

Kuantifikasi Komplementaritas Operasional dan Kecukupan Suplai Sistem Hibrida Fotovoltaik-Pikohidro Off-Grid

Feby Ardianto^{1*}, Bengawan Alfaresi², Zulkifli Saleh³, Fadilah⁴, Asri Indah Lestari⁵, Dimas Nuril Huda⁶, Muhammad Fikri⁷, Eko Ariyanto⁸

^{1,2,3,4,5,6}*Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palembang, Indonesia*

^{7,8}*Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palembang, Indonesia*

feby_ardianto@um-palembang.ac.id^{1*}, bengawan_alfarezi@um-palembang.ac.id², zulkiflisaleh64@gmail.com³, fadilah@um-palembang.ac.id⁴, asri_indahlestari@um-palembang.ac.id⁵, dimasnuril215@gmail.com⁶, muhammadfikrihrs@gmail.com⁷, eko_ariyanto@um-palembang.ac.id⁸

Received 08 Agustus 2026 | Revised 19 September 2026 | Accepted 27 September 2026

ABSTRAK

Sistem pembangkit terbarukan off-grid memerlukan suplai yang tidak hanya cukup secara energi, tetapi juga stabil terhadap variabilitas sumber. Penelitian ini mengkuantifikasi komplementaritas operasional jangka pendek antara fotovoltaik (PV) dan pikohidro serta mengevaluasi kecukupan suplai terhadap beban menggunakan data eksperimen per jam. Sistem terdiri atas dua modul PV masing-masing 50 Wp dan generator DC pikohidro berkapasitas nominal 200 W dengan head 4,53 m. Pengukuran dilakukan pada 10–12 Juli 2025 pukul 09.00–15.00 (n=21), meliputi iradiasi, daya dan efisiensi PV, debit air, daya turbin, daya dan efisiensi generator, serta daya beban. Temperatur modul PV tidak dianalisis karena tidak diukur selama eksperimen. Analisis meliputi statistik deskriptif, uji Shapiro-Wilk, korelasi Pearson/Spearman, regresi linear, Friedman, Wilcoxon berpasangan, koefisien variasi (CV), integrasi energi trapezoidal, dan load-supply adequacy ratio (LSAR). Hasil menunjukkan iradiasi berhubungan sangat kuat dengan daya PV ($r=0,998$; $R^2=0,996$; $p<0,001$), sedangkan debit air berhubungan kuat dengan daya generator ($r=0,927$; $R^2=0,858$; $p<0,001$). Hibridisasi menurunkan CV daya PV sebesar 33,54–53,12% dan penurunannya signifikan ($p=0,0024$; rank-biserial=0,680). Energi hibrida mencapai 511,12; 445,42; dan 436,84 Wh dengan LSAR 1,41; 1,22; dan 1,21. Meskipun energi siang hari surplus, empat dari 21 titik menunjukkan daya pembangkitan di bawah beban sehingga penyimpanan tetap diperlukan. Hasil menunjukkan pikohidro berfungsi sebagai penyangga operasional yang meredam fluktuasi PV dan meningkatkan kecukupan suplai. Temuan terbatas pada pengujian siang hari dan belum merepresentasikan operasi 24 jam karena kontribusi baterai tidak dianalisis secara terpisah.

Kata kunci: Fotovoltaik, Kecukupan Suplai, Komplementaritas Energi, Pikohidro, Sistem Hibrida

Off-grid renewable generation systems require a supply that is not only energy-sufficient, but also stable to source variability. This study quantified the short-term operational complementarity between photovoltaic (PV) and picohydro and evaluated the adequacy of supply to load using hourly experimental data. The system consists of two PV modules of 50 Wp each and a picohydro DC generator with a nominal capacity of 200 W with a head of 4.53 m. Measurements were taken on 10–12 July 2025 at 09.00–15.00 (n=21), including irradiation, PV power and efficiency, water discharge, turbine power, generator power and efficiency, and load power. The temperature of the PV module was not analyzed because it was not measured during the experiment. Analyses included descriptive statistics, Shapiro-Wilk test, Pearson/Spearman correlation, linear regression, Friedman, Wilcoxon pairs, coefficient of variation (CV), trapezoidal energy integration, and load-supply adequacy ratio (LSAR). Results showed that irradiation was strongly related to PV power ($r=0.998$; $R^2=0.996$; $p<0.001$), while water discharge was strongly related to generator power ($r=0.927$; $R^2=0.858$; $p<0.001$). Hybridization lowered PV power CV by 33.54–53.12% and the decrease was significant ($p=0.0024$; rank-biserial=0.680). Hybrid energy reached 511.12; 445.42; and 436.84 Wh with an LSAR of 1.41; 1.22; and 1.21. Despite the surplus daytime energy, four of the 21 points showed generating power under load so storage remained necessary. The results showed picohydro served as an operational buffer that dampened PV fluctuations and improved supply adequacy. The findings were limited to daylight testing and did not yet represent 24-hour operation as the battery contribution was not analyzed separately.

Keywords: Energy Complementarity, Hybrid Power System, Load-Supply Adequacy, Photovoltaic, Pico-Hydro

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan elektrifikasi yang andal di lokasi terpencil mendorong pengembangan *hybrid renewable energy system* (HRES) karena satu sumber terbarukan sering tidak mampu mengikuti pola beban secara kontinu. HRES dapat meningkatkan pemanfaatan sumber lokal dan mengurangi ketergantungan terhadap sumber fosil, tetapi keberhasilannya ditentukan oleh kecocokan profil pembangkitan, penyimpanan, pengendalian, dan kebutuhan beban (Hassan et al., 2023; López-castrillón et al., 2021). Dalam konteks Indonesia, potensi energi terbarukan sangat besar, namun pemanfaatannya memerlukan konfigurasi yang sesuai dengan karakter geografis dan sumber daya setempat (Langer & Quist, 2021). Oleh karena itu, evaluasi kinerja HRES skala kecil tidak cukup hanya mempertimbangkan kapasitas terpasang, tetapi perlu mempertimbangkan karakteristik operasi aktual masing-masing sumber energi.

PV merupakan teknologi modular yang menarik untuk sistem off-grid, tetapi keluaran dayanya berubah mengikuti iradiasi, temperatur, dan kondisi operasi. Variasi tersebut menimbulkan mismatch terhadap beban dan meningkatkan kebutuhan penyimpanan atau sumber penyangga. Pada microgrid hibrida, strategi koordinasi sumber dan baterai diperlukan untuk menjaga keseimbangan daya (Elkazaz et al., 2020; Vector-decoupled & Mohammed, 2020). Pikohidro memiliki karakter berbeda karena dapat menghasilkan daya selama debit dan head tersedia. Kombinasi hidro-PV karena itu berpotensi memberi efek saling melengkapi pada skala harian maupun musima (Hassan et al., 2023; Zhang et al., 2022). Dalam penelitian eksperimental skala kecil, kondisi operasi kedua sumber perlu dianalisis berdasarkan data aktual, karena perbedaan karakteristik temporal antara PV yang bergantung pada radiasi matahari dan pikohidro yang dipengaruhi ketersediaan debit air dapat menentukan kemampuan sistem dalam meredam fluktuasi daya.

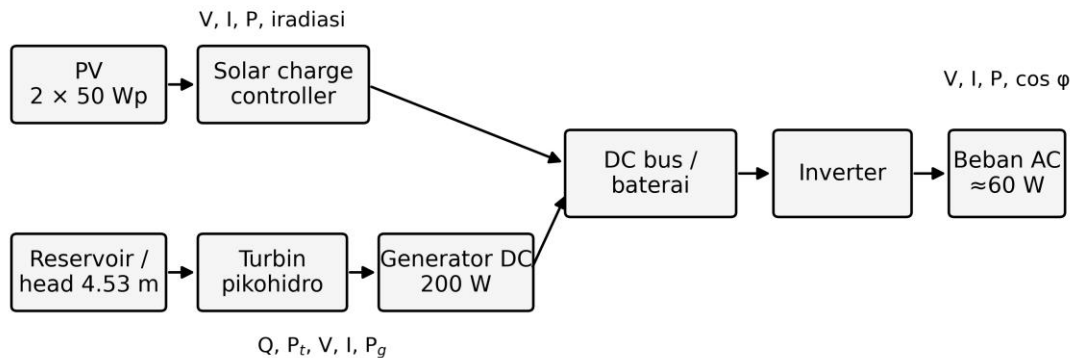
Literatur komplementaritas menekankan bahwa manfaat hibridisasi tidak cukup dibuktikan melalui penjumlahan kapasitas nominal. Komplementaritas perlu dinilai dari perubahan variabilitas, hubungan temporal antarsumber, kemampuan memenuhi beban, dan kebutuhan penyimpanan (Chowdhury et al., 2025; Guo et al., 2023; Weschenfelder et al., 2020). Pada sistem PV-hidro, studi optimasi menunjukkan manfaat koordinasi sumber untuk aplikasi *off-grid* (Donatus & Rene, 2023), sedangkan penelitian nasional telah menunjukkan kelayakan teknis konfigurasi surya-mikrohidro tetapi masih dominan membahas daya dan desain komponen (Yulanda et al., 2024). Dengan demikian, pengukuran berbasis data per jam diperlukan untuk menjelaskan bagaimana kombinasi kedua sumber bekerja secara operasional, bukan hanya berdasarkan kapasitas nominal atau efisiensi masing-masing komponen.

Kesenjangan penelitian ini adalah terbatasnya bukti eksperimental skala kecil yang mengkuantifikasi secara bersamaan: (i) sensitivitas keluaran terhadap sumber primer; (ii) peredaman variabilitas setelah hibridisasi; dan (iii) kecukupan suplai pada skala energi maupun titik waktu. Penelitian ini menganalisis ulang dataset eksperimen PV-pikohidro dengan statistik inferensial dan metrik sistem. Kontribusi utamanya adalah mengubah evaluasi berbasis efisiensi komponen menjadi evaluasi komplementaritas operasional dan load-supply adequacy yang dapat diaudit dari data per jam. Berbeda dari evaluasi yang hanya berfokus pada performa komponen individual, penelitian ini mengevaluasi interaksi kedua sumber melalui hubungan sumber primer–daya keluaran, perubahan variabilitas setelah integrasi, serta kemampuan sistem memenuhi kebutuhan beban selama periode pengamatan.

II. METODE PENELITIAN

A. Sistem Eksperimental dan Akuisisi Data

Eksperimen dilakukan pada sistem *off-grid* skala laboratorium di Universitas Muhammadiyah Palembang. Sumber PV menggunakan dua modul fotovoltaik tersusun paralel dengan kapasitas masing-masing 50 Wp (*rated voltage* 19,54 V; *rated current* 2,56 A). Data spesifikasi panel surya mengacu pada karakteristik modul yang digunakan pada sistem eksperimen, sedangkan konfigurasi hubungan antar modul mengikuti instalasi aktual yang digunakan selama pengujian. Sumber hidro menggunakan turbin dengan head 4,53 m yang digunakan sebagai parameter tinggi jatuh air pada sistem dan menggerakkan generator DC nominal 200 W, 48 V, 4,5 A dan 2500 rpm. Nilai 200 W, 48 V, 4,5 A, dan 2500 rpm merupakan karakteristik nominal generator, bukan seluruhnya hasil pengukuran selama operasi. Kedua sumber terhubung ke sisi DC melalui pengondisi daya/*charge controller*, baterai, dan inverter sebelum memasok beban AC. Baterai berfungsi sebagai penyangga sistem, tetapi state of charge dan efisiensi *round-trip* tidak direkam sehingga kontribusi penyimpanan tidak dihitung secara terpisah.



Gambar 1. Konfigurasi Sistem Eksperimen PV-Pikohidro Off-Grid dan Titik Pengukuran. Panah Menunjukkan Aliran Energi; Parameter Utama Yang Dicatat Adalah Iradiasi (G), Debit (Q), Tegangan-Arus-Daya Sumber, Dan Daya Beban

Pengukuran dilakukan pada 10, 11, dan 12 Juli 2025 setiap satu jam dari pukul 09.00 sampai 15.00, menghasilkan 21 observasi. Pada sisi PV dicatat iradiasi, tegangan, arus, daya dan efisiensi. Iradiasi berasal dari konversi illuminance; penggunaan faktor konversi lux-iradiasi merupakan pendekatan praktis tetapi memiliki ketidakpastian spektral sehingga hasilnya ditafsirkan sebagai estimasi lapangan (Michael et al., 2020). Temperatur modul PV tidak diukur selama eksperimen sehingga pengaruh temperatur tidak dianalisis secara terpisah dan tidak digunakan sebagai dasar penjelasan kuantitatif terhadap perubahan efisiensi PV. Pada sisi pikohidro, debit ditentukan secara volumetrik, kemudian dicatat daya turbin, tegangan, arus, daya dan efisiensi generator. Pengukuran debit dilakukan berdasarkan volume air yang terkumpul terhadap interval waktu pengukuran, bukan menggunakan *flow meter*. Daya beban AC dan faktor daya diukur pada titik keluaran inverter.

B. Pengolahan Energi dan Indikator Kinerja

Daya PV dan generator dihitung dari hasil pengukuran tegangan-arus, sedangkan efisiensi PV merupakan rasio daya listrik terhadap energi radiasi yang diterima luas modul. Daya turbin dihitung dari densitas air, gravitasi, debit, head 4,53 m dan parameter efisiensi turbin sebesar 60% yang digunakan sebagai parameter perhitungan daya mekanik turbin sesuai pendekatan yang digunakan dalam analisis. Efisiensi generator adalah rasio daya listrik generator terhadap daya mekanik turbin. Dengan demikian, nilai efisiensi turbin tidak digunakan untuk menggantikan pengukuran daya listrik generator, karena daya listrik generator tetap diperoleh dari hasil pengukuran tegangan dan arus keluaran generator. Pengaruh kondisi lingkungan terhadap efisiensi PV diperhatikan dalam interpretasi karena temperatur dan aliran udara dapat memodifikasi performa aktual modul (Pasra, 2021). Namun, karena temperatur modul tidak diukur, pengaruh termal hanya diperlakukan sebagai faktor potensial dan tidak diklaim sebagai penyebab perubahan efisiensi.

Energi tiap sumber dihitung dengan integrasi trapezoidal pada interval satu jam, dengan persamaan

$$E = \sum [(P_i + P_{i+1})/2] \Delta t \quad (1)$$

di mana P_i dan P_{i+1} merupakan daya pada dua titik waktu berurutan dan Δt adalah interval waktu pengukuran.

Energi hibrida:

$$E_H = E_P V + E_G \quad (2)$$

Load-supply adequacy ratio (LSAR) ditetapkan sebagai

$$E_H/E_L; LSAR > 1 \quad (3)$$

menunjukkan energi pembangkitan selama jendela observasi melebihi energi beban. Pada setiap hari pengujian terdapat tujuh titik pengukuran (09.00–15.00), yang digunakan untuk membentuk enam interval integrasi energi. Variabilitas dinilai dengan *coefficient of variation*, $CV = 100(s/mean)$. Persentase reduksi CV

setelah hibridisasi dihitung relatif terhadap CV PV. Selain keseimbangan energi, dihitung pula proporsi titik waktu ketika $P_H \geq P_L$ untuk mendeteksi defisit sesaat yang dapat tertutupi oleh baterai.

C. Analisis Statistik

Analisis menggunakan Python (SciPy dan statsmodels) dengan $\alpha=0,05$. Statistik deskriptif meliputi rerata, simpangan baku (SD), median, rentang dan CV. Distribusi variabel dan residual regresi diperiksa menggunakan *Shapiro-Wilk*. Hubungan iradiasi-daya PV dan debit-daya generator diuji dengan *Pearson* serta diverifikasi dengan *Spearman*; regresi *ordinary least squares* (OLS) digunakan untuk memperoleh slope, 95% *confidence interval* (CI), dan R^2 . Perbedaan antarhari dinilai dengan uji Friedman menggunakan waktu pengukuran sebagai blok, kemudian Wilcoxon berpasangan dengan koreksi Holm jika uji omnibus mendekati/signifikan. Efek *smoothing* diuji pada *absolute normalized deviation* $|P - \text{mean}(P)|/\text{mean}(P)$ antara PV dan hibrida dengan *Wilcoxon* satu arah, disertai *rank-biserial correlation* sebagai *effect size*. Analisis bersifat eksploratif karena hanya mencakup tiga hari pengujian.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

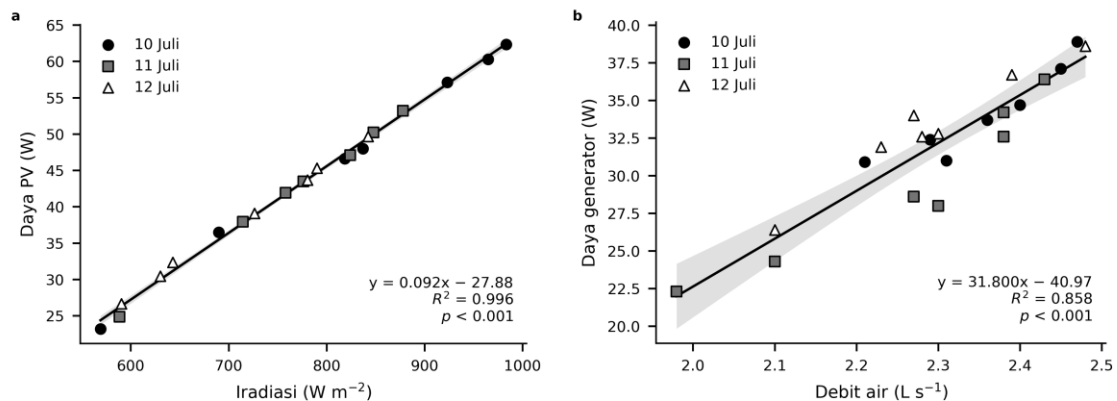
A. Statistik Deskriptif dan Respons PV

Tabel 1. Statistik Deskriptif Parameter Utama Selama 21 Observasi

Parameter	Rerata $\pm$ SD	Median	Min-maks	CV (%)
Iradiasi (W/m^2)	770,30 $\pm$ 120,99	780,33	569,22-983,43	15,71
Daya PV (W)	42,84 $\pm$ 11,13	43,67	23,18-62,31	25,98
Efisiensi PV (%)	8,04 $\pm$ 0,92	8,23	6,01-9,32	11,42
Debit air (L/s)	2,304 $\pm$ 0,129	2,30	1,98-2,48	5,60
Daya turbin (W)	61,37 $\pm$ 3,45	61,30	52,70-66,10	5,62
Daya generator (W)	32,29 $\pm$ 4,43	32,60	22,30-38,90	13,71
Efisiensi generator (%)	52,43 $\pm$ 4,74	53,60	42,40-59,10	9,04
Daya beban (W)	60,71 $\pm$ 2,86	60,23	57,09-66,74	4,71
Daya hibrida (W)	75,13 $\pm$ 11,96	77,50	54,08-99,41	15,92

Keterangan: $n = 21$ (7 waktu $\times$ 3 hari). $CV = 100 \times SD/\text{rerata}$. Daya hibrida adalah jumlah daya PV dan generator pada waktu yang sama. Nilai efisiensi mengikuti perhitungan eksperimen sumber. Efisiensi PV yang dilaporkan merupakan efisiensi operasional berdasarkan kondisi pengukuran lapangan dan tidak merepresentasikan efisiensi nominal modul pada kondisi standar pengujian (STC).

Daya PV mempunyai CV tertinggi (25,98%) di antara keluaran listrik yang diuji, sedangkan beban relatif konstan (CV 4,71%). Iradiasi dan daya PV menunjukkan pola yang hampir identik. Regresi menghasilkan slope 0,0918 W per W m^{-2} (95% CI 0,0892-0,0945), $R^2 = 0,996$ dan $r = 0,998$ ($p < 0,001$); residual tidak menunjukkan penyimpangan normalitas yang bermakna (Shapiro-Wilk $p = 0,227$). Spearman $\rho = 1,000$ menguatkan monotonisitas hubungan. Temuan konsisten dengan karakter PV yang kuat dipengaruhi radiasi, walaupun efisiensi aktual juga dapat dipengaruhi temperatur dan kondisi permukaan (Pasra, 2021). Perbedaan efisiensi operasional terhadap nilai nominal modul dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor kondisi lapangan, termasuk kondisi lingkungan dan karakteristik operasi sistem. Namun, karena temperatur modul tidak diukur dalam penelitian ini, kontribusi faktor termal tidak dapat dipisahkan secara kuantitatif.



Gambar 2. Hubungan Sumber Primer dan Daya Listrik: (a) Iradiasi Terhadap Daya PV dan (b) Debit Air Terhadap Daya Generator. Garis Hitam Adalah Regresi OLS dan Pita Abu-Abu Menunjukkan 95% CI. Bentuk Penanda Membedakan Hari Pengujian

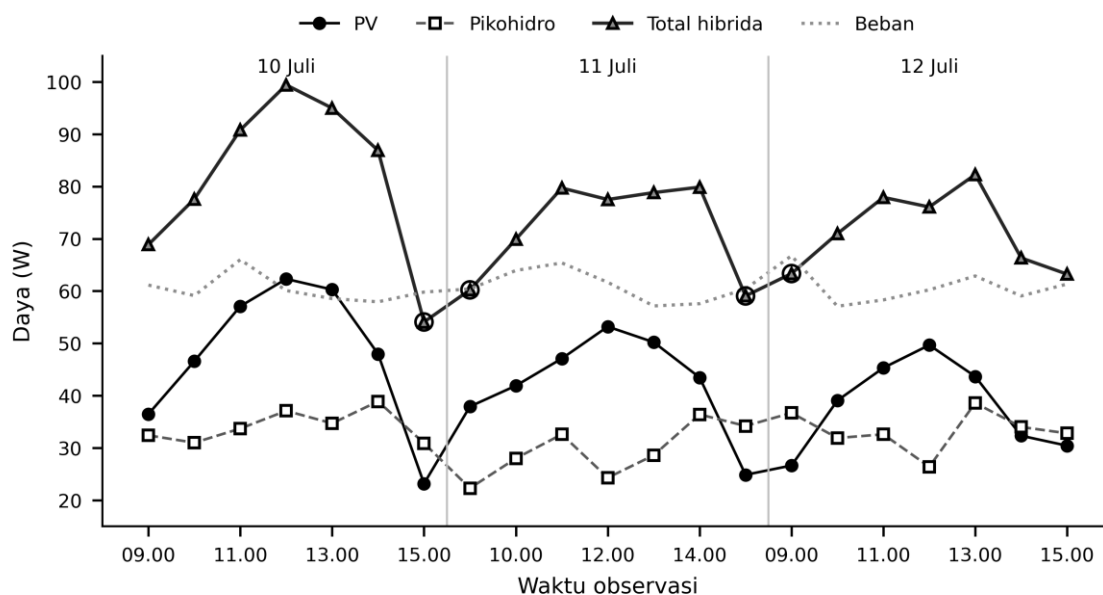
Uji Friedman mendeteksi perbedaan antahari pada iradiasi dan daya PV (keduanya $\chi^2 = 6,00$; $p = 0,0498$), namun perbandingan pasangan setelah koreksi Holm tidak mencapai $\alpha = 0,05$; perbedaan terbesar 10 vs 12 Juli memiliki p tersesuaian 0,0938. Dengan sampel tiga hari, hasil ini lebih tepat dibaca sebagai indikasi perubahan kondisi sumber daripada bukti perbedaan populasi musiman. Oleh karena itu, interpretasi perubahan harian dibatasi pada variasi kondisi pengujian dan tidak digunakan untuk menyimpulkan pola musiman.

B. Respons Pikohidro dan Generator

Debit air lebih stabil dibandingkan iradiasi (CV 5,60%) dan berkorelasi kuat dengan daya generator ($r = 0,927$; $p < 0,001$; Spearman $\rho = 0,888$; $p < 0,001$). Model OLS memberikan slope 31,80 W per $L s^{-1}$ (95% CI 25,60-38,00) dengan $R^2 = 0,858$; residual regresi memenuhi pemeriksaan normalitas ($p = 0,510$). Tidak ditemukan perbedaan antahari yang signifikan untuk debit (*Friedman* $p = 0,618$), daya generator ($p = 0,254$), maupun efisiensi generator ($p = 0,156$). Stabilitas relatif sumber air menjelaskan mengapa pikohidro dapat berfungsi sebagai sumber penyangga ketika daya PV berubah. Dalam konteks penelitian ini, fungsi penyangga tersebut didasarkan pada kestabilan relatif keluaran pikohidro selama periode pengujian, bukan pada klaim kemampuan menyediakan suplai kontinu di luar periode observasi. Studi PV-hidro off-grid juga menunjukkan bahwa koordinasi dua sumber memberi fleksibilitas yang tidak tersedia pada sumber tunggal (Donatus & Rene, 2023; Zhang et al., 2022).

Korelasi daya PV dengan daya generator secara keseluruhan hampir nol ($r = -0,004$; $p = 0,985$). Ketiadaan kovarians positif ini penting secara sistem: fluktuasi kedua sumber tidak cenderung meningkat dan menurun secara serempak. Temuan ini digunakan sebagai indikator komplementaritas temporal jangka pendek pada kondisi eksperimen, bukan sebagai representasi karakteristik sepanjang musim atau tahun penuh. Dalam literatur, komplementaritas dinilai menguntungkan ketika kombinasi sumber menurunkan variasi keluaran atau ketergantungan terhadap penyimpanan (Guo et al., 2023; Weschenfelder et al., 2020).

C. Komplementaritas, Smoothing, dan Kecukupan Suplai



Gambar 3. Profil Daya Per Jam Pada Tiga Hari Pengujian. Lingkaran Terbuka Pada Kurva Total Hibrida Menandai Titik Ketika Daya Pembangkitan Langsung Lebih Kecil Daripada Daya Beban; Titik Tersebut Memerlukan Kontribusi Baterai/Penyimpanan Untuk Menjaga Suplai

Tabel 2. Reduksi Variabilitas dan Kecukupan Suplai Energi Harian

Tanggal	CV PV (%)	CV Hibrida (%)	Reduksi CV (%)	E Hibrida (Wh)	E Beban (Wh)	LSAR	Kecukupan Sesaat
10 Juli	29,51	19,61	33,54	511,12	362,18	1,41	6/7 (85,7%)
11 Juli	22,00	12,76	42,00	445,42	366,12	1,22	5/7 (71,4%)
12 Juli	22,47	10,54	53,12	436,84	361,60	1,21	6/7 (85,7%)

Hibridisasi menurunkan CV daya dari 29,51 menjadi 19,61% pada 10 Juli, dari 22,00 menjadi 12,76% pada 11 Juli, dan dari 22,47 menjadi 10,54% pada 12 Juli. Dengan demikian, reduksi variabilitas relatif terhadap PV mencapai 33,54-53,12%. Pengujian terhadap deviasi absolut ternormalisasi menunjukkan median deviasi menurun dari 0,187 pada PV menjadi 0,107 pada hibrida; Wilcoxon $W = 194$ menghasilkan $p = 0,0024$ dengan rank-biserial=0,680. Hasil ini menunjukkan bahwa integrasi pikohidro memberikan efek peredaman fluktuasi daya selama periode pengujian, sehingga berperan sebagai sumber power smoothing pada skala eksperimen. Konsep serupa dilaporkan pada studi komplementaritas yang menempatkan pengaturan hidro sebagai sumber fleksibilitas terhadap pembangkit variabel (Chowdhury et al., 2025; Zhang et al., 2022).

Secara energi, sistem menghasilkan surplus pada seluruh hari observasi: 148,94 Wh (41,12%), 79,31 Wh (21,66%), dan 75,24 Wh (20,81%) untuk kebutuhan beban. Proporsi energi pikohidro meningkat dari 40,51% pada 10 Juli menjadi 45,38% pada 12 Juli ketika kontribusi PV melemah, menunjukkan kompensasi pada tingkat bauran energi. Walaupun demikian, Gambar 3 memperlihatkan empat defisit daya sesaat dari 21 titik: 10 Juli pukul 15.00 (-5,72 W), 11 Juli pukul 09.00 (-0,18 W) dan 15.00 (-1,35 W), serta 12 Juli pukul 09.00 (-3,40 W). Artinya, LSAR >1 tidak menjamin kecukupan pada setiap titik waktu. Dengan demikian, hasil kecukupan suplai harus dipahami sebagai evaluasi keseimbangan energi selama jendela pengamatan, bukan sebagai bukti kemampuan operasi mandiri selama 24 jam. Penyimpanan dan energy management sistem tetap penting untuk menutup mismatch jangka pendek (Abbas et al., 2025; Vector-decoupled & Mohammed, 2020).

Temuan ini juga memperjelas perbedaan antara efisiensi komponen dan kinerja sistem. Efisiensi generator rata-rata (52,43%) secara numerik jauh lebih besar daripada efisiensi PV (8,04%), tetapi keduanya tidak dapat dibandingkan sebagai ukuran yang identik karena batas energi masuk berbeda. Nilai efisiensi PV merupakan efisiensi operasional berdasarkan kondisi eksperimen, sedangkan efisiensi generator dihitung berdasarkan hubungan antara daya listrik keluaran dan estimasi daya mekanik turbin. Untuk desain off-grid, indikator yang lebih relevan adalah profil daya, energi terintegrasi, variabilitas, dan kecukupan terhadap beban. Efisiensi inverter dan jalur konversi tetap perlu diperhatikan karena rugi-rugi daya elektronik dapat mengurangi energi yang akhirnya diterima pengguna (Mashhadany, 2022).

D. Implikasi dan Keterbatasan

Hasil eksperimen mendukung penggunaan PV-pikohidro sebagai pendekatan hibridisasi pada kondisi lokasi pengujian yang memiliki sumber matahari dan debit air yang memadai, tetapi generalisasi harus dibatasi. Data hanya mencakup tiga hari dan pembebanan sekitar 60 W, belum tersedia profil 24 jam, musim hujan-kemarau, *state of charge* baterai, temperatur modul, efisiensi *charge-discharge*, maupun kehilangan kabel. Oleh karena itu, penelitian ini tidak menarik kesimpulan mengenai kinerja sistem sepanjang tahun atau kemampuan operasi mandiri secara kontinu. Selain itu, iradiasi diestimasi dari illuminance sehingga pengukuran lanjutan sebaiknya memakai pyranometer terkalibrasi (Michael et al., 2020). Karena baterai tidak dimonitor, penelitian ini tidak mengklaim autonomy 24 jam atau *loss-of-power-supply probability*. Penelitian berikutnya perlu merekam data minimal beberapa minggu lintas musim, SOC baterai dan arus bidirectional, lalu menghitung LPSP/LOLP, *self-sufficiency*, *curtailment*, dan optimasi *sizing*. Pendekatan tersebut akan menghubungkan komplementaritas sumber dengan reliabilitas dan ekonomi sistem secara lebih kuat.

IV. KESIMPULAN

Analisis komprehensif terhadap 21 observasi menunjukkan bahwa daya PV sangat bergantung pada iradiasi ($r = 0,998$; $R^2 = 0,996$), sedangkan daya generator pikohidro berhubungan kuat dengan debit ($r = 0,927$; $R^2 = 0,858$). Profil kedua sumber tidak berkorelasi secara keseluruhan ($r = -0,004$), sehingga penggabungannya menurunkan CV daya PV sebesar 33,54-53,12%. Penurunan deviasi relatif setelah hibridisasi signifikan (Wilcoxon $p = 0,0024$; *rank-biserial* = 0,680), yang menunjukkan adanya efek smoothing operasional selama periode pengujian. membuktikan efek smoothing operasional. Energi hibrida terintegrasi sebesar 511,12; 445,42; dan 436,84 Wh selalu lebih besar daripada energi beban dengan LSAR 1,41; 1,22; dan 1,21. Namun, 4 dari 21 titik waktu masih mengalami defisit daya langsung sehingga baterai tetap diperlukan sebagai penyangga. Dengan demikian, kontribusi utama penelitian ini adalah memberikan bukti kuantitatif berbasis eksperimen bahwa integrasi pikohidro dapat berperan sebagai sumber pendukung yang meredam variabilitas keluaran PV dan meningkatkan kecukupan suplai pada skala pengujian. Klaim dibatasi pada kondisi pengujian siang hari; hasil ini belum dapat digunakan untuk menyatakan keandalan operasi 24 jam tanpa validasi jangka panjang melalui monitoring penyimpanan energi dan kondisi operasi lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

Abbas, A. K., Ayop, R., Wei, C., Al, Y., Smadi, A., & Ems, O. (2025). *Results in Engineering Advanced Energy-Management And Sizing Techniques For Renewable Microgrids With Electric-Vehicle*

Integration : A review. 27(May).

- Chowdhury, P., Chowdhury, N., & Farrok, O. (2025). Energy Conversion and Management: X Complementarity in Renewable Energy Sources: Insights From Scientometric Analysis. *Energy Conversion and Management*: X, 26 (November 2024), 100930. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100930>
- Donatus, C., & Rene, E. (2023). Control and Optimization of a Hybrid Solar PV – Hydro Power System for Off-Grid Applications Using Particle Swarm Optimization (PSO) and Differential Evolution (DE). *Energy Reports*, 10(May), 4253–4270. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.10.080>
- Elkazaz, M., Sumner, M., & Thomas, D. (2020). Electrical Power and Energy Systems Energy Management System For Hybrid PV-Wind-Battery Microgrid Using Convex Programming , Model Predictive And Rolling Horizon Predictive Control With Experimental Validation. *Electrical Power and Energy Systems*, 115(July 2019), 105483. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105483>
- Guo, Y., Ming, B., Huang, Q., Yang, Z., Kong, Y., & Wang, X. (2023). Variation-Based Complementarity Assessment Between Wind and Solar Resources In China. *Energy Conversion and Management*, 278(January), 116726. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116726>
- Hassan, Q., Algburi, S., Zuhair, A., Salman, H. M., & Jaszczur, M. (2023). Results in Engineering Review Article A Review Of Hybrid Renewable Energy Systems: Solar And Wind-Powered Solutions: Challenges, Opportunities, and Policy Implications. *Results in Engineering*, 20(November), 101621. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101621>
- Langer, J., & Quist, J. (2021). *Review of Renewable Energy Potentials in Indonesia and Their Contribution to a 100 % Renewable Electricity System.*
- López-castrillón, W., Sepúlveda, H. H., & Mattar, C. (2021). *Off-Grid Hybrid Electrical Generation Systems in Remote Communities : Trends and Characteristics in Sustainability Solutions.*
- Mashhadany, A. K. A. R. A. A. S. T. C. W. T. Al. (2022). *Efficiency Evaluation of the Dual System Power Inverter for.*
- Michael, P. R., Johnston, D. E., & Moreno, W. (2020). *A Conversion Guide : Solar Irradiance And Lux Illuminance.* 153–166. <https://doi.org/10.21595/jme.2020.21667>
- Pasra, D. (2021). *Efisiensi Panel Surya Kapasitas 100 Wp.* 11(2), 71–80.
- Vector-decoupled, B. M., & Mohammed, O. (2020). *Hybrid Microgrid Energy Management and Control Based on Metaheuristic-Driven Vector-Decoupled Algorithm Considering Intermittent Renewable Sources and Electric Vehicles Charging Lot.*
- Weschenfelder, F., Novaes, G. De, Leite, P., Carlos, A., Castro, O. De, Moises, C., Antonio, A., Ochoa, V., & Maurício, A. (2020). A Review On The Complementarity Between Grid-Connected Solar And Wind Power Systems. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120617. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120617>
- Yulanda, E. A., Susilo, J. T., Tama, A., Prakoso, D. A., Yanuar, A., Yulanda, E. A., Susilo, J. T., Tama, A., Prakoso, D. A., Yanuar, A., Yulanda, E. A., Susilo, J. T., & Tama, A. (2024). *Perancangan Pembangkit Listrik Hybrid Dengan Tenaga Surya Dan Tenaga Mikrohidro.* 7(1), 89–97. <https://doi.org/10.32493/epic.v7i1.39647>
- Zhang, B., Qiu, R., Liao, Q., Liang, Y., Ji, H., & Jing, R. (2022). Design And Operation Optimization Of City-Level Off-Grid Hydro – Photovoltaic Complementary System. *Applied Energy*, 306(PB), 118000. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118000>