

Perancangan Sistem Manajemen Sumber Daya Hybrid untuk Kontinuitas Energi pada Inkubator Telur Ayam

M. Ali Ramadhan¹, Renny Maulidda^{2*}, A. Rahman³

^{1,2,3} Program Studi Sarjana Terapan Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Sriwijaya

ABSTRAK

Kestabilan pasokan listrik merupakan faktor penting pada inkubator telur ayam karena fluktuasi suhu akibat pemadaman listrik dapat mengganggu perkembangan embrio dan menurunkan daya tetas. Penelitian ini bertujuan merancang sistem catu daya hibrida yang mengintegrasikan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai sumber utama pada siang hari (07.00–18.00 WIB) dan jaringan PLN sebagai sumber cadangan pada malam hari untuk menjaga kontinuitas suplai energi. Sistem menerapkan skema dual-source distribution yang memisahkan jalur 220 VAC untuk beban pemanas dan 5 VDC untuk sistem kontrol, serta manajemen energi berbasis waktu guna mengoptimalkan pemanfaatan energi surya. Sistem dibangun menggunakan panel surya 100 Wp, baterai lead-acid 12 V 120 Ah, Solar Charge Controller (SCC) PWM 50 A, inverter 200 W, modul step-down LM2596, dan Change Over Switch sebagai mekanisme perpindahan sumber daya. Hasil perancangan menunjukkan kebutuhan minimum baterai sebesar 28,2 Ah dan panel surya 59,55 Wp untuk memenuhi kebutuhan energi harian sebesar 225,566 Wh. Pengujian selama enam hari menunjukkan panel surya mampu menghasilkan energi harian sebesar 401,279–516,267 Wh. SCC mempertahankan tegangan baterai tetap stabil, inverter menghasilkan tegangan keluaran sesuai toleransi standar PLN, dan modul LM2596 menyediakan catu daya 5 VDC yang stabil bagi sistem kontrol. Mekanisme perpindahan sumber daya mampu mempertahankan seluruh beban inkubator tetap beroperasi tanpa reset selama transisi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi PLTS dan PLN mampu meningkatkan kontinuitas serta keandalan catu daya pada inkubator telur ayam.

Kata Kunci: Sistem Hybrid, PLTS, Inkubator Telur, Kontinuitas Energi, Manajemen Energi

Designing a Hybrid Power Supply Management System for Energy Continuity in the Chicken Egg Incubator

ABSTRACT

A stable power supply is essential for chicken egg incubators because temperature fluctuations caused by power outages can disrupt embryo development and reduce hatchability. This study aims to design a hybrid power supply system that integrates a Solar Photovoltaic (PV) system as the primary power source during daytime (07:00–18:00 WIB) and the utility grid (PLN) as a backup source at night to ensure continuous energy supply. The proposed system employs a dual-source distribution scheme that separates the 220 VAC heating load from the 5 VDC control system and implements a time-based energy management strategy to optimize solar energy utilization. The system consists of a 100 Wp solar panel, a 12 V 120 Ah lead-acid battery, a 50 A PWM Solar Charge Controller (SCC), a 200 W inverter, an LM2596 step-down converter, and a manual Change Over Switch for source switching. The design results indicate a minimum battery capacity of 28.2 Ah and a 59.55 Wp solar panel to meet the daily energy demand of 225.566 Wh. Experimental results over six days showed that the PV system generated 401.279–516.267 Wh of daily energy. The SCC maintained stable battery charging voltage, the inverter produced an AC output within the allowable PLN voltage tolerance, and the LM2596 converter provided a stable 5 VDC supply for the control system. The manual source-switching mechanism successfully maintained continuous operation of all incubator loads without system reset during power transitions. These results demonstrate that integrating a solar PV system with the PLN grid effectively improves the continuity and reliability of the power supply for chicken egg incubators.

Keywords: Hybrid system, Solar Power Plant (PV), Egg Incubator, Energy Continuity, Energy management

PENDAHULUAN

Inkubator merupakan teknologi yang menggantikan metode penetasan konvensional dengan sistem kendali elektronik untuk mengatasi keterbatasan kemampuan induk unggas yang hanya mampu mengerami maksimal 10 butir telur [1]. Keberhasilan penetasan sangat ditentukan oleh kestabilan suhu pada rentang 37,5-37,8 °C dan kelembapan 50-65% RH selama 21 hari masa inkubasi, karena fluktuasi parameter ini dapat memicu gangguan metabolisme embrio, peningkatan mortalitas, dan malformasi [2], [3]. Berbagai penelitian telah mengembangkan inkubator berbasis mikrokontroler dengan kendali PID dan pemantauan IoT untuk menjaga stabilitas parameter lingkungan tersebut [4]. Operasional inkubator menuntut pasokan energi listrik yang kontinu untuk menjalankan pemanas, kipas sirkulasi, motor pembalik telur, dan mikrokontroler.

Ketergantungan penuh pada jaringan PLN menimbulkan risiko ketika terjadi pemadaman karena interupsi daya akan memicu penurunan suhu drastis dan berpotensi menyebabkan kegagalan penetasan [5]. Di sisi lain, pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai alternatif ramah lingkungan memiliki keterbatasan berupa ketergantungan pada intensitas radiasi matahari sehingga tidak dapat menjamin kontinuitas pasokan 24 jam jika digunakan secara tunggal [6]. Beberapa studi telah menunjukkan bahwa integrasi PLTS dengan sumber daya cadangan dapat meningkatkan reliabilitas pasokan energi pada beban kritis, termasuk pada aplikasi inkubator telur berbasis *solar-powered* [7]. Kombinasi keduanya dalam sistem Hybrid PLTS-PLN menjadi pendekatan yang menjanjikan untuk mengatasi kelemahan masing-masing sumber, di mana panel surya berperan sebagai sumber utama pada siang hari dan PLN sebagai sumber Cadangan [8].

Kebaruan penelitian ini terletak pada tiga aspek. Pertama, penerapan skema *dual-source distribution* yang memisahkan jalur 220 VAC untuk beban pemanas dan motor dengan jalur 5 VDC untuk sistem kontrol berbasis mikrokontroler, sehingga setiap jalur memperoleh pasokan yang sesuai dengan karakteristik bebannya. Kedua, implementasi mekanisme *manual switching* berbasis manajemen waktu 11 jam per hari (07.00-18.00 WIB) yang dirancang untuk memaksimalkan pemanfaatan energi surya pada periode puncak radiasi sekaligus mengistirahatkan baterai pada malam hari guna menghindari *deep discharge* dan memperpanjang umur pakai baterai *Lead-Acid* 12 V 120 Ah [9]. Pendekatan manajemen energi berbasis waktu ini sejalan dengan strategi power management yang telah dikembangkan pada sistem PV/baterai untuk aplikasi agrikultur [10]. Ketiga, kontribusi aplikatif berupa solusi teknis yang hemat biaya dan mudah dioperasikan oleh peternak skala kecil tanpa memerlukan perangkat *Automatic Transfer Switch* yang kompleks.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menghitung kebutuhan energi PLTS untuk sistem inkubator; (2) merancang arsitektur sistem manajemen energi Hybrid PLTS-PLN; (3) menganalisis performa panel surya pada berbagai kondisi cuaca; (4) mengevaluasi stabilitas luaran *inverter* dan modul LM2596; serta (5) memverifikasi efektivitas mekanisme *manual switching* dalam menjaga kontinuitas operasional inkubator.

METODE PENELITIAN

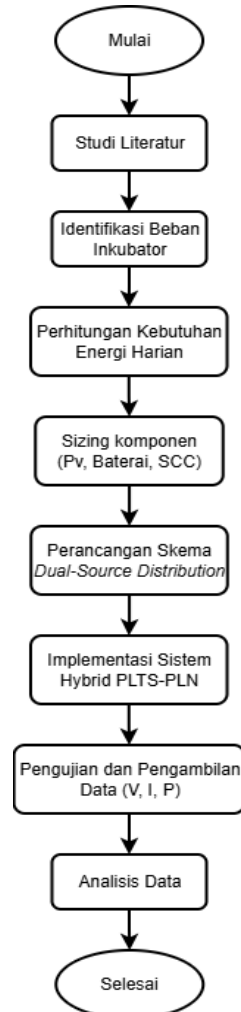
Penelitian ini menggunakan metode eksperimental terapan dengan pendekatan kuantitatif untuk merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem catu daya hibrida berbasis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan jaringan PLN pada inkubator telur ayam. Penelitian dilaksanakan pada bulan Desember 2025 hingga Januari 2026 di Jalan Macan Kumbang, Kelurahan Demang Lebar Daun, Kecamatan Ilir Barat I, Kota Palembang, Sumatera Selatan.

Tahapan penelitian dimulai dengan studi literatur mengenai sistem PLTS, penyimpanan energi baterai, inverter, solar charge controller (SCC), serta kebutuhan daya inkubator telur. Selanjutnya dilakukan perancangan sistem catu daya hibrida yang terdiri atas panel surya 100 Wp, baterai lead-acid 12 V 120 Ah, SCC PWM 50 A, inverter 12 VDC–220 VAC 200 W, modul step-down LM2596, dan Change Over Switch sebagai mekanisme perpindahan sumber daya antara PLTS dan PLN.

Setelah sistem dirakit, dilakukan pengujian eksperimental selama enam hari untuk memperoleh data performa sistem. Parameter yang diukur meliputi tegangan dan arus panel surya, daya keluaran panel, energi harian yang dihasilkan, tegangan baterai, tegangan keluaran inverter AC, tegangan keluaran LM2596, serta kontinuitas operasi beban inkubator saat perpindahan sumber daya.

Pengukuran dilakukan secara langsung menggunakan multimeter digital, power meter, dan pencatatan waktu operasi sistem. Data hasil pengukuran kemudian dianalisis secara kuantitatif dengan menghitung daya, energi harian, kestabilan tegangan, serta keberhasilan mekanisme perpindahan sumber

daya. Alur tahapan penelitian mulai dari studi literatur, perancangan sistem, implementasi, pengujian, hingga analisis data ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alur Prosedur Penelitian

Prosedur Penelitian

Penelitian dimulai dengan studi literatur untuk mengkaji teori pendukung mengenai sistem hybrid PLTS–PLN, karakteristik komponen PLTS, serta metode sizing panel surya untuk aplikasi skala kecil. Berdasarkan studi tersebut, penelitian dilanjutkan dengan mengidentifikasi seluruh beban yang beroperasi pada inkubator, meliputi empat buah lampu pijar 5 W sebagai pemanas, *fan* sirkulasi 5 VDC, motor *synchronous* sebagai pembalik telur, serta komponen kontrol berupa Arduino Mega 2560, ESP32, sensor DHT22, sensor PIR, LCD, dan *buzzer*. Data beban tersebut kemudian digunakan untuk menghitung total kebutuhan energi harian sebagai dasar penentuan kapasitas panel surya, baterai, dan *Solar Charge Controller* (SCC) melalui metode *sizing* dengan mempertimbangkan tegangan sistem 12 V. Nilai *Peak Sun Hours* (PSH) yang digunakan sebesar 5 jam per hari mengacu pada penelitian sebelumnya oleh Fiyaa Suduri et al. [11] yang menerapkan PSH 5 jam untuk perancangan sistem PLTS pada aplikasi inkubator telur di wilayah Indonesia. Nilai ini juga sejalan dengan hasil pengukuran PSH pada sistem PV yang beroperasi di wilayah tropis Indonesia oleh Megantoro et al. [12], yang menunjukkan bahwa lokasi Indonesia sebagai negara ekuatorial memiliki potensi radiasi matahari yang tinggi sepanjang tahun. Metode sizing ini mengikuti pendekatan berbasis profil kebutuhan energi harian yang telah divalidasi pada sistem PV standalone untuk aplikasi produktif skala kecil [13].

Tahap berikutnya adalah implementasi sistem yang mengintegrasikan tiga modul panel surya yang dirangkai paralel hingga total 100 Wp, baterai *Lead-Acid* 12 V 120 Ah, SCC tipe PWM 50 A, *inverter* 12 VDC ke 220 VAC 200 W, dan modul *step-down* LM2596 untuk konversi 12 VDC ke 5 VDC. Pemilihan modul LM2596 sebagai regulator DC-DC didasarkan pada karakteristiknya yang mampu memberikan efisiensi konversi tinggi dan tegangan luaran stabil untuk menyuplai mikrokontroler serta sensor [14]. Sistem kemudian didistribusikan ke dua jalur berbeda mengikuti skema *dual-source distribution*, di mana jalur 220 VAC menyuplai beban AC berupa lampu pijar dan motor *synchronous*, sementara jalur 5 VDC menyuplai beban DC berupa mikrokontroler dan sensor. Jaringan PLN dihubungkan ke beban AC melalui *Change Over Switch* (COS) yang dioperasikan secara manual sebagai sumber cadangan. Mekanisme switching secara manual dipilih karena lebih ekonomis dan mudah dioperasikan tanpa memerlukan sistem kendali elektronik tambahan [15].

Perpindahan sumber energi dilakukan secara manual berbasis manajemen waktu. Pada pukul 07.00 WIB operator memindahkan COS ke posisi PLTS sehingga seluruh beban disuplai dari baterai yang secara bersamaan diisi ulang oleh panel surya melalui SCC. Pada pukul 18.00 WIB COS dipindahkan ke posisi PLN sehingga beban 220 VAC disuplai langsung dari jaringan *grid*, sedangkan beban 5 VDC tetap memperoleh daya dari baterai melalui LM2596. Skema ini dirancang agar baterai dapat beristirahat pada malam hari untuk menghindari *deep discharge* dan memperpanjang umur pakai [9].

Pengujian dilaksanakan selama enam hari pada bulan Desember 2025 hingga Januari 2026 di wilayah Palembang, Sumatera Selatan (koordinat kurang lebih 2,98° LS; 104,75° BT). Ketiga modul panel surya dipasang di atas atap bangunan mengikuti kemiringan atap dengan sudut sekitar 10°–20° dari bidang horizontal, pada area bebas halangan bayangan, yang masih berada dalam kisaran sudut yang direkomendasikan untuk instalasi PLTS pada atap miring di wilayah ekuatorial [16], [17]. Selama pengujian, kondisi cuaca bervariasi mencakup cerah, berawan, mendung, hingga hujan yang merepresentasikan variasi musim penghujan di wilayah tropis Indonesia sehingga performa sistem dapat dievaluasi pada berbagai kondisi radiasi matahari yang realistis [18].

Pengukuran parameter listrik dilakukan menggunakan multimeter digital laboratorium Lucas-Nülle Multi 13S (LM2330), yang merupakan alat ukur presisi kelas *3¼-digit* dengan resolusi ± 3.100 digit dan klasifikasi keamanan CAT II – 1000 V sesuai standar IEC 61010-1. Instrumen ini terkalibrasi berdasarkan standar DIN 43751 dengan sertifikat pengujian yang diterbitkan oleh pabrikan untuk setiap unit, sehingga tingkat akurasi terjaga sesuai standar internasional untuk aplikasi laboratorium teknik. Rentang pengukuran yang tersedia meliputi tegangan DC 30 mV–1000 V, tegangan AC 3 V–1000 V, arus DC 3 mA–16 A, arus AC 30 mA–10 A, dan resistansi 30 Ω –30 M Ω , yang seluruhnya mencakup rentang parameter listrik yang diukur pada sistem PLTS berskala rendah dalam penelitian ini.

Pengambilan data dilakukan setiap satu jam sekali pada rentang waktu 07.00–18.00 WIB, meliputi pengukuran tegangan *open circuit* panel surya pada kondisi tanpa beban, pengukuran tegangan, arus, dan daya luaran panel surya pada kondisi berbeban, pengukuran tegangan luaran SCC untuk validasi regulasi pengisian baterai, pengukuran tegangan luaran inverter (VAC) dan modul LM2596 (VDC), serta pencatatan status operasional seluruh sembilan komponen inkubator saat transisi antara mode PLTS dan mode PLN. Seluruh hasil pengukuran dicatat pada lembar data pengujian dan diverifikasi ulang untuk meminimalkan kesalahan pembacaan, kemudian dianalisis secara kuantitatif untuk menentukan nilai rata-rata, deviasi, dan stabilitas luaran setiap komponen sistem.

Identifikasi Beban dan Kebutuhan Energi

Beban sistem inkubator penetas telur terdiri dari komponen pemanas, sirkulasi udara, motor pemutar rak, dan sistem kontrol. Spesifikasi beban yang digunakan dalam perancangan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Beban Inkubator

Nama Komponen	Jumlah	Durasi (h)	Daya (W)	Total (W)
Lampu Pijar	4	11	5	20
Fan 5 VDC	1	11	0,5	0,5
Motor <i>Synchronous</i>	1	60 s	4	0,066
			Total	20,566



Sistem Hybrid dirancang dengan skenario prioritas energi surya selama 11 jam (07.00-18.00 WIB) dan PLN sebagai cadangan di sisa waktu operasional. Total kebutuhan energi harian dihitung dengan persamaan 1.

$$E_{total} = \Sigma (P \times t) \quad (1)$$

Keterangan :

E_{total}	=	Total energi listrik yang digunakan (Wh)
Σ	=	Daya masing-masing komponen (Watt)
P	=	Lama waktu penggunaan (jam)
t	=	Penjumlahan seluruh energi dari setiap komponen

Berdasarkan data pada Tabel 1 kebutuhan energi untuk pemanas sebesar 220 Wh, sirkulasi udara 5,5 Wh, dan motor pemutar 0,066 Wh, sehingga total energi yang harus disuplai PLTS adalah 225,566 Wh per hari.

Perhitungan Kapasitas Baterai

Kapasitas baterai ditentukan dengan mempertimbangkan faktor keamanan sebesar 1,5 kali dari total kebutuhan energi harian dibagi tegangan sistem. Faktor ini mengakomodasi tiga aspek teknis, yaitu batasan *Depth of Discharge* (DoD) baterai Lead-Acid pada rentang 50–70% [9], penerapan *days of autonomy* 1–1,5 hari untuk sistem PLTS *standalone* dengan beban kritis [19], serta kompensasi rugi-rugi konversi pada inverter dan modul LM2596 [10]. Perhitungan kapasitas baterai dinyatakan pada persamaan 2 [11]:

$$C_{bat} = \frac{1,5 \times E_{total}}{V} \quad (2)$$

C_{bat}	=	kapasitas baterai (Ah)
E_{total}	=	Total energi listrik yang digunakan (Wh)
V	=	tegangan baterai (V)

Diperoleh :

$$C_{bat} = \frac{1,5 \times 225,566}{12} = 28,2 \text{ Ah}$$

Hasil perhitungan menunjukkan kapasitas minimal baterai sebesar 28,2 Ah. Pada implementasi sistem digunakan baterai Lead-Acid 12 V 120 Ah yang memberikan margin keamanan sangat besar, sekaligus memperpanjang umur pakai baterai dengan menjaga *State of Charge* (SoC) tetap berada pada rentang aman dan menghindari *deep discharge* berulang.

Perhitungan Kapasitas Panel Surya

Kapasitas panel surya ditentukan berdasarkan total kebutuhan energi harian dan *Peak Sun Hours* (PSH) [11] dengan mempertimbangkan dua faktor koreksi, yaitu faktor 1,20 sebagai pengganti rugi-rugi sistem dan faktor keamanan untuk PLTS berkapasitas di bawah 1000 W, serta faktor penyesuaian 1,1 untuk instalasi PLTS [20] dinyatakan pada persamaan 3.

$$C_{pv} = \frac{E_{total} \times 1,20 \times 1,1}{PSH} \quad (3)$$

C_{pv}	=	kapasitas panel surya (Wp)
E_{total}	=	Total energi listrik yang digunakan (Wh)
PSH	=	<i>Peak Sun Hours</i>

Diperoleh :

$$C_{pv} = \frac{225,566 \times 1,20 \times 1,1}{5} = 59,55 \text{ Wp}$$

Hasil perhitungan menunjukkan kapasitas minimal panel surya sebesar 59,55 Wp. Pada implementasi sistem digunakan tiga modul yang dirangkai parallel, sehingga total kapasitas mencapai 100 Wp. Penggunaan kapasitas yang lebih besar dari hasil perhitungan bertujuan untuk memberikan margin tambahan dalam mengatasi penurunan performa akibat variasi cuaca dan akumulasi debu pada permukaan panel [6].

Perhitungan Kapasitas Solar Charge Controller (SCC)

Kapasitas arus *Solar Charge Controller* (SCC) ditentukan berdasarkan arus hubung singkat (I_{sc}) dari panel surya. Nilai I_{sc} diperoleh dari spesifikasi 3 panel, yaitu sebesar 5,5 A. Dalam perancangan sistem fotovoltaik, digunakan faktor pengali 1,25 untuk mengantisipasi kondisi arus maksimum akibat variasi radiasi dan suhu [21] dinyatakan pada persamaan 4.

$$I_{SCC} = 1,25 \times I_{sc} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} I_{SCC} &= \text{Arus minimum SCC (A)} \\ I_{sc} &= \text{Arus hubung singkat panel surya (A)} \end{aligned}$$

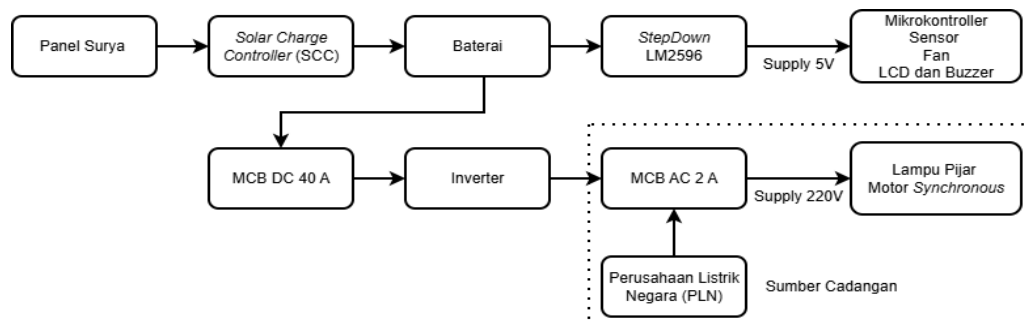
Diperoleh :

$$I_{SCC} = 1,25 \times 5,5 = 6,875 \text{ A}$$

Hasil perhitungan menunjukkan arus minimum *Solar Charge Controller* (SCC) sebesar 6,875 A. Pada implementasi sistem digunakan SCC dengan kapasitas 50 A. Pemilihan kapasitas yang jauh lebih besar dari hasil perhitungan bertujuan untuk memberikan margin keamanan dalam mengantisipasi lonjakan arus, penambahan kapasitas panel di masa mendatang, serta menjaga keandalan dan umur pakai sistem.

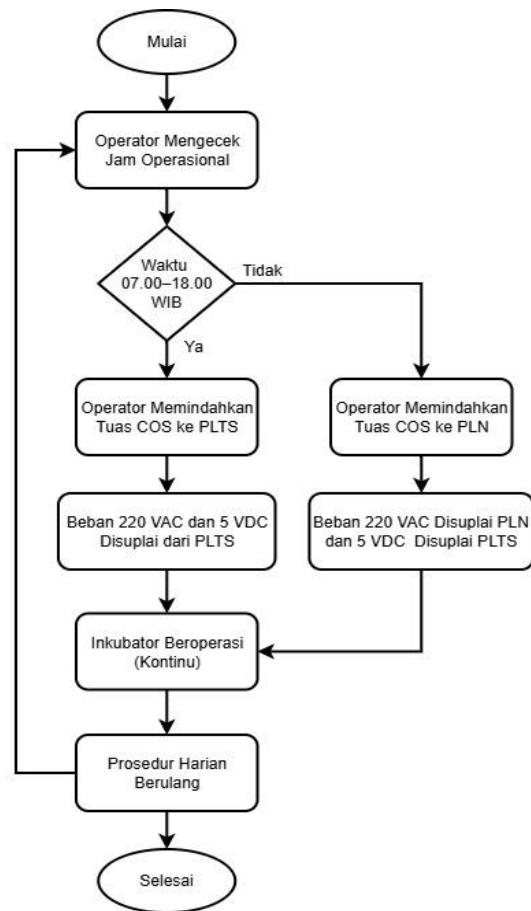
Diagram Blok dan Flowchart

Sistem yang dirancang merupakan sistem Hybrid yang mengintegrasikan sumber energi dari panel surya (PLTS) dan jaringan PLN. Energi dari panel surya disalurkan melalui *Solar Charge Controller* (SCC) untuk pengisian baterai, kemudian didistribusikan ke beban DC melalui modul *step-down* dan ke beban AC melalui *inverter*. Sistem dilengkapi sumber cadangan dari PLN untuk menjaga kontinuitas suplai energi.



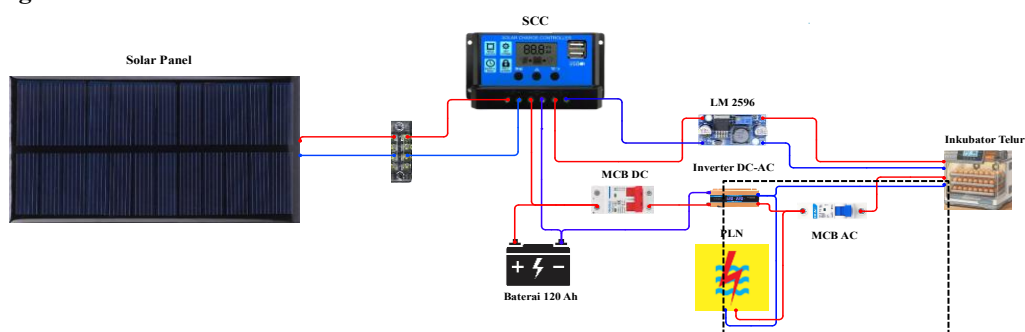
Gambar 2. Diagram Blok Sistem Hybrid

Diagram alir prosedur operasional manual sistem Hybrid PLTS–PLN ditunjukkan pada Gambar 3. Diagram ini menggambarkan tindakan operator dalam mengelola perpindahan sumber daya secara harian berbasis jadwal waktu operasional. Pada pukul 07.00 WIB, operator secara fisik memindahkan tuas *Change Over Switch* (COS) ke posisi PLTS, sehingga seluruh beban 220 VAC dan 5 VDC disuplai dari PLTS. Pada pukul 18.00 WIB, operator kembali memindahkan tuas COS ke posisi PLN, sehingga beban 220 VAC disuplai langsung dari jaringan PLN, sementara beban 5 VDC tetap memperoleh daya dari PLTS melalui modul LM2596 secara kontinu. Prosedur ini bersifat manual dan berulang setiap hari mengikuti jadwal operasional 11 jam per hari, tanpa memerlukan sistem kendali elektronik otomatis maupun perangkat *Automatic Transfer Switch* (ATS).

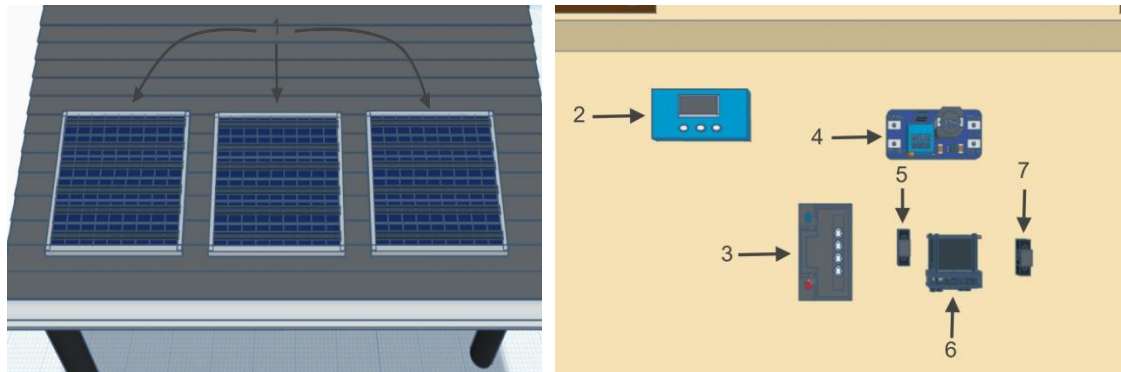


Gambar 3. Flowchart Prosedur Operasional Manual Sistem Hybrid

Wiring Elektrik dan Tata Letak Sistem



Gambar 4. Skema Rangkaian



Gambar 5. Tata Letak Sistem

Keterangan :

1. Panel Surya
2. *Solar Charge Controller* (SCC)
3. Baterai
4. *StepDown* LM2596
5. MCB DC
6. *Inverter*
7. MCB AC

HASIL DAN PEMBAHASAN

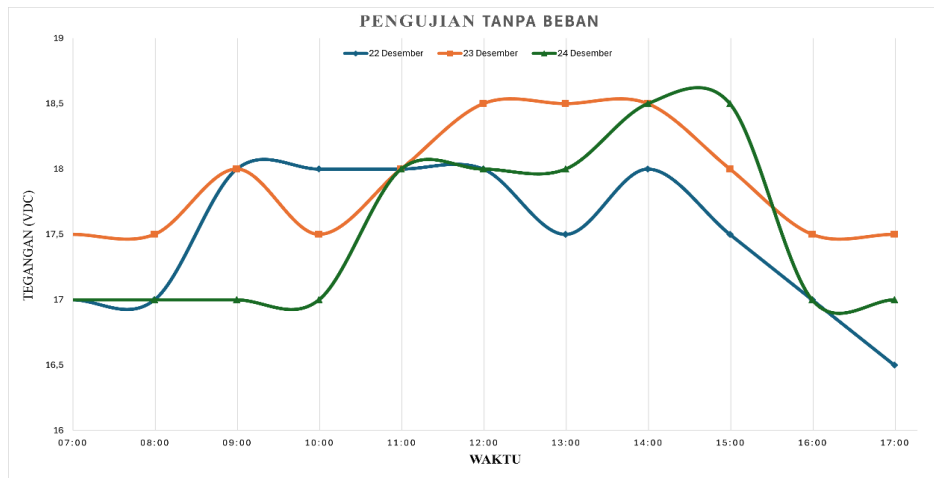
Pengujian Panel Surya Tanpa Beban

Pengujian tanpa beban dilakukan untuk mengidentifikasi nilai tegangan *open circuit* (Voc) panel surya sebagai indikator kesehatan modul dan potensi luaran maksimum sebelum panel dibebani. Pengujian dilaksanakan selama tiga hari berturut-turut pada tanggal 22–24 Desember 2025. Rekapitulasi hasil pengujian disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi Pengujian Panel Surya Tanpa Beban

Tanggal	Rata-rata Suhu (°C)	Rata-rata Voc (V)	Voc Puncak (V)
22 Desember 2025	29,27	17,5	18
23 Desember 2025	29,55	17,91	18,5
24 Desember 2025	28,09	17,64	18,5

Tabel 2 menunjukkan tegangan rata-rata harian konsisten pada rentang 17,50–17,91 V dengan Voc puncak mencapai 18,5 V. Nilai ini berada di bawah spesifikasi Voc standar panel monokristalin 12 V pada kondisi *Standard Test Condition* (STC) yang umumnya berkisar 21–22 V. Perbedaan tersebut merupakan hal yang lazim terjadi pada pengukuran lapangan karena Voc dipengaruhi secara logaritmik oleh iradiasi matahari dan mengalami penurunan seiring kenaikan suhu sel. Suhu ambien harian di lokasi pengujian yang berada pada rentang 28,09–29,55 °C, jauh di atas suhu STC 25 °C, menyebabkan Voc terukur menurun sesuai koefisien suhu tegangan panel monokristalin. Meskipun demikian, seluruh nilai Voc tetap berada jauh di atas ambang minimum pengisian baterai 12 V, yaitu 13,8 V, sehingga panel layak digunakan sebagai sumber energi pengisian baterai. Selisih tegangan sebesar 3,7–4,7 V di atas ambang tersebut memberikan margin operasional yang aman bagi *Solar Charge Controller* (SCC) untuk melakukan regulasi *charging*. Pola fluktuasi tegangan harian terhadap waktu disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Pengujian Tanpa Beban

Gambar 6 memperlihatkan tiga karakteristik penting kinerja panel surya. Pertama, tegangan meningkat dari sekitar 17 V pada pukul 07.00 WIB menuju puncak pada rentang 12.00–14.00 WIB, kemudian menurun kembali menjelang sore hari. Pola parabolik ini mengikuti distribusi radiasi matahari harian, di mana intensitas radiasi mencapai maksimum pada saat matahari berada mendekati zenith. Kenaikan Voc antara pagi dan siang hari relatif kecil karena Voc merupakan fungsi logaritmik terhadap arus foto, sehingga perubahan iradiasi yang signifikan hanya menghasilkan perubahan Voc yang moderat. Kedua, deviasi antara tegangan terendah dan tertinggi hanya berkisar 2 V atau sekitar 11% dari nilai rata-rata, yang mengindikasikan kestabilan luaran yang tinggi meskipun terdapat variasi cuaca antar hari. Kestabilan ini penting untuk sistem inkubator karena fluktuasi tegangan pengisian yang berlebihan dapat mempengaruhi kinerja algoritma *charging* pada SCC. Ketiga, panel tetap menghasilkan tegangan 17,0–17,5 V pada pukul 07.00–08.00 WIB dalam kondisi cuaca berkabut atau berawan tipis. Hal ini menunjukkan kemampuan panel monokristalin dalam mengonversi radiasi difus yang terhambur oleh partikel atmosfer dan awan menjadi arus fotoelektrik, meskipun dengan intensitas yang lebih rendah dari radiasi langsung. Kemampuan tersebut merupakan implikasi penting bagi keandalan sistem PLTS di wilayah tropis Indonesia karena panel tetap dapat menyuplai daya minimum untuk pengisian baterai meskipun tidak berada dalam kondisi cerah sempurna. Hasil ini sejalan dengan temuan Megantoro et al. [12] yang menunjukkan bahwa sistem PV di wilayah tropis Indonesia mampu mempertahankan luaran yang relatif stabil sepanjang periode operasional siang hari.

Pengujian Panel Surya dengan Beban

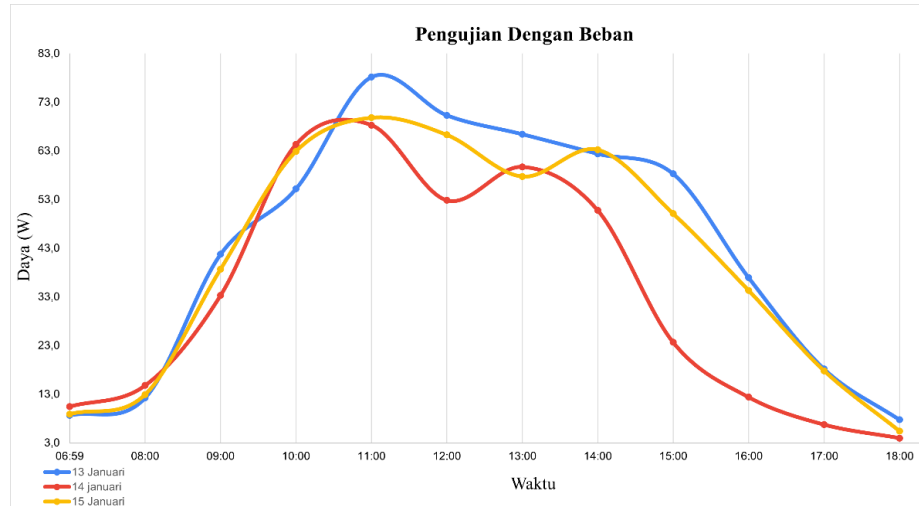
Pengujian dengan beban dilakukan ketika seluruh sistem inkubasi diaktifkan untuk mengevaluasi performa panel surya pada kondisi operasional nyata. Parameter yang diukur meliputi tegangan, arus, dan daya luaran panel. Rekapitulasi hasil pengujian disajikan pada Tabel 3. Pada tabel ini menunjukkan produksi energi harian tertinggi pada 13 Januari 2026 sebesar 516,267 Wh dan terendah pada 14 Januari 2026 sebesar 401,279 Wh. Nilai tegangan terukur pada kondisi berbeban (16,56–17,76 V) mengalami penurunan sekitar 5–6% dibandingkan hasil pengujian tanpa beban (17,50–17,91 V).

Tabel 3. Rekapitulasi Pengujian Panel Surya dengan Beban

Tanggal	Rata-rata Tegangan (V)	Rata-rata Arus (A)	Rata-rata Daya (W)	Total Energi Harian (Wh)
13 Januari 2026	17,76	2,37	43,02	516,267
14 Januari 2026	16,56	1,93	33,44	401,279
15 Januari 2026	17,49	2,28	40,67	488,093

Penurunan ini merupakan konsekuensi dari titik kerja panel yang bergeser dari kondisi *open circuit* menuju titik operasi berbeban, di mana arus yang mengalir ke sistem menyebabkan jatuh tegangan pada

resistansi internal sel surya sesuai karakteristik kurva I–V panel fotovoltaik. Meskipun terjadi penurunan tegangan, ketiga nilai total energi harian tetap melampaui kebutuhan energi harian inkubator sebesar 225,566 Wh, dengan rasio produksi terhadap kebutuhan sekitar 1,8–2,3 kali. Rasio ini memberikan margin keamanan yang cukup besar dan mengkonfirmasi bahwa kapasitas panel surya 100 Wp yang diimplementasikan telah tepat sasaran, bahkan pada hari dengan produksi energi paling rendah. Pola perubahan daya luaran terhadap waktu disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7 Grafik Daya Panel Surya dengan Beban

Gambar 7 memperlihatkan kurva daya berbentuk parabolik dengan puncak pada rentang pukul 10.00–11.00 WIB, di mana daya tertinggi mencapai 78 W pada 13 Januari 2026. Puncak daya yang terjadi lebih awal dari kondisi radiasi maksimum di titik zenith (sekitar pukul 12.00 WIB) mengindikasikan pengaruh suhu operasional panel terhadap efisiensi konversi, di mana pada tengah hari kenaikan suhu sel menurunkan efisiensi konversi meskipun iradiasi tetap tinggi. Fenomena ini merupakan karakteristik intrinsik panel monokristalin, di mana kenaikan suhu sel di atas STC menurunkan daya luaran secara linear. Pada 14 Januari 2026, terjadi dua kali penurunan daya yang signifikan pertama pada pukul 12.00 WIB ketika daya turun dari 70 W ke 50 W, dan kedua mulai pukul 15.00 WIB ketika daya turun drastis dari 52 W hingga hanya 3 W pada pukul 18.00 WIB akibat kondisi hujan. Pola ini menunjukkan bahwa *photocurrent* (I_{ph}) sangat sensitif terhadap perubahan iradiasi matahari, sehingga tutupan awan tebal dan curah hujan dapat menurunkan luaran daya hingga di bawah 5% dari kapasitas nominal panel. Meskipun demikian, sistem tetap mampu memenuhi kebutuhan operasional inkubator pada hari tersebut, karena baterai *Lead-Acid* 12 V 120 Ah berfungsi sebagai penyangga energi yang menutupi kekurangan produksi sesaat saat cuaca ekstrem. Hasil ini menegaskan pentingnya integrasi baterai penyimpanan dalam sistem PLTS *standalone* untuk aplikasi beban kritis seperti inkubator, Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian Peprah et al. [7] pada penelitian *solar-powered egg incubator*.

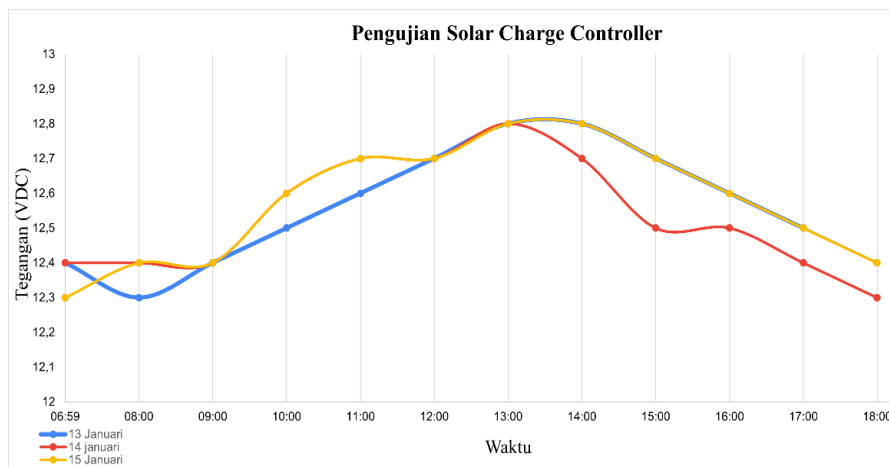
Pengujian Solar Charge Controller (SCC)

Pengujian SCC dilakukan untuk memvalidasi fungsi regulasi tegangan pengisian baterai. Hasil rekapitulasi disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi Pengujian Solar Charge Controller

Tanggal	Rata-rata V (V)	Rata-rata I (A)	Rata-rata P (W)
13 Januari 2026	12,56	1,167	14,63
14 Januari 2026	12,53	1,267	15,90
15 Januari 2026	12,58	1,04	14,12

Tabel 4 menunjukkan tegangan luaran SCC stabil pada rentang 12,53–12,58 V dengan deviasi hanya 0,05 V selama tiga hari pengujian. Nilai tersebut berada dalam rentang aman pengisian baterai 12 V, yaitu di atas ambang minimum 13,8 V untuk memulai proses *charging* dan di bawah ambang *overcharge* 14,4 V. Kestabilan ini merupakan indikator bahwa fungsi regulasi tegangan SCC bekerja dengan baik meskipun luaran panel surya bervariasi cukup signifikan. Fenomena ini merupakan konsekuensi dari cara kerja SCC tipe PWM yang mengatur tegangan luaran dengan cara memodulasi lebar pulsa (*duty cycle*) berdasarkan tegangan baterai, sehingga tegangan pengisian selalu mengikuti tegangan baterai ditambah *voltage drop* pada rangkaian regulator. Nilai arus rata-rata harian yang bervariasi antara 1,04–1,267 A juga menunjukkan bahwa SCC merespon perubahan iradiasi matahari dengan menyesuaikan besar arus pengisian, bukan tegangan, sehingga baterai terlindungi dari fluktuasi luaran panel yang tidak terkendali. Pola fluktuasi tegangan SCC terhadap waktu disajikan pada Gambar 8.



Gambar 8 Grafik Tegangan Pengujian SCC

Gambar 8 memperlihatkan tegangan SCC bergerak pada rentang 12,2–12,8 V sepanjang periode operasional 07.00–18.00 WIB. Tegangan mencapai nilai tertinggi 12,8 V pada pukul 13.00 WIB dan menurun secara bertahap hingga 12,2 V pada pukul 18.00 WIB. Kurva tegangan yang meningkat pada siang hari mencerminkan proses *charging* aktif ketika panel surya menghasilkan energi maksimum, sedangkan penurunan tegangan pada sore hari menandakan berkurangnya arus pengisian seiring menurunnya iradiasi matahari, sementara baterai mulai menyuplai sebagian beban. Rentang fluktuasi sebesar 0,6 V tersebut jauh lebih rendah dibandingkan rentang tegangan panel surya yang mencapai 2 V pada Gambar 6, yang menunjukkan bahwa SCC berhasil meredam fluktuasi luaran panel dan menghasilkan tegangan pengisian yang lebih stabil bagi baterai. Kestabilan ini memiliki implikasi langsung terhadap umur pakai baterai *Lead-Acid*, karena tegangan pengisian yang terlalu tinggi dapat menyebabkan *gassing* dan penguapan elektrolit, sedangkan tegangan yang terlalu rendah menyebabkan *undercharging* yang mempercepat sulfasi pelat baterai [9]. Dengan demikian, penggunaan SCC tipe PWM 50 A pada sistem ini terbukti sesuai dengan kebutuhan, meskipun tipe MPPT berpotensi memberikan efisiensi konversi yang lebih tinggi pada kondisi tegangan panel yang jauh di atas tegangan baterai.

Pengujian Inverter dan LM2596

Pengujian dilakukan pada 16 Desember 2025 untuk memverifikasi stabilitas konversi daya pada inverter (DC 12 V ke AC 220 V) dan modul LM2596 (DC 12 V ke DC 5 V). Kedua modul merupakan komponen kritis dalam skema *dual-source distribution* karena masing-masing menyuplai beban pada jalur tegangan yang berbeda. Ringkasan hasil pengujian disajikan pada Tabel 5.

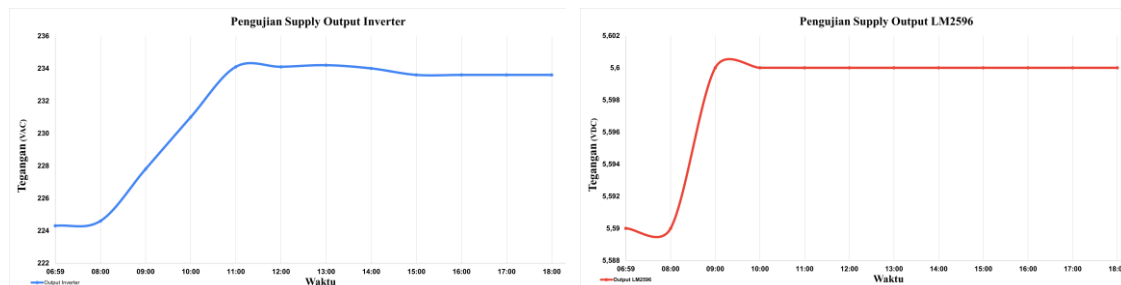
Tabel 5 menunjukkan inverter menghasilkan tegangan luaran pada rentang 224,3–234,2 VAC dengan fluktuasi 9,9 V, sedangkan LM2596 menghasilkan tegangan 5,59–5,60 VDC dengan fluktuasi 0,01 V. Nilai luaran inverter berada dalam toleransi standar PLN sebesar $\pm 10\%$ dari 220 VAC (198–242 VAC), sehingga tegangan yang disuplai ke beban 220 VAC seperti lampu pijar dan motor synchronous tetap berada pada rentang kerja normal. Fluktuasi sebesar 9,9 V atau sekitar 4,5% dari nilai nominal merupakan

konsekuensi dari cara kerja inverter *modified sine wave* yang tidak memiliki *closed-loop feedback* seketat inverter *pure sine wave*, sehingga tegangan luaran sedikit mengikuti variasi tegangan input dari baterai

Tabel 5. Rekapitulasi Luaran Inverter dan LM2596

Parameter	Inverter (VAC)	LM2596 (VDC)
Nilai Minimum	224,3	5,59
Nilai Maksimum	234,2	5,60
Fluktuasi	9,9	0,01

Sebaliknya, modul LM2596 menunjukkan presisi yang sangat tinggi dengan fluktuasi hanya 0,01 V atau sekitar 0,18% dari nilai nominal 5 V, yang merupakan konsekuensi dari topologi *buck converter* dengan regulasi umpan balik berbasis PWM yang menjaga tegangan luaran tetap konstan meskipun tegangan input bervariasi. Presisi ini penting untuk menyuplai mikrokontroler Arduino Mega 2560, ESP32, sensor DHT22, dan sensor PIR yang membutuhkan tegangan referensi stabil untuk menghasilkan pembacaan analog yang akurat. Pola perubahan tegangan luaran kedua modul terhadap waktu disajikan pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik Pengujian Supply Tegangan

Gambar 9 memperlihatkan kurva tegangan luaran inverter yang naik dari 224,3 VAC pada pukul 07.00 WIB menuju nilai maksimum 234,2 VAC pada pukul 11.00 WIB, kemudian stabil pada sekitar 233,5 VAC hingga pukul 18.00 WIB. Kenaikan tegangan luaran inverter pada pagi hari berkorelasi dengan kenaikan tegangan baterai seiring proses charging dari panel surya, yang meningkatkan tegangan input inverter dan berdampak pada tegangan luaran AC. Setelah pukul 11.00 WIB, ketika tegangan baterai mencapai kondisi mendekati penuh dan proses charging memasuki fase absorption, tegangan input inverter menjadi lebih stabil sehingga tegangan luarannya juga mencapai kondisi steady state. Pada modul LM2596, tegangan luaran naik dari 5,59 VDC pada pukul 07.00 WIB ke 5,60 VDC pada pukul 08.30 WIB, kemudian konstan hingga akhir periode pengujian. Waktu penstabilan yang singkat pada LM2596 mencerminkan respons dinamis regulator buck converter yang cepat mencapai steady state setelah beban diaktifkan. Perbedaan karakteristik antara kedua modul tersebut menegaskan bahwa skema dual-source distribution yang diterapkan pada penelitian ini tepat sasaran, di mana beban AC yang bersifat resistif dan lebih toleran terhadap fluktuasi tegangan disuplai melalui inverter, sedangkan beban DC sensitif seperti mikrokontroler dan sensor disuplai melalui LM2596 yang memberikan tegangan presisi tinggi. Karakteristik LM2596 tersebut juga dilaporkan Alsumady et al. [14] yang menyatakan bahwa modul LM2596 mampu memberikan efisiensi konversi tinggi dan tegangan luaran stabil untuk aplikasi kendali berbasis mikrokontroler.

Pengujian Manajemen Sistem Hybrid

Pengujian ini dilakukan untuk memverifikasi kontinuitas operasional seluruh komponen inkubator saat sistem mengalami transisi sumber daya antara mode PLTS dan mode PLN. Transisi dilakukan secara manual oleh operator melalui *Change Over Switch* (COS) sesuai jadwal operasional harian yang telah dirancang. Status setiap komponen pada kedua mode disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6 menunjukkan seluruh sembilan komponen inkubator tetap dalam kondisi aktif pada kedua mode operasional, baik saat menggunakan PLTS sebagai sumber utama maupun saat berpindah ke PLN sebagai sumber cadangan. Tidak ditemukan komponen yang mengalami *reset*, gangguan operasional, maupun penurunan fungsi selama proses transisi sumber daya berlangsung.

Tabel 6. Status Beban saat Transisi Sumber Daya

Jenis Beban	Mode PLTS	Mode PLN
Arduino Mega 2560	Aktif	Aktif
ESP32	Aktif	Aktif
DHT22	Aktif	Aktif
PIR	Aktif	Aktif
Lampu Pijar	Aktif	Aktif
<i>Fan</i>	Aktif	Aktif
Motor <i>Synchronous</i>	Aktif	Aktif
LCD	Aktif	Aktif
<i>Buzzer</i>	Aktif	Aktif

Keberhasilan ini merupakan konsekuensi langsung dari penerapan skema *dual-source distribution* yang memisahkan jalur suplai 220 VAC dan 5 VDC secara independen. Pada mode PLN, beban 220 VAC memperoleh suplai langsung dari jaringan grid sehingga tidak terjadi jeda waktu (*downtime*) yang biasanya menjadi penyebab utama *reset* pada komponen elektronik. Sementara itu, beban 5 VDC yang meliputi mikrokontroler dan sensor tetap memperoleh daya dari baterai PLTS melalui modul LM2596 secara kontinu pada kedua mode, sehingga sistem kontrol tidak pernah kehilangan catu daya. Konfigurasi ini secara efektif mengeliminasi risiko *cold boot* pada mikrokontroler yang dapat menyebabkan hilangnya data pemantauan atau reset parameter kontrol suhu dan kelembapan inkubator.

Keberhasilan mekanisme *manual switching* ini memiliki implikasi penting bagi aplikasi inkubator telur ayam, di mana kestabilan suhu pada rentang 37,5–37,8 °C harus dipertahankan selama 21 hari masa inkubasi tanpa interupsi [3]. Kondisi *reset* pada mikrokontroler, meskipun berlangsung hanya beberapa detik, dapat mengganggu siklus pembalikan telur oleh motor *synchronous* dan menyebabkan fluktuasi suhu yang berpotensi memicu peningkatan mortalitas embrio. Skema *dual-source distribution* yang diusulkan pada penelitian ini menjawab persoalan tersebut tanpa memerlukan perangkat *Automatic Transfer Switch* (ATS) yang kompleks dan berbiaya tinggi. Pendekatan berbasis COS manual berbiaya rendah ini juga sejalan dengan konsep sistem yang dikembangkan oleh Sadewa et al. [15], yang menunjukkan bahwa mode manual pada COS tetap dapat dioperasikan secara efektif untuk perpindahan sumber daya pada sistem dual power PLN dan panel surya. Dengan demikian, hasil pengujian ini memvalidasi bahwa kombinasi skema *dual-source distribution* dan mekanisme *manual switching* berbasis manajemen waktu terbukti mampu menjamin kontinuitas operasional inkubator sekaligus memberikan solusi teknis yang aplikatif dan ekonomis untuk peternak skala kecil.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menjawab tujuan yang telah ditetapkan, yaitu merancang sistem catu daya Hybrid PLTS–PLN yang mampu menjaga kontinuitas energi pada inkubator telur ayam melalui penerapan skema *dual-source distribution* dan mekanisme *manual switching* berbasis manajemen waktu. Kebutuhan energi harian sistem berhasil diidentifikasi sebagai dasar penentuan kapasitas komponen, arsitektur sistem manajemen energi berhasil dirancang dan diimplementasikan, performa panel surya terbukti mampu memenuhi kebutuhan operasional pada berbagai kondisi cuaca, stabilitas luaran inverter dan modul LM2596 terverifikasi sesuai standar operasional beban, serta mekanisme perpindahan sumber daya secara manual terbukti efektif menjaga seluruh komponen inkubator tetap aktif tanpa gangguan.

Hasil penelitian ini dapat diterapkan sebagai solusi teknis yang aplikatif dan ekonomis bagi peternak skala kecil, khususnya di wilayah yang rentan mengalami pemadaman listrik, karena tidak memerlukan perangkat *Automatic Transfer Switch* yang kompleks. Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan

penggantian *Solar Charge Controller* tipe PWM dengan tipe *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) guna meningkatkan efisiensi konversi energi, implementasi *Automatic Transfer Switch* untuk otomatisasi perpindahan sumber daya, serta integrasi sistem pemantauan berbasis *Internet of Things* agar parameter suhu, kelembapan, dan status catu daya dapat dipantau secara *real-time* dari jarak jauh.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Yusuf and D. I. Saputra, "Optimasi Kendali Suhu pada Sistem Nirkabel Penetasan Telur Berbasis PI dan PI Anti Windup," *Jurnal Otomasi, Kontrol & Instrumentasi*, vol. 12, no. 2, p. 2020, 2020, doi: 10.5614/joki.2020.12.2.3.
- [2] R. M. Noiva, A. C. Menezes, and M. C. Peleteiro, "Influence of temperature and humidity manipulation on chicken embryonic development," *BMC Vet. Res.*, vol. 10, no. 1, Oct. 2014, doi: 10.1186/s12917-014-0234-3.
- [3] K. Tona *et al.*, "Chicken Incubation Conditions: Role in Embryo Development, Physiology and Adaptation to the Post-Hatch Environment," May 23, 2022, *Frontiers Media S.A.* doi: 10.3389/fphys.2022.895854.
- [4] M. C. A. Prabowo, I. Sayekti, S. Astuti, S. T. Nursaputro, and S. Supriyati, "Development of an IoT-Based Egg Incubator with PID Control System and Web Application," *JOIV: International Journal on Informatics Visualization*, vol. 8, no. 1, p. 465, Mar. 2024, doi: 10.62527/joiv.8.1.2044.
- [5] K. Karsid, "Sistem Kontrol Suhu dan Kelembaban Udara pada Alat Penetas Telur Menggunakan Arduino Uno," *Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro*, vol. 14, no. 01, pp. 25–32, Apr. 2024, doi: 10.47709/elektriese.v14i01.3734.
- [6] A. Almufarrej and T. Erfani, "Modelling the regional effect of transmittance loss on photovoltaic systems due to dust," *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 379–386, Sep. 2023, doi: 10.1007/s40095-022-00510-8.
- [7] F. Peprah, S. Gyamfi, M. Amo-Boateng, E. Buadi, and M. Obeng, "Design and construction of smart solar powered egg incubator based on GSM/IoT," *Sci. Afr.*, vol. 17, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.sciaf.2022.e01326.
- [8] S. Nabila, Z. Abidin, and I. Arsyad, "Study Of Hybrid System Between Pltd And Plts On Lemukutan Island, Bengkayang Regency," *Journal of Electrical Engineering, Energy, and Information Technology (J3EIT)*, vol. 12, no. 1, p. 331, Apr. 2024, doi: 10.26418/j3eit.v12i1.68966.
- [9] I.P.G.I. Dwipayana, I.N.S. Kumara, and I.N. Setiawan, "Status of Battery in Indonesia to Support Application of Solar PV with Energy Storage," *Journal of Electrical, Electronics and Informatics*, vol. 5, doi: 10.24843/JEEI.2021.v05.i01.p06.
- [10] A. Khiareddine, C. Ben Salah, and M. F. Mimouni, "Power management of a photovoltaic/battery pumping system in agricultural experiment station," *Solar Energy*, vol. 112, pp. 319–338, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.solener.2014.11.020.
- [11] A. U. Fiyaa Suduri, S. Isnur Haryudo, Joko, and M. Widyartono, "RANCANG BANGUN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA KAPASITAS 80 WP UNTUK ALAT PENETAS TELUR BERBASIS INTERNET OF THINGS," *Jurnal Teknik Elektro UNESA*, vol. 10, pp. 587–596, 2021, doi: 10.26740/jte.v10n3.p587-596.
- [12] P. Megantoro, M. A. Syahbani, I. H. Sukmawan, S. D. Perkasa, and P. Vigneshwaran, "Effect of peak sun hour on energy productivity of solar photovoltaic power system," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 11, no. 5, pp. 2442–2449, Oct. 2022, doi: 10.11591/eei.v11i5.3962.
- [13] P. Viveros, F. Wulff, F. Kristjanpoller, C. Nikulin, and T. Grubessich, "Sizing of a Standalone PV System with Battery Storage for a Dairy: A Case Study from Chile," *Complexity*, vol. 2020, pp. 1–17, Dec. 2020, doi: 10.1155/2020/5792782.
- [14] M. O. Alsumady, Y. K. Alturk, A. Dagamseh, and M. Tantawi, "Controlling of DC-DC Buck Converters Using Microcontrollers," *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, vol. 15, pp. 197–202, Mar. 2021, doi: 10.46300/9106.2021.15.22.



- [15] E. Sadewa, Y. Nurul Hilal, and Derman, “Analisa AC Power Automatic Switch Module dengan Metode Dual Power PLN dan Panel Surya,” *Jurnal Teknologi Elektro*, vol. 15, no. 02, pp. 102–108, 2024, doi: 10.22441/jte.2024.v15i2.004.
- [16] A. D. Wibisono and E. A. Setiawan, “New Approach to Determine Mathematical Equation for Optimum Tilt Angle Of Solar Panel in Indonesia and Its Techno Economy Impact,” *International Journal of Technology*, vol. 6, no. 2, p. 180, Apr. 2015, doi: 10.14716/ijtech.v6i2.988.
- [17] N. Mukisa and R. Zamora, “Optimal tilt angle for solar photovoltaic modules on pitched rooftops: A case of low latitude equatorial region,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 50, p. 101821, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2021.101821.
- [18] M. V Nugroho, F. Mardiansah, T. O. Pratama, Z. A. Fikriyadi, D. V Dianti, and A. Prastawa, “A Comparative Study of the Effect of Weather Conditions on Solar Irradiance Forecasting Using Various Methods in Yogyakarta, Indonesia,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2828, no. 1, p. 012028, Oct. 2024, doi: 10.1088/1742-6596/2828/1/012028.
- [19] M. Andam, J. El Alami, Y. Louartassi, and R. Zine, “Days of autonomy for optimal Battery Sizing in Stand-alone Photovoltaic Systems,” *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI)*, vol. 11, no. 1, pp. 300–317, Mar. 2023, doi: 10.52549/ijeei.v11i1.4417.
- [20] M. B. Djaufani, N. Hariyanto, and S. Saodah, “Perancangan dan Realisasi Kebutuhan Kapasitas Baterai untuk Beban Pompa Air 125 Watt Menggunakan Pembangkit Listrik Tenaga Surya,” *Jurnal Reka Elkomika ©Teknik Elektro | Itenas* |, vol. 3, no. 2, pp. 75–86, 2015.
- [21] National Electrical Code, “Study Guide For Photovoltaic System Installers And Sample Examination Questions,” 2005.