

Rancang Bangun Sistem PLTS Hybrid 10,44 kWp dan Baterai pada Rumah Tinggal Tiga Fasa

¹Moch. Nafis Fanani, ²Moh. Najmyzzaman *, ³Diding Suhardi, ⁴Khusnul Hidayat

^{1,2,3,4} Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Malang, Malang, Indonesia

¹nafisfanani28@gmail.com, ²jimmy21july@gmail.com, ³.dididing@umm.ac.id, ⁴khusnulhidayat@umm.ac.id

Abstract—The increasing electricity demand in residential buildings used for productive activities (home offices) requires solutions that improve energy efficiency while maintaining a reliable power supply. This study presents the design and implementation of a 10.44 kWp hybrid photovoltaic (PV) system integrated with a 10.24 kWh lithium iron phosphate (LiFePO₄, LFP) battery for a three-phase 13,200 VA residential building in Gubeng, Surabaya, Indonesia. The proposed system was developed following the Engineering Design Process (EDP), including site assessment, detailed engineering design, system installation, and commissioning. Eighteen 580 Wp PV modules were configured in a split-array arrangement to maximize the performance of the dual maximum power point tracking (MPPT) inverter, while the operational strategy prioritized self-consumption with a zero-export scheme. Field measurements conducted over one month showed that the system generated 809.7 kWh of electrical energy, achieving a realization-to-estimation conformity rate of 98.93%. The generated solar energy supplied 41.4% of the average daily electrical demand of 70.59 kWh. Furthermore, the inverter maintained stable phase voltages with a maximum voltage deviation of only 1.28% despite an extreme phase current unbalance of 65.17%. These results demonstrate that the proposed hybrid PV-battery system effectively reduces dependence on the utility grid while maintaining power quality under highly unbalanced residential loading conditions.

Keywords — Hybrid PV system; three-phase inverter; LiFePO₄ battery; dual MPPT; unbalanced load; energy yield

Abstrak—Penelitian ini menyajikan rancang bangun dan implementasi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) hibrida berkapasitas 10,44 kWp yang terintegrasi dengan baterai *Lithium Iron Phosphate* (LiFePO₄, LFP) berkapasitas 10,24 kWh pada rumah tinggal tiga fasa berdaya 13.200 VA di Gubeng, Surabaya. Pengembangan sistem mengacu pada *Engineering Design Process* (EDP) yang meliputi survei lokasi, perancangan teknik terperinci, instalasi sistem, dan pengujian *commissioning*. Sebanyak 18 modul surya berkapasitas 580 Wp dikonfigurasi dalam arsitektur *split-array* untuk mengoptimalkan kinerja inverter hibrida dengan teknologi *dual maximum power point tracking* (*dual MPPT*), sedangkan strategi operasinya diprioritaskan pada mode *self-consumption* dengan penerapan fitur *zero export*. Hasil pengujian lapangan selama satu bulan menunjukkan bahwa sistem menghasilkan energi listrik sebesar 809,7 kWh atau mencapai tingkat kesesuaian realisasi terhadap estimasi sebesar 98,93%. Energi listrik yang dihasilkan mampu menyuplai 41,4% dari rata-rata kebutuhan energi harian sebesar 70,59 kWh. Selain itu, inverter mampu mempertahankan kestabilan tegangan antar fasa dengan deviasi maksimum hanya sebesar 1,28% meskipun beroperasi pada kondisi ketidakseimbangan arus fasa yang mencapai 65,17%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem PLTS hibrida yang diusulkan mampu mengurangi ketergantungan terhadap jaringan PLN sekaligus mempertahankan kualitas daya pada kondisi pembebanan rumah tinggal yang tidak seimbang.

Kata Kunci—PLTS hibrida; inverter tiga fasa; baterai LiFePO₄; dual MPPT; ketidakseimbangan beban; hasil energi

I. PENDAHULUAN

Pergeseran fungsi hunian residensial menjadi ruang kerja produktif (*home office*) memicu lonjakan konsumsi energi dan menuntut tingkat keandalan pasokan daya yang jauh lebih ketat dibandingkan hunian konvensional. Berdasarkan hasil audit energi pada objek studi rumah tinggal dengan daya terpasang 13.200 VA (tiga fasa) di Surabaya, intensitas penggunaan beban kelistrikan yang tinggi secara terus-menerus memunculkan dua permasalahan mendasar. Pertama, pembengkakan biaya operasional energi listrik akibat konsumsi beban harian yang menembus angka rata-rata 70,59 kWh. Kedua, tingginya risiko gangguan pada aktivitas produktif karena perangkat sensitif seperti komputer *server* dan infrastruktur jaringan sangat rentan terhadap pemadaman listrik dari jaringan utilitas [1], [2]. Mengatasi permasalahan tersebut, integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dengan topologi hibrida dan

sistem penyimpanan baterai menjadi salah satu solusi untuk meningkatkan efisiensi energi dan keandalan pasokan daya. Sistem hibrida tidak hanya mengonversi radiasi matahari menjadi daya listrik untuk memangkas tagihan bulanan secara drastis, tetapi juga menyediakan fungsi cadangan (*backup power*) yang krusial untuk mengambil alih beban prioritas tanpa jeda saat terjadi *blackout* [3], [4]. Di sisi lain, implementasi sistem ini di Indonesia juga harus tunduk pada regulasi teknis interkoneksi jaringan terkini yang mewajibkan penerapan mekanisme penahan ekspor daya (*zero export*) untuk menjaga stabilitas tegangan pada jaringan utilitas [5].

Selama beberapa tahun terakhir, optimalisasi sistem energi terbarukan pada sektor residensial telah banyak dieksplorasi. Studi komprehensif terkait teknologi fotovoltaik menegaskan bahwa arsitektur pemasangan dan penyerapan iradiasi sangat menentukan kinerja *energy yield* suatu sistem [6]. Di sektor kendali, penerapan algoritma *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) terbukti mampu memaksimalkan ekstraksi daya panel surya secara dinamis dalam kondisi cuaca yang fluktuatif [7], [8]. Terkait manajemen daya pada kelistrikan tiga fasa, sejumlah literatur terkini telah memodelkan metode kompensasi tegangan pada inverter guna mempertahankan stabilitas operasi saat sistem melayani distribusi beban yang tidak seimbang (*unbalanced load*) [9], [10]. Selain itu, profil degradasi dan manajemen usia pakai baterai berbasis *Lithium Iron Phosphate* (LiFePO₄) juga menjadi fokus penting untuk keandalan sistem penyimpanan energi pada aplikasi terhubung jaringan [11].

Walaupun literatur terdahulu telah menyajikan landasan teoretis yang kuat mengenai optimasi MPPT maupun kestabilan inverter, implementasi nyata PLTS di area perkotaan kerap membentur kendala teknis yang belum terselesaikan secara holistik. Keterbatasan ruang dan perbedaan material atap seperti kombinasi seng spandek dan genteng keramik sering kali memicu penurunan performa operasional akibat fenomena ketidaksesuaian termal (*thermal mismatch*). Lebih lanjut, profil beban rumah tinggal tiga fasa yang sangat fluktuatif memicu ketidakseimbangan arus antar fasa yang ekstrem. Jika tidak dikendalikan, kondisi ini akan memunculkan arus netral dan pergeseran tegangan yang dapat merusak kelistrikan alat-alat elektronik rumah tangga. Berpijak pada celah penelitian tersebut, riset ini bertujuan merancang bangun dan mengimplementasikan sistem PLTS Hibrida 10,44 kWp berbasis baterai LiFePO₄ pada hunian tiga fasa berdaya 13.200 VA. Untuk memitigasi kendala dimensi luasan dan heterogenitas suhu atap, penelitian ini menerapkan strategi pemasangan *split-array* yang dioptimalkan oleh pengontrol *Dual* MPPT. Fokus analisis diarahkan pada evaluasi presisi produksi energi aktual (*energy yield*), efektivitas algoritma *zero export*, serta pembuktian empiris keandalan inverter dalam menjaga deviasi stabilitas tegangan saat menghadapi kondisi ketidakseimbangan arus fasa yang ekstrem. Kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada pembuktian empiris kinerja *dual* MPPT dalam memitigasi anomali daya pada atap heterogen, serta validasi operasional fitur kompensasi *100% unbalanced output* pada skala residensial.

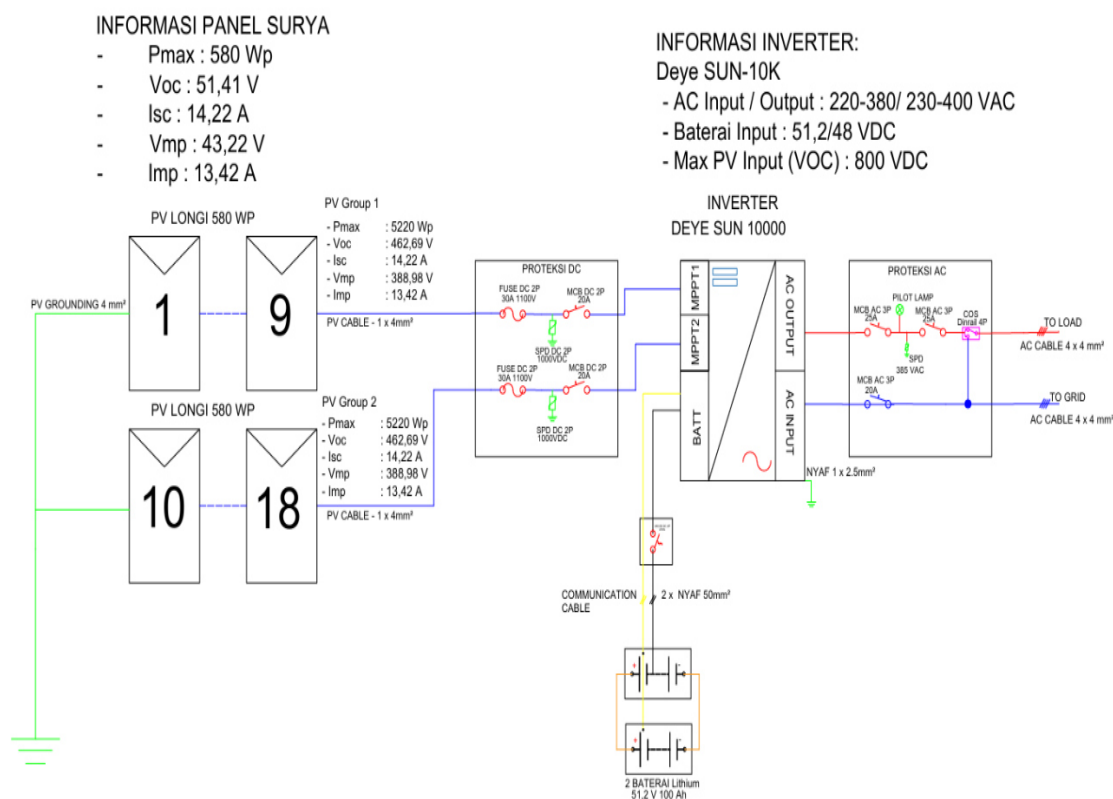
II. METODE PENELITIAN

A. Metode dan Alur Penelitian

Penelitian ini menerapkan kerangka kerja *Engineering Design Process* (EDP) dengan pendekatan dekomposisi *top-down*, yang mencakup tahapan audit energi kelistrikan, perancangan detail (*Detail Engineering Design*), instalasi fisik, hingga tahap pengujian *commissioning* sistem secara terintegrasi. Objek studi difokuskan pada sebuah hunian residensial yang merangkap sebagai ruang kerja produktif (*home office*) dengan kapasitas daya terpasang sebesar 13.200 VA (tiga fasa) yang berlokasi di wilayah Gubeng, Kota Surabaya. Untuk mendapatkan data performa sistem yang valid di bawah dinamika iklim tropis basah (musim penghujan), observasi dan pengambilan data lapangan dilaksanakan selama satu bulan penuh pada periode 1 hingga 28 Februari 2026. Seluruh perekaman parameter kelistrikan termasuk fluktuasi arus, tegangan, dan *energy yield* dilakukan secara berkelanjutan dan *real-time* memanfaatkan infrastruktur pemantauan berbasis *Internet of Things* (IoT) melalui peladen Deye Cloud.

B. Perancangan Perangkat Keras dan Kelistrikan

Arsitektur perangkat keras sistem PLTS hibrida ini dirancang secara khusus untuk mengatasi kendala keterbatasan lahan atap sekaligus memastikan keandalan distribusi beban pada instalasi tiga fasa. Skema perancangan membagi total 18 unit modul surya ke dalam dua (*string*) terpisah dengan konfigurasi *split-array* untuk memaksimalkan fitur *Dual* MPPT pada inverter. String pertama dipasang terpusat pada atap bermaterial spandek, sedangkan String kedua didistribusikan pada area atap spandek dan genteng keramik. Alur konversi daya dan tata letak proteksi sistem kelistrikan secara keseluruhan direpresentasikan melalui *Single Line Diagram* (SLD) pada Gambar 1.



Gambar 1. Single Line Diagram (SLD) Topologi Sistem PLTS Hibrida

Sebagai penopang keandalan daya darurat, kelistrikan ini diintegrasikan dengan modul penyimpanan energi berbasis baterai *Lithium Iron Phosphate* (LiFePO₄). Mikrokontroler inverter diprogram dengan logika *Energy Management System* (EMS) yang memprioritaskan pemenuhan beban mandiri (*self-consumption*), pengisian daya baterai, perlindungan peralihan tanpa jeda (*seamless transfer*), serta penerapan pembatasan ekspor daya (*zero export*) ke jaringan PLN. Rincian kapasitas dan spesifikasi komponen utama yang diaplikasikan dalam perancangan ini diuraikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Teknis Komponen Utama

No	Komponen Utama	Spesifikasi Perangkat	Kapasitas/Kuantitas
1	Modul Surya	Longi Hi-MO 7 Monocrystalline Bifacial 580 Wp	18 Unit (Total: 10,44 kWp)
2	Inverter Hibrida	Deye SUN-10K-SG04LP3-EU 3 Fasa (<i>Dual MPPT, 100% Unbalanced Output</i>)	1 Unit (Kapasitas: 10 kW)
3	Penyimpanan Energi	LiFePO ₄ Hinaess Hi-5 51,2V (<i>Depth of Discharge 75%</i>)	2 Unit (Total: 10,24 kWh)
4	Proteksi Sisi Arus Searah (DC)	Fuse DC 1100V, SPD DC 2P 1000V, MCCB DC	Disesuaikan Standar NEC 690.8
5	Proteksi Sisi Arus Bolak-Balik (AC)	MCB 3-Fasa, SPD AC 4P 385V, COS 4P 63A	Disesuaikan Standar SNI PUIL 2011

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

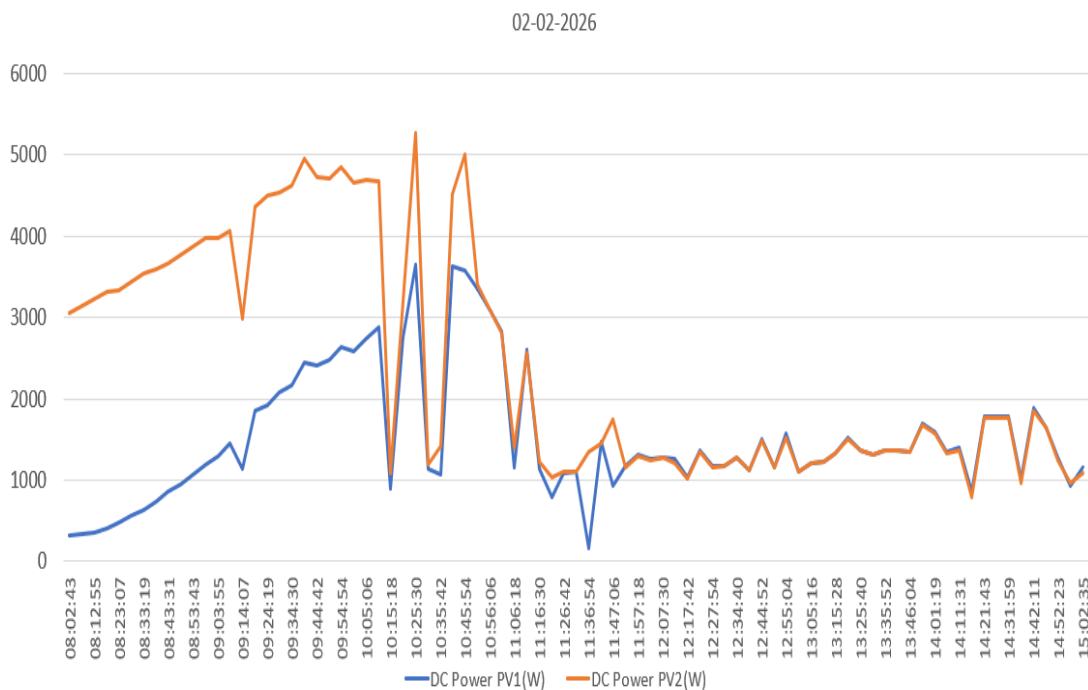
Pada bagian ini, dievaluasi kinerja operasional sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) hibrida berdasarkan ekstraksi data lapangan selama periode 1 hingga 28 Februari 2026. Fokus pembahasan dibagi ke dalam tiga parameter uji utama, yaitu kinerja produksi energi (*energy yield*), stabilitas tegangan pada ketidakseimbangan

arus fasa (*unbalanced load*), serta keandalan fitur penahan daya ekspor (*zero export*) dan otonomi cadangan (*backup power*).

A. Kinerja Produksi Energi dan Efektivitas Arsitektur Split-Array

Berdasarkan perekaman data operasional, sistem PLTS secara konsisten memproduksi daya kelistrikan dengan total akumulasi *energy yield* mencapai 809,7 kWh selama satu bulan penuh. Angka capaian ini menunjukkan bahwa rancang bangun sistem memiliki tingkat kesesuaian realisasi terhadap estimasi sebesar 98,93% jika dikomparasikan dengan perancangan teoretis sebesar 818,44 kWh. Sedikit deviasi sebesar -1,07% merupakan variansi wajar yang linier dengan fluktuasi iradiasi matahari selama periode musim hujan di bulan Februari. Produksi energi mandiri ini mensubstitusi 41,4% dari total konsumsi beban harian sebesar 70,59 kWh, sehingga memberikan implikasi langsung terhadap efisiensi tagihan listrik operasional *home office*.

Secara teknis, implementasi arsitektur *split-array* memberikan indikasi empiris terjadinya fenomena ketidaksesuaian termal (*thermal mismatch*). Analisis kurva daya instan pada kondisi cuaca cerah (2 Februari 2026) menunjukkan bahwa daya pada larik pertama (*String 1*) yang sepenuhnya berada di atas atap seng spandek mengalami penurunan drastis hingga menyentuh angka 169 W pada pukul 11:36 WIB. Meskipun temperatur atap dan modul tidak diukur secara langsung, anomali penurunan daya ini sejalan dengan studi empiris yang menyatakan bahwa material atap logam secara signifikan menaikkan suhu permukaan modul (akibat konduksi dan refleksi termal), yang berujung pada penurunan tegangan sel surya [12]. Sebaliknya, string kedua (*String 2*) yang dikonfigurasi secara campuran pada atap genteng tetap stabil memproduksi daya 1.340 W pada waktu yang sama. Hasil tersebut menunjukkan bahwa teknologi *Dual MPPT* pada inverter Deye yang mampu mengisolasi penurunan performa pada satu string tanpa mengorbankan kinerja lainnya, sebagaimana divisualisasikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kurva perbandingan daya MPPT yang mengindikasikan ketidaksesuaian termal pada kondisi cuaca cerah

B. Stabilitas Tegangan pada Kondisi Beban Tidak Seimbang

Dinamika penggunaan perangkat elektronik di dalam *home office* memicu terjadinya ketimpangan distribusi arus yang sangat signifikan pada kelistrikan tiga fasa. Pengukuran data aktual pada 11 Februari 2026 mencatat kondisi ekstrem di mana fasa R memikul arus sebesar 9,8 A, sedangkan fasa T hanya 3,9 A, merepresentasikan ketidakseimbangan arus (*current unbalance*) yang mencapai 65,17%. Pada sistem distribusi tiga fasa konvensional,

kondisi ekstrem ini akan memicu arus urutan-nol (*zero-sequence current*) dan pergeseran titik netral yang berbahaya bagi utilitas jaringan [13]. Hasil pengujian arus dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Pengujian Ketidakseimbangan Arus Antar Fasa

Kategori	Tanggal	Arus R (A)	Arus S (A)	Arus T (A)	% Unbalance Arus
Moderat	01 Feb 2026	7,59	6,42	10,98	31,81%
Ekstrem	11 Feb 2026	9,80	4,10	3,90	65,17%
Normal	28 Feb 2026	12,05	11,30	13,50	9,91%

Meskipun didera ketimpangan arus yang tinggi, pengujian menunjukkan bahwa fitur *100% Unbalanced Output* pada inverter hibrida mampu menjalankan fungsi *Independent Phase Control* secara presisi. Inverter memisahkan kompensasi daya ke masing-masing fasa secara mandiri, sehingga deviasi tegangan pada ketiga fasa tetap stabil di kisaran 230,5 V hingga 235,8 V (ditunjukkan pada Tabel 3).

Tabel 3. Stabilitas Tegangan Output per Fasa

Tanggal	Tegangan RN (V)	Tegangan SN (V)	Tegangan TN (V)
01 Feb 2026	232,6 V	237,6 V	239,3 V
11 Feb 2026	230,5 V	234,2 V	235,8 V
28 Feb 2026	233,1 V	237,4 V	239,4 V

Rata-rata tingkat ketidakseimbangan tegangan (*voltage unbalance*) tercatat hanya sebesar 1,28%, dengan batas deviasi maksimal sebesar 1,65%. Nilai tersebut memenuhi batas toleransi yang ditetapkan dalam IEEE 1159, yang menetapkan batas toleransi deviasi tegangan pada perangkat elektronik sensitif tidak boleh melebihi angka 3% [14]. Kestabilan tegangan dan kemampuan inverter dalam mengakomodasi ketimpangan arus antar fasa ini sejalan dengan prinsip optimasi keamanan sistem distribusi dan pengaturan relai proteksi kelistrikan [15].

C. Keandalan Fitur Zero Export dan Otonomi Cadangan Daya

Validasi terhadap kepatuhan regulasi interkoneksi diuji saat fase iradiasi puncak dengan bangkitan daya mencapai 8,91 kW. Algoritma *Energy Management System* (EMS) secara otomatis memecah aliran daya: 4,16 kW untuk beban domestik dan 4,37 kW dialokasikan untuk pengisian baterai. Umpan balik dari sensor *Current Transformer* (CT) menjaga nilai *Pexport* tetap 0 W.

Pada simulasi pemutusan jaringan utilitas (*blackout*), mekanisme *Seamless Transfer Switch* internal mengambil alih suplai beban dalam waktu kurang dari 10 milidetik. Kecepatan peralihan ini berperan dalam menjaga kontinuitas operasi merujuk pada kurva toleransi ITI (CBEMA) untuk kualitas daya komputer, interupsi suplai di bawah 20 ms akan mencegah perangkat *server* dari siklus mati mendadak (*restart*) [14]. Kapasitas baterai LiFePO₄ sebesar 10,24 kWh dengan konfigurasi *Depth of Discharge* 75% juga divalidasi mampu menopang beban prioritas secara konstan (2.000 W) selama 3 jam 50 menit.

Adapun formulasi matematis yang digunakan sebagai landasan analisis dalam mengevaluasi kinerja sistem kelistrikan pada penelitian ini mencakup perhitungan estimasi produksi energi harian (*Energy Yield*) serta metrik persentase ketidakseimbangan arus (*Unbalance*), yang penulisan persamaannya dijabarkan secara berurut sebagai berikut:

$$E_{yield} = P_{array} \times T_{sun} \times n_{sys} \quad (1)$$

$$\%Unbalance_I = \frac{\Delta I_{max}}{I_{avg}} \times 100\% \quad (2)$$

IV. KESIMPULAN

Rancang bangun sistem PLTS hibrida berkapasitas 10,44 kWp yang terintegrasi dengan baterai LiFePO4 10,24 kWh berhasil diimplementasikan pada hunian residensial tiga fasa berdaya 13.200 VA. Data pengujian lapangan menunjukkan bahwa sistem mampu memproduksi energy yield sebesar 809,7 kWh per bulan, dengan tingkat kesesuaian realisasi terhadap estimasi mencapai 98,93% yang berdampak pada substitusi beban harian sebesar 41,4%. Implementasi konfigurasi split-array yang didukung Dual MPPT berhasil menanggulangi rugi-rugi daya yang terindikasi diakibatkan oleh anomali thermal mismatch pada material atap spandek. Di sisi manajemen kualitas daya, fitur 100% unbalanced output pada inverter mampu mengisolasi dampak ketimpangan arus yang mencapai fase ekstrem 65,17%, dengan mempertahankan kestabilan tegangan pada deviasi maksimal 1,65%, jauh di bawah ambang batas standar IEEE 1159. Keseluruhan sistem juga mampu mengakomodasi otonomi kelistrikan home office dengan tingkat peralihan backup di bawah 10 ms serta patuh terhadap regulasi zero export utilitas.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. A. Febrianti, M. Effendy, and B. N. Cahyadi, "Technical Feasibility Study and Design of 60 kWp On-Grid Solar Power Plant at Joint Lecture Building-5, University of Muhammadiyah Malang," *Energy J. Ilm. Ilmu-Ilmu Tek.*, vol. 15, no. 1, pp. 26–42, May 2025.
- [2] L. Syafaah, A. E. Minarno, F. D. S. Sumadi, and G. W. Mukti, "Distance Measurement of ESP8266 for Control and Monitoring in Smart Home Application," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1381, no. 1, p. 012058, Nov. 2019.
- [3] E. Tarigan, "Techno-Economic Analysis of Residential Grid-Connected Rooftop Solar PV Systems in Indonesia Under MEMR 26/2021 Regulation," *Int. J. Energy Econ. Policy*, vol. 14, no. 1, pp. 412–417, Jan. 2024.
- [4] M. Effendy et al., "Studi Kelayakan Teknis dan Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Rooftop di Hotel Rayz Universitas Muhammadiyah Malang," *Techné J. Ilm. Elektrotek.*, vol. 23, no. 1, pp. 95–106, 2024.
- [5] Kementrian ESDM, "Peraturan Menteri ESDM Nomor 2 Tahun 2024 tentang PLTS Atap," Jakarta, 2024.
- [6] U. H. Rahman et al., "A Photovoltaic Technology Review: History, Fundamentals and Applications," *Energies*, vol. 27, no. 1, p. 4909, 2022.
- [7] M. Effendy, N. A. Mardiyah, and K. Hidayat, "Implementasi Maximum Power Point Tracking pada Photovoltaic Berbasis P&O-Fuzzy," *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf.*, vol. 6, no. 1, pp. 2–7, Feb. 2017.
- [8] D. Suhardi et al., "Improvement of maximum power point tracking (MPPT) efficiency using grey Wolf optimization (GWO) algorithm in photovoltaic (PV) system," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 674, no. 1, p. 012038, Nov. 2019.
- [9] S. Luo, W. Wu, E. Koutroulis, H. S. H. Chung, and F. Blaabjerg, "A New Unbalanced Voltage Compensation Method Based on HOPF Oscillator for Three-Phase DC/AC Inverters with Unbalanced Loads," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 13, no. 6, pp. 4245–4255, Nov. 2022.
- [10] M. Alharbi, "Control Approach of Grid-Connected PV Inverter under Unbalanced Grid Conditions," *Processes*, vol. 12, no. 1, p. 212, Jan. 2024.
- [11] J. Xu, H. Li, S. Hua, and H. Wang, "Experimental investigation of grid storage modes effect on aging of LiFePO4 battery modules," *Front. Energy Res.*, vol. 13, no. February, pp. 1–14, Feb. 2025.
- [12] P. Sinha, M. C. Brito, and B. Wade, "Effect of roof material and color on the performance of rooftop photovoltaic systems," *Solar Energy*, vol. 216, pp. 248–256, 2021.
- [13] M. A. Eltawil and Z. Zhao, "Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 1, pp. 112–129, 2020.

- [14] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, *IEEE Standard 1159-2019*, 2019.
- [15] D. Suhardi, I. Pakaya, R. Putra, and A. Faruq, "Coordination analysis of protection relay settings utilizing particle swarm optimization method," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2453, p. 020061, 2022.