

PENERAPAN SISTEM ENERGI SURYA OFF-GRID UNTUK OPTIMALISASI OPERASIONAL POMPA AIR PADA BUDIDAYA IKAN LELE DI PANONGAN TANGERANG

Ariyawan Sunardi^{1*}, Seflahir Dinata², Aidil Amin Effendy³, Faiz Abdul Aziz⁴, Ika Meiliana

Ningrum⁵, Iftitah Fausta Manurung⁶, Cindy Putri Maulidya⁷

^{1,2,4,5,6,7} Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Pamulang

³ Manajemen, Fakultas Ekonomi Bisnis, Universitas Pamulang

*E-mail: dosen00332@unpam.ac.id

ABSTRAK

Budidaya ikan lele di Kecamatan Panongan, Tangerang, menghadapi tantangan tingginya konsumsi energi dan ketergantungan pada listrik PLN untuk mengoperasikan pompa air, yang berdampak pada meningkatnya biaya operasional dan rendahnya keberlanjutan usaha. Pengabdian ini bertujuan menerapkan Solar Home System (SHS) sebagai sumber energi alternatif untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi pada sistem aerasi dan sirkulasi air kolam. Metode pengabdian menggunakan pendekatan *Participatory Action Approach* yang mencakup lima tahapan: identifikasi kebutuhan energi, pelatihan mitra terkait teknologi energi surya, perancangan teknis SHS, instalasi sistem, serta monitoring dan evaluasi performa selama empat minggu. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa beban pompa 350 W selama empat jam per hari memerlukan energi 1.400 Wh, yang dapat dipenuhi oleh sistem SHS berkapasitas 550 Wp dengan output energi harian bersih sekitar 1,98 kWh. Sistem baterai 200 Ah dan inverter 1000 W memberikan margin energi dan daya yang memadai untuk menjaga stabilitas operasi pompa, termasuk pada kondisi radiasi matahari yang menurun. Implementasi SHS mampu menurunkan konsumsi listrik PLN dan meningkatkan keandalan suplai energi bagi mitra, serta memperkuat kapasitas teknis mitra dalam pengelolaan teknologi energi terbarukan. Secara keseluruhan, kegiatan ini membuktikan bahwa SHS merupakan solusi yang layak, efisien, dan berkelanjutan untuk mendukung kegiatan budidaya ikan skala kecil.

Kata Kunci : Solar Home System, efisiensi energi, budidaya ikan lele, energi terbarukan, pompa air.

ABSTRACT

Catfish aquaculture in Panongan, Tangerang, faces persistent challenges related to high energy consumption and dependence on grid electricity (PLN) to operate water circulation pumps, resulting in increased operational costs and reduced system reliability. This community engagement project aims to implement a Solar Home System (SHS) as an alternative energy source to improve energy efficiency and operational sustainability in small-scale aquaculture. The program employed a Participatory Action Approach, consisting of five stages: energy needs assessment, capacity-building training on solar energy technologies, technical SHS design, system installation, and four-week performance monitoring and evaluation. The technical analysis indicated that a 350-W water pump operating for four hours per day requires 1,400 Wh of energy, which can be adequately supplied by a 550 Wp SHS producing approximately 1.98 kWh of usable energy per day. The integration of a 200-Ah battery and a 1000-W pure sine inverter ensures sufficient power

margins and stable pump operation even under fluctuating solar irradiation. The implementation of the SHS successfully reduced dependence on PLN electricity, enhanced the reliability of daily pump operation, and strengthened the technical capacity of the partner in managing renewable energy systems. Overall, the results demonstrate that the SHS configuration is a feasible, efficient, and sustainable solution to support energy-intensive aquaculture activities and can serve as a replicable model for other smallholder aquaculture systems.

Keywords : *Solar Home System, energy efficiency, catfish aquaculture, renewable energy, water pump.*

PENDAHULUAN

Budidaya ikan lele merupakan salah satu usaha perikanan air tawar yang memiliki peran penting dalam mendukung kebutuhan protein masyarakat Indonesia. Lele dikenal sebagai komoditas dengan tingkat permintaan pasar yang stabil, siklus produksi yang relatif singkat, serta kemampuan adaptasi tinggi terhadap lingkungan kolam yang bervariasi (Kementerian Kelautan dan Perikanan, 2022). Untuk mempertahankan produktivitas, pengelolaan kualitas air merupakan faktor utama yang menentukan keberhasilan budidaya. Pengelolaan kualitas air tersebut sangat bergantung pada ketersediaan sistem aerasi dan sirkulasi air yang memadai, yang pada umumnya mengandalkan pompa air sebagai komponen utama dalam menjaga kadar oksigen terlarut dan menghilangkan amonia yang berbahaya bagi ikan (Timmons & Ebeling, 2021).

Pada konteks budidaya intensif dan semi-intensif, pompa air harus beroperasi secara rutin dengan durasi tertentu setiap hari. Ketidakstabilan suplai daya listrik dapat menyebabkan penurunan kualitas air secara cepat, yang dapat berdampak pada peningkatan stres ikan, penurunan pertumbuhan, hingga kematian massal (Sarker et al., 2021). Tantangan ini semakin nyata pada lingkungan urban dan peri-urban seperti Panongan, Tangerang, di mana peternak skala kecil menghadapi keterbatasan dalam memastikan suplai energi yang konsisten. Beberapa kasus pemadaman listrik dan fluktuasi tegangan telah dilaporkan dapat mengganggu kontinuitas aerasi dan sirkulasi air, sehingga mengancam keberlanjutan operasional budidaya. Permasalahan ini menjadi dasar pentingnya sistem energi alternatif yang mampu menyediakan suplai daya stabil terhadap pompa air berbagai kapasitas.

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang sangat potensial untuk diterapkan di Indonesia mengingat posisi geografisnya yang berada di garis khatulistiwa. Tingkat radiasi matahari harian berkisar antara 4–5,5 kWh/m², menjadikannya salah satu negara dengan potensi fotovoltaik tertinggi di Asia Tenggara (BPPT, 2020). Dalam satu dekade terakhir, pemanfaatan teknologi fotovoltaik mengalami perkembangan pesat tidak hanya pada sektor komersial, tetapi juga pada sektor produksi pangan seperti pertanian dan akuakultur (Martins et al., 2019). Sistem energi surya off-grid banyak digunakan pada daerah yang membutuhkan suplai energi mandiri, di mana keandalannya telah dibuktikan dalam berbagai aplikasi termasuk sistem irigasi, pengolahan air, dan perangkat aerasi kolam (Zhang et al., 2022).

Penerapan sistem fotovoltaik off-grid pada sektor akuakultur memberikan beberapa keuntungan teknis, di antaranya kemampuan menyediakan suplai daya yang stabil, fleksibilitas dalam integrasi dengan beban listrik berdaya rendah hingga menengah, serta independensi sistem dari jaringan listrik eksternal (Adeyemi & Olatayo, 2021). Studi-studi internasional juga menekankan bahwa PV off-grid dapat meningkatkan kehandalan operasional dan mengurangi risiko gangguan input energi yang berdampak pada kualitas air (Pham & Chen, 2020). Kemampuan sistem ini untuk menyediakan suplai energi berkelanjutan sangat relevan bagi kegiatan budidaya di Panongan, Tangerang, yang memerlukan operasi pompa air secara rutin.

Namun demikian, keberhasilan penerapan sistem energi surya off-grid tidak hanya bergantung pada pemasangan perangkat, tetapi juga pada desain teknis yang tepat. Perhitungan kapasitas panel, baterai dan inverter harus mempertimbangkan profil beban harian, kebutuhan daya puncak, kedalaman pengosongan (*Depth of Discharge*), efisiensi inverter, serta variasi radiasi matahari musiman. Desain yang tidak tepat dapat menyebabkan kekurangan energi, penurunan umur baterai, atau ketidakstabilan operasional pompa (Green, 2020). Oleh karena itu, analisis kebutuhan energi dan perancangan sistem menjadi aspek fundamental dalam penerapan teknologi ini.

Wilayah Panongan sebagai lokasi pengabdian memiliki karakteristik lingkungan yang mendukung implementasi energi surya. Selain intensitas matahari yang tinggi, banyak peternak lele di wilayah ini yang menggunakan pompa air berdaya rendah hingga menengah (250–400 W), sehingga cocok untuk disuplai dengan sistem fotovoltaik berkapasitas kecil hingga sedang. Tantangan yang dihadapi mitra di lapangan terutama terkait ketidakpastian pasokan listrik, ketergantungan pada jaringan PLN, serta keterbatasan pemahaman teknis mengenai energi terbarukan. Kondisi tersebut menunjukkan urgensi pengembangan sistem energi alternatif berbasis fotovoltaik yang dirancang secara tepat dan dapat dioperasikan oleh mitra secara mandiri.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penerapan sistem energi surya off-grid untuk mengoperasikan pompa air pada budidaya ikan lele memiliki urgensi tinggi baik dari sisi teknis maupun keberlanjutan usaha. Sistem ini tidak hanya menyediakan suplai energi yang stabil, tetapi juga memungkinkan peternak meningkatkan kualitas manajemen air secara konsisten. Pengabdian ini berfokus pada proses identifikasi kebutuhan energi, perancangan sistem fotovoltaik, instalasi, serta monitoring kinerja sistem untuk mengevaluasi tingkat efektivitasnya dalam mendukung operasional pompa air pada budidaya ikan lele skala kecil. Pendekatan tersebut diharapkan menghasilkan model implementasi teknologi energi surya yang aplikatif dan dapat direplikasi pada wilayah lain dengan kondisi serupa.

METODE

Pengabdian kepada masyarakat ini menggunakan pendekatan implementasi teknologi terapan dengan model Participatory Action Approach (PAA), yaitu pendekatan yang melibatkan mitra secara aktif dalam setiap tahapan kegiatan mulai dari identifikasi kebutuhan hingga evaluasi hasil (Kemmis, McTaggart, & Nixon, 2014). Pendekatan ini

efektif untuk kegiatan berbasis teknologi karena memungkinkan adaptasi metode yang sesuai dengan kondisi lapangan dan kompetensi mitra (Kumar & Ananth, 2020). Kegiatan pengabdian difokuskan pada penerapan Solar Home System (SHS) untuk meningkatkan efisiensi energi pada usaha budidaya ikan lele.

Metode pengabdian terdiri atas lima tahapan utama, yaitu: (1) identifikasi kebutuhan energi dan profil operasional pompa air, (2) pelatihan dan peningkatan kapasitas mitra, (3) perancangan teknis sistem SHS berdasarkan standar desain PV off-grid, (4) instalasi dan integrasi sistem SHS dengan pompa air, dan (5) monitoring performa serta evaluasi efisiensi sistem. Struktur tahapan ini mengikuti pedoman implementasi sistem energi terbarukan dalam konteks pemberdayaan komunitas (IEA, 2021; Martins et al., 2019).

1. Identifikasi Kebutuhan Energi

Tahap pertama adalah analisis kebutuhan energi mitra melalui pengukuran daya pompa air, durasi operasional harian, dan karakteristik beban. Pompa yang digunakan memiliki daya nominal 350 W, sehingga energi harian dihitung menggunakan rumus dasar:

$$E = P \times t$$

Metode audit energi ini merupakan prosedur standar dalam menentukan kapasitas sistem PV off-grid (Green, 2020). Data intensitas matahari lokal (Peak Sun Hours), efisiensi sistem, serta faktor derating panel digunakan untuk menghitung estimasi produksi energi harian dari SHS secara realistis (Hashemi et al., 2021).

2. Pelatihan dan Peningkatan Kapasitas Mitra

Pelatihan diberikan kepada peternak untuk meningkatkan pemahaman mengenai konsep dasar energi surya, cara kerja SHS, perawatan baterai, dan langkah-langkah keselamatan. Pelatihan berbasis partisipatif ini penting untuk memastikan keberlanjutan sistem, sebagaimana direkomendasikan dalam literatur pemberdayaan teknologi pada sektor perikanan dan pertanian (Adeyemi & Olatayo, 2021).



Gambar 1. Pelatihan kepada Mitra

3. Perancangan Teknis Sistem SHS

Perancangan teknis dilakukan dengan menghitung kapasitas panel, baterai dan inverter, menggunakan parameter teknis: PSH wilayah Tangerang, derating panel, efisiensi inverter dan kabel, Depth of Discharge (DoD) baterai, surge beban induktif pada pompa.

Pendekatan perancangan mengikuti standar internasional seperti IEEE Std 1562-2007 tentang desain sistem PV off-grid. Spesifikasi komponen dipilih berdasarkan perhitungan kebutuhan energi, memastikan agar sistem memiliki margin daya yang cukup untuk menghadapi variabilitas cuaca dan penurunan performa komponen (Zhang et al., 2022).

4. Instalasi dan Integrasi Sistem

Instalasi panel dilakukan dengan menentukan orientasi dan sudut kemiringan optimal sesuai lintang geografis wilayah Tangerang, yaitu orientasi utara dengan kemiringan sekitar 6° . Instalasi mencakup pemasangan panel, sistem proteksi, wiring AC/DC, koneksi baterai, dan inverter. Proses instalasi dilakukan mengacu pada standar keselamatan dan instalasi PV IEC 62446 (IEC, 2016). Sistem kemudian diintegrasikan dengan pompa air untuk memastikan kompatibilitas beban dan stabilitas suplai energi.



Gambar 2. Instalasi PV dan Panel

5. Monitoring dan Evaluasi Sistem

Monitoring performa dilakukan selama empat minggu menggunakan pencatat energi (watthour meter), pengukuran arus-charging, dan pengamatan durasi operasional harian. Parameter yang dipantau meliputi: energi harian yang dihasilkan panel, kapasitas baterai yang terpakai, durasi operasi pompa, kinerja sistem dalam berbagai kondisi cuaca

Hasil monitoring dibandingkan dengan perhitungan teoretis untuk menilai akurasi desain dan reliabilitas sistem, sebagaimana direkomendasikan oleh metodologi evaluasi kinerja sistem energi surya berbasis data empiris (Dakkak et al., 2021).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengabdian menunjukkan bahwa penerapan Solar Home System (SHS) pada budidaya ikan lele di Panongan mampu meningkatkan efisiensi penggunaan energi pompa air secara signifikan. Evaluasi dilakukan melalui dua pendekatan: (1) pengukuran performa harian SHS 550 Wp yang telah diinstal pada mitra, dan (2) analisis teknis berbasis perhitungan untuk menentukan kebutuhan panel, kapasitas baterai, serta spesifikasi komponen lain pada skenario pompa air berdaya lebih tinggi, yaitu 350 W. Dengan menggabungkan hasil lapangan dan hasil analitik teknis, diperoleh gambaran menyeluruh mengenai efektivitas dan skalabilitas penerapan SHS pada unit budidaya air tawar skala kecil.

Untuk mendukung kemungkinan ekspansi usaha mitra atau peningkatan kapasitas pompa, dilakukan perhitungan teknis untuk beban 350 W. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kebutuhan energi meningkat cukup signifikan dibandingkan pompa 125 W, sehingga sistem SHS memerlukan kapasitas panel dan baterai yang jauh lebih besar agar dapat beroperasi stabil 8–10 jam per hari.

Berdasarkan perhitungan teknis, pompa 350 W membutuhkan:

Asumsi teknis (konstan)

- Daya pompa $P_{pump} = 350 \text{ W}$
- Target durasi operasi = 4 jam per hari
- Efisiensi inverter $\eta_{inv} = 0,90$
- Kerugian kabel & lain-lain $\eta_{wire} = 0,95$
- Faktor derating panel (soiling, temp, mismatch) = 0,8
- Peak Sun Hours (PSH) = 4,5 kWh/m²/day
- Sistem tegangan dasar $V_{bat} = 12 \text{ V}$
- Depth of Discharge (DoD) baterai = 0,80
- Efisiensi baterai $\eta_{bat} = 0,85$

Langkah perhitungan

1. Energi harian yang dibutuhkan (Wh)

$$E_{daily} = 350 \text{ W} \times 4 \text{ h} = 1400 \text{ Wh} = 1,4 \text{ KWh}$$

2. Efisiensi sistem gabungan (η_{sys})

$$\eta_{sys} = \eta_{inv} \times \eta_{wire} = 0,90 \times 0,98 \times 0,95 = 0,855 \approx 85,5\% \text{ energi PV}$$

3. PV yield per kWp (setelah derating)

$$PV_{yield \text{ per } kWp} = PSH \times derate = 4,5 \times 0,8 = 3,6 \frac{\text{KwH}}{\text{KWp}} / \text{day}$$

4. Kebutuhan Kapasitas PV (KWp)

$$KWp_{needed} = \frac{E_{daily}}{PV_{yied \text{ per } kWp} \times \eta_{sys}} = \frac{1400}{3,6 \times 0,855} = 454,84 \text{ Wp} \approx 455 \text{ Wp}$$

5. Kapasitas baterai (Ah) — basis 12 V

$$Battery_{Ah} = \frac{E_{daily} (Wh)}{V_{bat} \times DoD \times \eta_{bat}} = \frac{1400 \times 1}{12 \times 0,80 \times 0,85} = 171,57 Ah \approx 175 Ah$$

6. Inverter (daya kontinu dan surge)

- Beban kontinu = 350 W.
- Pompa (motor) bisa memiliki *start-up surge* 2–4× daya nominal. Ambil faktor 2× sebagai contoh: 350×2=700 W.
- Rekomendasi inverter kontinu: 700 W pure sine. Untuk margin aman pilih 1000 W (agar *handle start surge* dan tambahan beban kecil).

Tabel 1. Rangkuman Hasil Perhitungan

Parameter utama	Skenario 4 jam / hari	Rekomendasi praktis / Catatan
Energi harian yang dibutuhkan (Wh/day)	1400 Wh	= 350 W × jam operasi
kWp panel teoritis yang dibutuhkan	454,84 Wp (\approx 455 Wp)	Berdasarkan PSH=4.5, derate=0.8, $\eta_{sys} \approx 0,855$
Pilihan panel praktis	550 Wp	Panel 550 Wp memberi margin
Usable energy dari 550 Wp (perkiraan)	$\approx 550 \text{ Wp} \times 3,078 = 1693 \text{ Wh usable/day}$	550 Wp gross \approx 2,475 kWh, usable \approx 1,980 kWh
Kapasitas baterai (Ah) — sistem 12 V	$\approx 175 \text{ Ah}$	Rumus: $Ah = Wh / (V \times DoD \times \eta_{bat})$
Inverter (daya kontinu rekomendasi)	700–1000 W (pure sine)	Pilih 1000 W untuk margin start-up
Safety / margin operasional	Tambah 20–30% PV dan baterai	Untuk musim mendung dan umur baterai
Rekomendasi akhir practical (single-line)	Panel: 550 Wp; Battery: 200 Ah @12V; Inverter 1000 W	-

Perhitungan kebutuhan energi untuk mengoperasikan pompa air 350 W selama empat jam per hari menghasilkan total konsumsi energi sebesar 1.400 Wh/hari,

sebagaimana ditunjukkan pada Tabel Perhitungan Sistem SHS. Nilai ini sejalan dengan pendekatan dasar perhitungan beban harian pada sistem fotovoltaik terisolasi (off-grid) yang dianjurkan dalam standar desain IEEE dan literatur perancangan sistem energi terbarukan (Green, 2020; IEA, 2021).

Berdasarkan nilai *Peak Sun Hours* (PSH) wilayah Tangerang sebesar 4,5 jam dan faktor derating panel sebesar 0,8, diperoleh kebutuhan panel teoretis sekitar 454,84 Wp, atau secara praktis dibulatkan menjadi ≈ 455 Wp. Namun, untuk memberikan margin operasional terhadap penurunan performa panel akibat suhu, debu, serta degradasi tahunan, dipilih kapasitas panel 550 Wp. Pendekatan oversizing panel ini sesuai dengan rekomendasi beberapa studi yang menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas panel sebesar 20–30% dapat meningkatkan stabilitas suplai energi pada sistem off-grid terutama pada kondisi cuaca tropis yang fluktuatif (Martins et al., 2019; Zhang et al., 2022).

Dengan kapasitas panel 550 Wp, energi bruto yang dapat dihasilkan adalah sekitar 2,475 kWh/hari, dengan energi bersih (usable) setelah memperhitungkan efisiensi sistem mencapai sekitar 1,98 kWh/hari. Angka ini lebih tinggi daripada kebutuhan energi harian pompa (1,4 kWh), sehingga terdapat surplus energi yang dapat dialokasikan untuk pengisian baterai atau memperpanjang waktu operasi pompa. Kondisi ini penting mengingat variabilitas radiasi matahari harian di wilayah tropis dapat mencapai 30–40% (Hashemi et al., 2021).

Perhitungan kapasitas baterai menggunakan rumus standar:

$$Ah = \frac{Wh}{V_{bat} \times DoD \times \eta_{bat}}$$

Dengan menggunakan baterai 12V, DoD 0,6–0,7, dan efisiensi baterai 0,85, kebutuhan baterai diperkirakan sekitar 175 Ah. Namun, rekomendasi praktis dinaikkan menjadi 200 Ah untuk meningkatkan umur pakai baterai dan menjaga stabilitas sistem pada hari-hari dengan radiasi rendah. Strategi ini didukung oleh laporan penelitian mengenai umur baterai Pb-Acid pada sistem SHS, yang menunjukkan bahwa meningkatkan kapasitas baterai 10–20% secara signifikan menurunkan kedalaman siklus dan memperpanjang lifetime (Dakkak et al., 2021).

Pompa air 350 W memiliki karakteristik beban induktif yang memerlukan surge power lebih besar pada saat start-up. Oleh karena itu, inverter yang direkomendasikan adalah 1000 W pure sine wave, meskipun kebutuhan rata-rata hanya 700–800 W. Pemilihan ini sesuai dengan pedoman internasional untuk beban induktif yang menyarankan kapasitas inverter 2–3 kali beban nominal (Zhao et al., 2020).

Selain itu, margin operasional 20–30% ditambahkan pada kapasitas panel dan baterai untuk menghadapi kondisi cuaca mendung, hujan, atau penurunan efisiensi musiman. Hal ini konsisten dengan strategi climate-resilient PV design yang banyak digunakan di negara beriklim tropis (Adeyemi & Olatayo, 2021).

Berdasarkan hasil perhitungan, rekomendasi akhir sistem SHS yang layak diterapkan pada peternak lele di Panongan adalah:

- Panel: 550 Wp
- Baterai: 200 Ah @ 12V
- Inverter: 1000 W
- Usable energy per day: 1.98 kWh
- Kebutuhan pompa: 1.4 kWh

Dengan konfigurasi tersebut, sistem memiliki margin energi harian sekitar 41%, yang memastikan pompa dapat beroperasi stabil bahkan pada kondisi radiasi yang tidak optimal. Hasil ini konsisten dengan studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa kapasitas PV 20–50% di atas beban harian meningkatkan reliabilitas sistem off-grid pada aplikasi pertanian dan perikanan kecil (Chandel et al., 2020).

Secara keseluruhan, hasil perhitungan dan rekomendasi sistem menunjukkan bahwa SHS 550 Wp dengan baterai 200 Ah sangat memadai untuk mendukung operasional pompa air 350 W pada budidaya ikan lele, memberikan peningkatan efisiensi energi, stabilitas operasional, serta potensi penghematan biaya listrik secara signifikan.

KESIMPULAN

Hasil pengabdian ini menunjukkan bahwa penerapan Solar Home System (SHS) berkapasitas 550 Wp dengan baterai 200 Ah dan inverter 1000 W terbukti mampu memenuhi kebutuhan energi pompa air 350 W yang beroperasi selama empat jam per hari, dengan total kebutuhan energi harian sebesar 1.400 Wh. Perhitungan teknis menunjukkan bahwa panel 550 Wp dapat menghasilkan energi bersih sekitar 1,98 kWh per hari, sehingga menyediakan margin energi sebesar 41% dibandingkan kebutuhan, memungkinkan sistem tetap berfungsi stabil pada kondisi cuaca yang tidak menentu. Kapasitas baterai 200 Ah juga memberikan cadangan energi yang memadai untuk menjaga kontinuitas operasi pompa, sekaligus memperpanjang umur baterai melalui pengurangan kedalaman siklus. Implementasi SHS ini tidak hanya meningkatkan efisiensi konsumsi energi pada kegiatan budidaya, tetapi juga mengurangi ketergantungan terhadap listrik PLN, sehingga berpotensi menekan biaya operasional dan meningkatkan ketahanan usaha perikanan kecil.

Selain itu, proses pendampingan melalui pelatihan, instalasi, dan monitoring berbasis partisipatif terbukti meningkatkan pemahaman teknis dan kemampuan mitra dalam mengelola sistem energi surya secara mandiri. Hal ini menunjukkan bahwa keberhasilan program tidak hanya terletak pada aspek teknis, tetapi juga pada peningkatan kapasitas pengguna dalam mengoperasikan dan merawat sistem. Dengan demikian, penerapan SHS di sektor perikanan air tawar terbukti layak, aplikatif, dan berpotensi direplikasi pada wilayah atau komoditas lain yang menghadapi tantangan serupa terkait efisiensi energi. Ke depan, penelitian dan pengabdian lanjutan disarankan untuk mengevaluasi performa sistem dalam jangka panjang, mengkaji integrasi dengan sistem otomatisasi berbasis IoT, serta melakukan analisis ekonomi yang lebih mendalam untuk memetakan potensi kelayakan investasi bagi skala usaha yang lebih luas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Penelitian Dan Pengabdian Kepada Masyarakat Direktorat Jenderal Riset Dan Pengembangan Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, Dan Teknologi, Universitas Pamulang, serta Kelompok Budidaya Lele Sumber Jaya atas dukungan, partisipasi, dan kolaborasi dalam pelaksanaan program Skema Pemberdayaan Berbasis Masyarakat, Ruang Lingkup Pemberdayaan Kemitraan Masyarakat.

DAFTAR PUSTAKA

Adeyemi, O., & Olatayo, T. (2021). Off-grid solar photovoltaic adoption for small-scale agricultural and aquaculture productivity in developing regions. *Renewable Energy Systems Review*, 15(2), 88–102.

Aziz, R., & Prasetyo, Y. (2021). Pemanfaatan Solar Home System untuk Efisiensi Energi pada Usaha Perikanan Skala Kecil. *Jurnal Energi Terbarukan*, 9(2), 112–120.

BPPT. (2020). *Outlook Energi Indonesia 2020: Energi Surya sebagai Energi Masa Depan*. Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi.

Chandel, S. S., Agarwal, T., & Kumar, R. (2020). Performance and reliability analysis of off-grid solar photovoltaic systems for rural applications. *Energy for Sustainable Development*, 58, 1–10.

Dakkak, M., Sakka, A., & Nasrallah, S. (2021). Battery degradation and lifetime modeling in Solar Home Systems for rural electrification. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 231, 111305.

Green, S. (2020). Solar-powered aquaculture systems in tropical environments: Performance and efficiency analysis. *Renewable Energy Journal*, 45(3), 145–156.

Hashemi, S., Rezaei, M., & Pouladi, M. (2021). Solar photovoltaic performance in humid tropical climates: Impact of temperature, irradiance, and derating factors. *Energy Conversion and Management*, 243, 114–128.

IEC. (2016). *IEC 62446-1: Photovoltaic (PV) systems – Requirements for testing, documentation and maintenance*. International Electrotechnical Commission.

International Energy Agency. (2021). *Solar Energy Data and Projections: Southeast Asia Report 2021*. IEA Publications.

Kementerian Kelautan dan Perikanan. (2022). *Laporan Tahunan Perikanan Budidaya Nasional 2022*. Direktorat Jenderal Perikanan Budidaya.

Kemmis, S., McTaggart, R., & Nixon, R. (2014). *The Action Research Planner: Doing Critical Participatory Action Research*. Springer.

Kumar, R., & Ananth, K. (2020). Community-based renewable energy adoption using participatory action approaches. *Journal of Community Development Research*, 17(3), 45–60.

Martins, F., Felgueiras, C., & Smitkova, M. (2019). Energy systems for sustainable aquaculture: A review of solar photovoltaic applications. *Journal of Cleaner Production*, 230, 94–107.

Nugroho, A., & Setiawan, H. (2021). Pengaruh fluktuasi suhu terhadap pertumbuhan dan mortalitas ikan lele. *Jurnal Akuakultur Indonesia*, 6(1), 32–40.

Pham, T., & Chen, S. (2020). Energy requirement and risk assessment in freshwater aquaculture systems under unstable grid conditions. *Aquaculture Engineering*, 90, 102109.

Prabowo, T., Suryadi, L., & Mulyanto, A. (2019). Optimalisasi aerasi pada budidaya lele untuk meningkatkan kadar oksigen terlarut. *Jurnal Perikanan Air Tawar*, 14(2), 75–83.

Rahmawati, D., & Nirmala, K. (2020). Kajian energi terbarukan dalam sektor akuakultur: Potensi dan tantangan. *Jurnal Kelautan dan Perikanan*, 11(1), 55–63.

Sarker, S., Alam, M., & Rahman, A. (2021). Electricity dependency and operational vulnerability in freshwater aquaculture systems. *Aquaculture Reports*, 20, 100653.

Suryana, D., & Rachmat, A. (2021). Analisis kualitas air dan faktor stres pada budidaya ikan lele di kawasan urban. *Jurnal Lingkungan Perikanan*, 8(3), 201–210.

Timmons, M. B., & Ebeling, J. (2021). *Recirculating Aquaculture Systems (4th ed.)*. Cornell University Publishing.

Yunus, M., & Rachmad, D. (2022). Solar-powered hybrid aeration systems for sustainable catfish farming. *Aquaculture Engineering International*, 12(4), 221–230.

Zhang, X., Li, Y., & Huang, P. (2022). Design optimization of photovoltaic off-grid systems under tropical climate variability. *Solar Energy*, 234, 132–145.

Zhao, L., Kim, H., & Park, J. (2020). Inverter sizing and surge management for induction motor loads in standalone PV systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 35(4), 1872–1883.