dalam menyediakan energi yang cukup bagi instalasi PLTS hidroponik rakit apung. Pertimbangan dalam perancangan sistem PLTS yang dapat dilakukan di antaranya dengan fluktuasi musiman (perbedaan 108 Wh antara Januari dan September) dapat menggunakan baterai untuk stabilisasi pasokan serta penyesuaian sudut *tilt* secara musiman dapat meningkatkan efisiensi, terutama di bulan-bulan dengan radiasi rendah. Total energi harian yang dihasilkan oleh PLTS adalah 289,33 Wh/hari, sementara yang dibutuhkan oleh beban listrik perancangan hidroponik adalah 257,18 Wh/hari, yang berarti kebutuhan masih lebih rendah dari total energi harian yang dihasilkan (kurang dari 289,33 Wh/hari). Hal tersebut menunjukkan bahwa kapasitas PLTS sudah sesuai dengan kebutuhan perancangan.

Penghitungan kapasitas baterai dilakukan berdasarkan kebutuhan energi harian dengan mempertimbangkan kedalaman pelepasan (*Depth of Discharge/DoD*) sebesar 80% untuk mengoptimalkan kinerja sistem. Penghitungan ini menggunakan tegangan sistem standar 12 Volt untuk PLTS skala kecil. Berdasarkan hasil hitungan menggunakan Persamaan 2, kapasitas baterai yang diperoleh sebesar 26,8 Ah. Namun, untuk memastikan keandalan sistem dan memberikan margin keamanan, direkomendasikan penggunaan baterai berkapasitas 30 Ah/12V dengan jenis VRLA (*Valve Regulated Lead Acid*). Baterai VRLA dapat bertahan hingga 500-1300 siklus (3-5 tahun). Dalam penerapan praktis sistem PLTS untuk hidroponik skala mikro, seringkali pertimbangan ekonomis menjadi faktor penentu yang lebih krusial dibandingkan performa seperti pemilihan baterai dengan teknologi *Lithium Ferro Phosphate* (LiFePO₄). Gambar 6 menunjukkan skema perancangan komponen PLTS serta instalasi pada hidroponik rakit apung untuk budidaya tanaman kangkung.



Gambar 6 Skema rangkaian komponen PLTS pada hidroponik rakit apung skala mikro untuk budidaya tanaman kangkung

Sistem PLTS dirancang menggunakan regulator SCC tipe MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) dengan efisiensi konversi daya mencapai 95%. Berdasarkan penghitungan, arus dan tegangan kerja maksimum (I_{mp} dan V_{mp}) serta kompensasi faktor keamanan, dipilih SCC MPPT 10A/12V. Selain itu, SCC juga berperan melindungi baterai dari pengisian (*overcharge*) maupun pengosongan berlebih (*overdischarge*) pada sistem PLTS *off-grid* dan *hybrid* (Samsurizal *et al.* 2021). Untuk kebutuhan beban AC pompa hidroponik, dipilih inverter *pure sine wave* 100W/12V. Pemilihan kapasitas inverter yang lebih besar dari kebutuhan dapat memberikan beberapa keuntungan seperti: (1) kapasitas yang cukup untuk menangani arus start pada perangkat induktif, (2) mengurangi beban kerja inverter sehingga memperpanjang umur pakai, dan (3) memungkinkan penambahan beban di masa depan. Selain itu, komponen pendukung yang diperlukan adalah kabel PV ke SCC ukuran 6 mm², kabel baterai ke inverter dengan ukuran 10 mm² yang dirancang untuk menangani arus hingga 12,5 A dengan aman.

Berdasarkan pengamatan data lapang, kemudian dibuat simulasi perbandingan daya luaran PV pada sistem PLTS untuk hidroponik rakit apung antara dua skenario kondisi cuaca, yaitu cuaca cerah (*normal*) dan cuaca berawan (*intermiten*), selama periode efektif penyalan pompa seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 2. Pada kondisi cerah, radiasi matahari bervariasi dari 105 W/m² pada pagi hari hingga mencapai puncak intensitas sebesar 1156 W/m² pada pukul 11:00–12:00. Tegangan panel stabil di sekitar 16,5–18,2 V, dengan arus meningkat seiring naiknya intensitas radiasi mencapai maksimum 2,24 A. Daya luaran PV pada kondisi ini berkisar dari 3,63 W di pagi hari hingga 40,77 W pada puncak siang hari, menghasilkan total daya akumulatif harian sebesar 289,36 Wh/hari, atau setara dengan kapasitas optimal dari sistem 80 Wp dalam kondisi ideal.

Sebaliknya, pada kondisi berawan terdapat penurunan radiasi akibat gangguan cuaca seperti awan tipis dan awan tebal. Total energi listrik yang dihasilkan pada kondisi berawan hanya mencapai 233,56 Wh/hari, yang berarti terjadi penurunan sekitar 12% dari kondisi normal. Penurunan ini cukup signifikan jika sistem bergantung pada suplai energi harian yang stabil, misalnya untuk pompa hidroponik atau sistem irigasi otomatis. Oleh karena itu, fluktuasi cuaca harus menjadi pertimbangan penting dalam desain PLTS skala kecil, terutama dalam sistem *off-grid* yang tidak memiliki cadangan energi besar. Sehingga dalam penelitian ini, sebelum digunakan dengan inverter dan pompa, baterai telah dilakukan proses pengisian

(*charging*) hingga kapasitas penuh untuk menunjang kestabilan sistem PLTS akibat intermitensi radiasi surya tersebut.

Tabel 2 Daya luaran *PVout* pada PLTS hidroponik pada kondisi cuaca normal dan berawan

Waktu	Kondisi Cuaca Cerah/Normal				Kondisi Cuaca Berawan/Intermitensi			
	Radiasi Surya (W/m ²)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya PV (W)	Radiasi Surya (W/m ²)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya PV (W)
06:00–07:00	105	16,5	0,22	3,63	105	16,5	0,22	3,63
07:00–08:00	385	17,8	0,76	13,53	385	17,8	0,76	13,53
08:00–09:00	736	18,1	1,44	26,06	650	17,9	1,28	22,91
09:00–10:00	980	18,2	1,9	34,58	700	17,5	1,43	25,03
10:00–11:00	1122	18,2	2,18	39,68	900	17	1,88	31,96
11:00–12:00	1156	18,2	2,24	40,77	850	17,2	2,09	35,95
12:00–13:00	1122	18,2	2,18	39,68	800	17,5	1,94	33,95
13:00–14:00	980	18	1,92	34,56	600	16,8	1,31	22,01
14:00–15:00	736	17,8	1,46	25,99	500	16,5	1,09	17,99
15:00–16:00	525	17,5	1,06	18,55	450	16,2	0,99	16,04
16:00–17:00	280	16,8	0,59	9,91	220	15,5	0,52	8,06
17:00–18:00	70	15,2	0,16	2,43	70	14,8	0,17	2,52
Total	8197	-	-	289,36	6230	-	-	233,56

Sementara itu, Tabel 3 menunjukkan hasil simulasi PVSyst dalam bentuk aliran energi pada komponen inverter, baterai dan pompa PLTS hidroponik rakit apung pada kondisi cuaca berawan (intermitensi). Pada awal pagi hari, daya dari PV masih rendah (3,7 W) dan tidak mencukupi untuk mengaktifkan inverter secara penuh. Karena itu, kekurangan daya sebesar 15,3 W disuplai oleh baterai yang menyebabkan SOC (*State of Charge*) baterai turun menjadi 95%. Kondisi serupa terjadi kembali di sore hari ketika daya PV menurun drastis dan baterai kembali menyuplai beban, menyebabkan SOC menurun secara bertahap hingga 90% pada akhir hari. Mulai pukul 08:00–15:00, daya PV sudah cukup tinggi sehingga inverter dapat bekerja optimal dan menyuplai beban pompa. Bahkan pada periode antara pukul 10:00–13:00, terdapat surplus daya dari PV. Surplus ini dialirkan ke baterai untuk pengisian ulang. Contohnya, pada pukul 11:00–12:00, daya ke inverter mencapai 34,2 W, sehingga setelah dikurangi kebutuhan pompa 17,86 W, kelebihan 16,3 W disimpan ke dalam baterai. Energi yang dikeluarkan dari baterai adalah 49,94 Wh, sedangkan energi yang masuk kembali ke baterai selama surplus adalah 56,1 Wh, sehingga sistem tetap berada dalam kondisi SOC yang stabil sepanjang hari. SOC mengalami penurunan pada pagi dan sore hari, namun kembali terisi penuh (100%) pada siang hari saat *input* PV maksimal.

Tabel 3 Aliran energi pada komponen inverter, baterai dan pompa PLTS hidroponik

Waktu	Daya PV (W)	Daya ke Inverter (W)	Daya ke Pompa (W)	Daya dari Baterai (W)	Daya ke Baterai (W)	SOC Baterai (%)
06:00–07:00	3,7	3,5	0	15,3	0	95% (-5%)
07:00–08:00	13,6	12,9	12,3	5,5	0	92% (-3%)
08:00–09:00	23	21,9	17,86	0	4	93% (+1%)

Waktu	Daya PV (W)	Daya ke Inverter (W)	Daya ke Pompa (W)	Daya dari Baterai (W)	Daya ke Baterai (W)	SOC Baterai (%)
09:00–10:00	25	23,8	17,86	0	5,9	95% (+2%)
10:00–11:00	32	30,4	17,86	0	12,5	98% (+3%)
11:00–12:00	36	34,2	17,86	0	16,3	100% (+2%)
12:00–13:00	34	32,3	17,86	0	14,4	100%
13:00–14:00	22	20,9	17,86	0	3	100%
14:00–15:00	18	17,1	17,86	0,76	0	99% (-1%)
15:00–16:00	16	15,2	15,2	2,66	0	98% (-1%)
16:00–17:00	8	7,6	7,6	10,26	0	95% (-3%)
17:00–18:00	2,5	2,4	2,4	15,46	0	90% (-5%)
Total	233,8	222,2	162,52	49,94	56,1	

Sistem PLTS yang dirancang telah menunjukkan desain yang seimbang. Kondisi Daya dari Baterai bernilai 0 mengindikasikan bahwa energi panel surya telah mencukupi (besar) untuk menyalakan pompa, sehingga tidak ada daya baterai yang mengalir ke pompa (bernilai 0). Jika Daya ke Baterai bernilai 0 mengindikasikan bahwa semua Daya dari panel surya digunakan untuk energi pompa sehingga tidak tersedia energi untuk mengisi baterai (juga bernilai 0). Fungsi baterai sebagai *buffer* energi berjalan optimal dengan menyuplai beban saat radiasi surya rendah (pagi dan sore), dan terisi kembali saat surplus energi tersedia di siang hari. Dengan demikian, SOC baterai sebesar 90%, pada hari berikutnya berpotensi akan kembali ke 100% atau mendekati nilai awal, selama kondisi radiasi matahari tidak mengalami perubahan signifikan. Artinya, sistem ini mampu menjaga keseimbangan energi antara *input* (dari PV), konsumsi (oleh pompa), dan cadangan (pada baterai), dengan catatan bahwa kondisi cuaca tetap stabil dan mendukung produksi energi surya yang memadai. Selain itu, salah satu keunggulan hidroponik rakit apung adalah perakitan tanaman tetap mendapatkan suplai air dalam kondisi pompa tidak menyala, sehingga masih dapat bertahan dan tidak terjadi kekeringan.

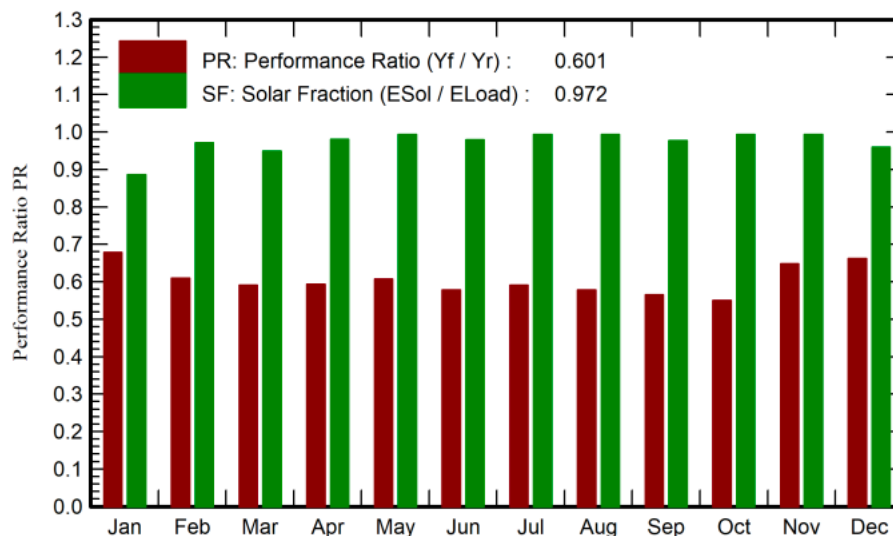
Parameter utama kinerja sistem PLTS yang umum digunakan adalah *Performance Ratio* (PR) dan *Solar Fraction* (SF), berdasarkan hasil simulasi dari perangkat lunak PVsyst. Nilai rata-rata tahunan untuk PR adalah 60,1%, sedangkan nilai rata-rata SF adalah 97,2%. Gambar 7 menyajikan grafik fluktuasi nilai bulanan dari kedua parameter selama satu tahun operasional. *Performance Ratio* (PR) merupakan indikator efisiensi sistem yang menunjukkan seberapa besar energi yang dikonversi menjadi listrik berguna dibandingkan dengan energi teoretis yang tersedia dari radiasi matahari (Kumar *et al.* 2021). Nilai PR yang mendekati 1 menandakan sistem sangat efisien, sementara nilai yang lebih rendah menunjukkan adanya kerugian sistem, seperti kerugian konversi *inverter*, suhu panel, atau degradasi komponen. Dalam grafik, terlihat bahwa nilai PR secara umum berkisar antara 0,55 hingga 0,75, dengan nilai tertinggi terjadi pada bulan Januari, November, dan Desember. Hal ini mengindikasikan bahwa pada bulan-bulan tersebut sistem bekerja lebih efisien dibandingkan bulan-bulan lainnya.

Sementara itu, *Solar Fraction* (SF) menunjukkan besar energi yang dibutuhkan beban (pompa hidroponik) dapat dipenuhi oleh energi dari sistem PLTS. Nilai SF yang mendekati 1 berarti hampir seluruh kebutuhan energi beban terpenuhi dari energi surya. Dalam grafik ini, SF mencapai nilai mendekati 1 (antara 0,95–1,0) sepanjang tahun, menandakan bahwa sistem PLTS yang dirancang memiliki kapasitas yang cukup untuk menunjang operasi pompa hidroponik secara mandiri hampir sepanjang waktu. Hal ini sangat mendukung keberlanjutan

sistem budidaya kangkung yang membutuhkan pasokan energi listrik yang stabil untuk sirkulasi larutan nutrisi.

Fenomena tingginya nilai PR pada bulan Januari, November, dan Desember dapat dijelaskan oleh beberapa faktor. Pertama, pada bulan-bulan tersebut intensitas radiasi matahari memang lebih rendah dibandingkan bulan-bulan musim kemarau, sehingga suhu permukaan panel surya relatif lebih rendah. Suhu panel yang lebih rendah akan menurunkan resistansi internal dan meningkatkan efisiensi konversi daya, yang pada akhirnya meningkatkan nilai PR. Kedua, pada bulan-bulan ini beban sistem pompa hidroponik tetap konstan, sementara suplai energi dari PLTS yang sedikit menurun tetap cukup untuk memenuhi kebutuhan energi harian, sehingga rasio antara output aktual dan output teoretis menjadi lebih tinggi. Ketiga, sistem tidak mengalami kelebihan produksi energi seperti pada bulan puncak radiasi (Juli–September), sehingga kerugian karena surplus energi atau pembatasan pengisian baterai juga lebih kecil.

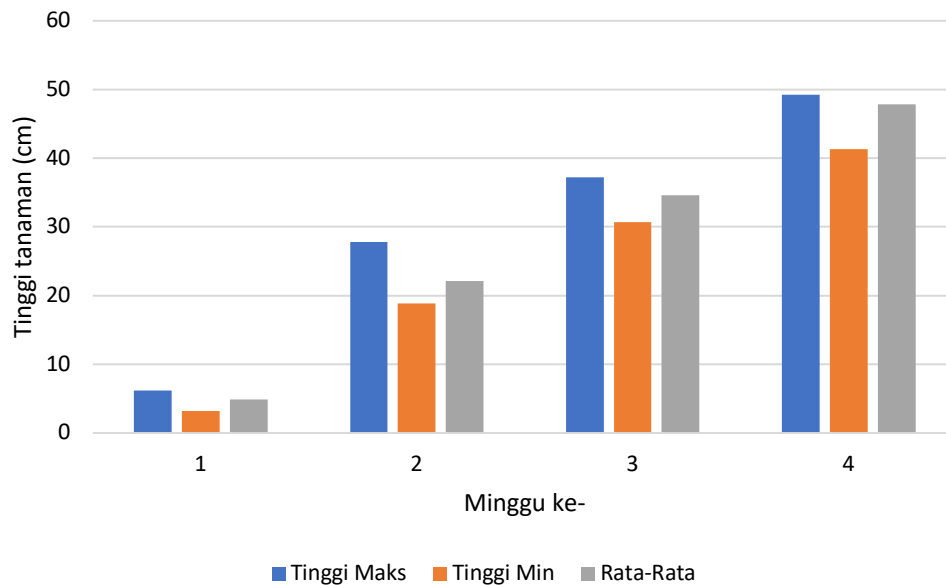
Secara umum, grafik ini menunjukkan bahwa sistem PLTS yang dirancang untuk mendukung hidroponik rakit apung berjalan stabil, efisien, dan andal sepanjang tahun, dengan tingkat pemenuhan energi yang tinggi dan efisiensi konversi yang cukup baik. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan perancangan energi berbasis surya sangat sesuai untuk kebutuhan pasokan energi berskala rendah. Penerapan PLTS pada fasilitas dengan konsumsi listrik berpotensi mengurangi biaya energi listrik mencapai 22% (Aji *et al.* 2022). Selain itu, pengetahuan terhadap dinamika PR dan SF juga sangat penting sebagai bahan evaluasi perbaikan sistem, terutama dalam konteks perubahan iklim dan variabilitas cuaca tahunan.



Gambar 7 Grafik *Performance Ratio* (PR) dan *Solar Fraction* (SF) PLTS hidroponik rakit apung

Pengamatan keragaman dan pertumbuhan tanaman kangkung menunjukkan bahwa pada fase persemaian, tinggi tanaman berkisar antara 1,9–5,3 cm. Memasuki minggu pertama setelah tanam, tinggi tanaman meningkat menjadi 3,2–6,2 cm. Pertumbuhan signifikan terjadi pada minggu kedua, dengan tinggi mencapai 18,9–27,8 cm seiring dengan pembentukan daun sejati. Pada minggu ketiga, setelah peningkatan konsentrasi nutrisi, tinggi tanaman mencapai 30,7–37,2 cm. Menjelang panen pada minggu keempat, tinggi tanaman berkisar antara 41,3–49,2 cm. Gambar 8 menunjukkan perubahan tinggi rata-rata tanaman kangkung selama proses budidaya. Proses budidaya kangkung dimulai dengan persemaian benih menggunakan media tanam *rockwool*. Setelah tahap persemaian, bibit dipindahkan ke

sistem hidroponik rakit apung yang didukung oleh PLTS, dengan masa pemeliharaan selama 28 hari. Selama fase awal pertumbuhan, larutan nutrisi AB Mix diberikan dengan konsentrasi 400–500 ppm. Pada fase pertumbuhan vegetatif, konsentrasi nutrisi ditingkatkan menjadi 800–1000 ppm untuk mendukung perkembangan tanaman.



Gambar 8. Grafik pengamatan tinggi tanaman kangkung pada PLTS hidroponik

Panen dilakukan dengan memotong bagian pangkal tanaman, tanpa menyertakan akar. Bobot segar tanaman per lubang tanam berkisar antara 65–148 gram dengan rata-rata sebesar 96,31 gram (untuk 8 bibit per lubang tanam). Dengan total 200 lubang tanam pada luasan rakit apung 7,5 m², total produksi kangkung per siklus mencapai 19,26 kg atau sebesar 2,57 kg/m². Hasil pertumbuhan dan produktivitas kangkung pada sistem hidroponik rakit apung berbasis PLTS ini lebih tinggi jika dibandingkan dengan budidaya konvensional sebesar 0,5–0,65 kg/m² (Nisa *et al.* 2015). Perbandingan ini menunjukkan bahwa sistem hidroponik rakit apung berbasis PLTS mampu menghasilkan pertumbuhan dan produktivitas kangkung yang kompetitif dibandingkan dengan sistem hidroponik lainnya, dengan keunggulan tambahan berupa pemanfaatan energi terbarukan serta dapat mengurangi biaya operasional kelistrikan.

4. Simpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa rancangan sistem PLTS hidroponik rakit apung skala mikro dapat secara efektif menyediakan energi yang dibutuhkan untuk operasional budidaya tanaman kangkung. Sistem PLTS dirancang secara *off-grid* dengan panel surya (PV) berkapasitas 80 Wp, inverter 100 W dan baterai VRLA 30 Ah/12 V. Kapasitas energi harian yang dihasilkan sistem PLTS sebesar 289,33 Wh/hari terbukti cukup untuk memenuhi kebutuhan pompa venturi dengan performa sistem yang ditunjukkan oleh nilai PR tahunan sebesar 60,1% dan SF sebesar 97,2%. Sistem tetap stabil meskipun terdapat fluktuasi radiasi surya dengan penggunaan baterai sebagai *buffer* energi. Dari aspek pertumbuhan tanaman, PLTS hidroponik rakit apung mampu menghasilkan panen sebesar 2,57 kg/m² per siklus, yang menunjukkan produktivitas tinggi dan kompetitif dibandingkan metode konvensional. Sebagai saran kedepan, untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan dapat dilakukan pengembangan

sistem pemantauan (*monitoring*) dan kontrol berbasis IoT guna meningkatkan efisiensi energi dan responsivitas terhadap kondisi cuaca, serta melakukan analisis kelayakan finansial jangka panjang guna mendukung adopsi teknologi ini pada skala petani kecil dan komersial.

Daftar Pustaka

- Ahmadi A, Alwina JP, Amalia, A. 2025. Peningkatan produktivitas pertanian melalui penerapan hidroponik dan alat penyiraman berbasis listrik tenaga surya di Desa Simbaringin, Mojokerto. *Sejahtera*, 4(1): 98–109. <https://doi.org/10.58192/sejahtera.v4i1.2935>.
- Aji EP, Wibowo P, Windarta J. 2022. Kinerja pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dengan sistem on grid di BPR BKK Mandiraja Cabang Wanayasa Kabupaten Banjarnegara. *J. Energi Baru dan Terbarukan*. 3(1):15–27. doi:10.14710/jebt.2022.13158.
- Bararah K, Al-Aminah R. 2023. Strategi pengembangan pertanian berkelanjutan: optimalisasi smart greenhouse di Kabupaten Mojokerto melalui penggunaan agri-voltaic. *TheJournalish: Social and Governemtn*. 4(5): 353–363. doi:10.55314/tsg.v4i5.621.
- Chamara R, Beneragama C. 2020. Agrivoltaic systems and its potential to optimize agricultural land use for energy production in Sri Lanka: A Review. *J. Sol. Energy Res*. 5: 417–431.
- Choi CS, Ravi S, Siregar IZ, Dwiyantri FG, Macknick J, Elchinger M, Davatzes NC. 2021. Combined land use of solar infrastructure and agriculture for socioeconomic and environmental co-benefits in the tropics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151. doi:10.1016/j.rser.2021.111610.
- Dupraz C, Marrou H, Talbot G, Dufour L, Nogier A, Ferard Y. 2011. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renew Energy*. 36(10): 2725–2732. doi:10.1016/j.renene.2011.03.005.
- Fauzan MA, Chumaidiyah E, Suryana N. 2022. Analisis pemilihan teknologi hidroponik berdasarkan proses bisnis, produktivitas dan finansial. *Jurnal INTECH Teknik Industri Universitas Serang Raya*. 8(1):1–8. doi:10.30656/intech.v8i1.3858.
- Fitrah H. 2020. *Analisis Financial Usaha Tani Kangkung (Ipomoea reptans poir)*. Aceh(ID): Radja Publika.
- Gillani SA, Abbasi R, Martinez P, Ahmad R. 2023. Comparison of energy-use efficiency for lettuce plantation under nutrient film technique and deep-water culture hydroponic systems. *Procedia Computer Science*. 217: 11–19. doi: 10.1016/j.procs.2022.12.197.
- Jensen MH. 2017. *Hydroponic Systems: State of the Art for Agricultural Production*. Food and Agriculture Organization (FAO) Publication.
- Joewono A, Angka PR, Sitepu R, Yuliati Y. 2023. Energy assessment of solar power plant on-grid bi-direction 3 KW 1 Phase. *Aceh Int. J. Sci. Technol*. 12(3): 317–326. doi:10.13170/aijst.12.3.30259.
- Karimzadeh S, Daccache A, Rulli MC, Ahamed MS. 2025. Global water-nutrient-salinity-energy nexus in lettuce production: From open-field irrigation to closed-loop hydroponics in greenhouses. *Journal of Agriculture and Food Research*. 21: 2–21. doi: 10.1016/j.jafr.2025.101935.
- Khan J, Arsalan MH. 2016. Solar power technologies for sustainable electricity generation – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 55: 414–425. doi:10.1016/j.rser.2015.10.135.
- Kumar R, Rajoria CS, Sharma A, Suhag S. 2021. Design and simulation of standalone solar PV system using PVsyst Software: A case study. *Today Proc*. 46: 5322–5328. doi:10.1016/j.matpr.2020.08.785.

- Kurniawan A, Lestari HA. 2020. Sistem kontrol nutrisi floating hydroponic system (*Ipomea reptans*) menggunakan internet of things berbasis telegram. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*. 9(4):326–335. doi:10.23960/jtep-l.v9.i4.326-335.
- Lee S, Lee JH, Jeong Y, Kim D, Seo B, Seo Y, Kim T, Choi W. 2023. Agrivoltaic system designing for sustainability and smart farming: Agronomic aspects and design criteria with safety assessment. *J. Applied Energy* (341–121130).<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121130>.
- Mansur A. 2021. Analisa kinerja PLTS on Grid 50 KWP akibat efek bayangan menggunakan software PVSYST. *Transmisi*. 23(1): 28–33. doi:10.14710/transmisi.23.1.28-33.
- Mardiyono M, Ariyono S, Wasito E., Handoko S. 2018. pemanfaatan teknologi konversi energi surya untuk hidroponik pada SMP Alam Ar Ridho. *Jurnal DIANMAS*. 7(1): 19–26.
- Nakoul Z, Bibi-Triki N, Kherrous A, Bessenouci MZ, Khelladi S. 2014. Optimization of a solar photovoltaic applied to greenhouses. *Phys. Procedia*. 55: 383–389.
- Nisa NA, Amarillis S, Guntoro D. 2022. Budidaya kangkung sistem hidroponik rakit apung kangkung production on the floating hydroponic system. *Prosiding Seminar Nasional PERHORTI 2022*. 19-20 Oktober 2022, 35–45.
- Ramadhan AI, Diniardi E, Mukti SH. 2016. Analisis desain sistem pembangkit listrik tenaga surya kapasitas 50 WP. *Teknik*. 37(2): 59–63. doi:10.14710/teknik.v37i2.9011.
- Ramdhani GA, Kurniawan E, Pangaribuan P. 2024. Rancang bangun plts hybrid pada sistem hidroponik. *E-proceeding of Engineering*. 11 (5): 5468–5475.
- Samsurizal, Mauriraya KT, Fikri M, Pasra N, Christiono. 2021. *Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)*. Jakarta: Institut Teknologi PLN.
- Sanjaya OI, Giriantari IAD, Kumara INS. 2019. Perancangan sistem pompa irigasi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) untuk pertanian Subak Semaagung. *Jurnal SPEKTRUM*. 6(3): 114–121.
- Shaikh MRS. 2017. A review paper on electricity generation from solar energy. *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.* V(IX): 1884–1889. doi:10.22214/ijraset.2017.9272.
- Swastika S, Yulfida A, Sumitro Y. 2018. *Petunjuk Teknis: Budidaya Sayuran Hidroponik (Bertanam Tanpa Media Tanah)*. Volume ke-1. Pekanbaru (ID): Balai Pengkajian Teknologi Pertanian Riau, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian.
- Tharo Z, Syahputra E, Mulyadi R. 2022. Analysis of saving electrical load costs with a hybrid source of PLN-PLTS 500 Wp. *Journal of Applied Engineering and Technological Science*. 4(1): 235–243. doi:doi.org/10.37385/jaets.v4i1.1024
- Widayana G. 2012. Pemanfaatan energi surya. *Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan*. 9(1): 37–46.
- Xu Z, Elomri A, Al-Ansari T, Kerbache L, El Mekawy T. 2022. Decisions on design and planning of solar-assisted hydroponic farms under various subsidy schemes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 156: 111958. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111958>
- Yuliananda S, Sarya G, Hastijanti RAR. 2015. Pengaruh perubahan intensitas matahari terhadap daya keluaran panel surya. *Jurnal Pengabdian LPPM Surabaya Untag Nopember*. 01(02): 193–202.