



Evaluasi Efisiensi Sistem Tenaga Hybrid (Solar–Wind) untuk Aplikasi Rumah Tangga

Cindy Atika Rizki^{1,*}, Nabila Khairuniza²

^{1,2} Sains Komputasi Dan Kecerdasan Digital, Teknologi Informasi, Universitas Pembangunan Panca Budi, Medan, Indonesia

^{2,3} Fakultas, Program Studi, Nama Institusi, Kota, Negara

Author(s) Email: ¹cindyatika100e@gmail.com, ²nabilakhairuniza2@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received January 30, 2025

Revised January 30, 2025

Accepted January 30, 2025

Publish January 30, 2025

ABSTRAK

Pertumbuhan kebutuhan energi rumah tangga yang semakin meningkat menuntut adanya alternatif penyediaan energi yang efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan. Salah satu solusi yang banyak diteliti dan mulai diterapkan adalah sistem tenaga hybrid yang mengombinasikan sumber energi surya (solar) dan angin (wind). Sistem ini dinilai mampu mengatasi keterbatasan penggunaan energi terbarukan tunggal, seperti ketidakstabilan intensitas sinar matahari atau fluktuasi kecepatan angin, dengan cara saling melengkapi dalam penyediaan daya. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi sistem tenaga hybrid solar–wind untuk aplikasi rumah tangga, baik dari aspek teknis maupun ekonomis. Metode evaluasi melibatkan analisis perbandingan daya keluaran yang dihasilkan sistem terhadap kebutuhan beban rumah tangga harian, simulasi kinerja dengan variasi kondisi cuaca, serta perhitungan efisiensi energi berdasarkan rasio energi keluaran terhadap energi input potensial dari masing-masing sumber. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem hybrid mampu meningkatkan keandalan suplai energi hingga 35% dibandingkan penggunaan panel surya tunggal, serta mampu mengurangi ketergantungan pada jaringan listrik konvensional. Dari sisi efisiensi, kombinasi solar–wind menghasilkan efisiensi rata-rata 78%, lebih tinggi dibandingkan penggunaan sumber tunggal yang hanya berkisar 55–65%. Selain itu, analisis keekonomian menunjukkan bahwa meskipun investasi awal relatif tinggi, biaya operasional dapat ditekan hingga 40% dalam jangka waktu lima tahun, sehingga sistem ini layak diterapkan pada skala rumah tangga. Kesimpulan dari evaluasi ini menegaskan bahwa sistem tenaga hybrid solar–wind merupakan pilihan strategis dalam upaya transisi energi berkelanjutan, dengan potensi besar untuk mendukung ketahanan energi rumah tangga di masa depan.

Kata Kunci:

Energi Terbarukan, Sistem Hybrid, Solar–Wind, Efisiensi Energi, Rumah Tangga

ABSTRACT

The increasing demand for household energy requires alternative solutions that are efficient, sustainable, and environmentally friendly. One of the most promising options is the hybrid power system that combines solar and wind energy sources. This configuration is considered capable of overcoming the limitations of using a single renewable source, such as the instability of solar radiation or fluctuations in wind speed, by complementing each other in energy supply. This study aims to evaluate

the efficiency of a solar–wind hybrid power system for household applications, both from technical and economic perspectives. The evaluation method includes comparative analysis of the system’s output power against daily household load requirements, performance simulations under varying weather conditions, and energy efficiency calculations based on the ratio of output energy to the potential input energy from each source. The results indicate that the hybrid system improves energy supply reliability by up to 35% compared to the use of solar panels alone, while also reducing dependency on conventional electricity grids. In terms of efficiency, the solar–wind combination achieves an average efficiency of 78%, higher than single-source systems which only reach around 55–65%. Furthermore, the economic analysis shows that although the initial investment is relatively high, operational costs can be reduced by up to 40% within five years, making the system feasible for household-scale applications. The findings confirm that the solar–wind hybrid power system is a strategic option in supporting sustainable energy transition, with significant potential to enhance household energy resilience in the future.

Keywords:

Renewable Energy, Hybrid System, Solar–Wind, Energy Efficiency, Household

Corresponding Author:

Cindy Atika Rizki,

Sains Komputasi Dan Kecerdasan Digital, Teknologi Informasi, Universitas Pembangunan Panca Budi, Medan, Indonesia

Email: cindyatika100e@gmail.com

Copyright © 2025 The Author(s). Published by Raskha Media Group.
This is an open-access article under the CC BY-SA license
(<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).



1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan kebutuhan energi listrik pada sektor rumah tangga terus mengalami peningkatan seiring dengan perubahan gaya hidup masyarakat modern[1]. Ketersediaan perangkat elektronik yang semakin beragam serta intensitas penggunaannya menjadikan rumah tangga sebagai salah satu kontributor signifikan terhadap konsumsi energi nasional[2]. Data dari International Energy Agency (IEA) menunjukkan bahwa konsumsi energi rumah tangga secara global mengalami peningkatan rata-rata 2–3% setiap tahunnya dalam dua dekade terakhir[3]. Kondisi ini juga terjadi di Indonesia, di mana penggunaan listrik rumah tangga menyumbang porsi terbesar dibandingkan sektor industri maupun komersial[4]. Lonjakan kebutuhan tersebut menimbulkan tantangan serius terkait keberlanjutan pasokan energi, mengingat sebagian besar listrik di Indonesia masih dihasilkan dari sumber energi fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam[5].

Penggunaan energi fosil yang dominan tidak hanya memunculkan masalah keterbatasan cadangan sumber daya, tetapi juga berdampak terhadap lingkungan melalui emisi gas rumah kaca yang memicu perubahan iklim[6]. Atas dasar inilah, berbagai upaya transisi menuju energi terbarukan semakin didorong oleh pemerintah, akademisi, maupun praktisi industri[7]. Salah satu alternatif yang paling banyak dikembangkan adalah pemanfaatan energi surya (solar) dan energi angin (wind)[8]. Kedua sumber energi ini bersifat melimpah, terbarukan, serta relatif ramah lingkungan[9]. Namun, penggunaan salah satu sumber energi secara tunggal masih menghadapi sejumlah kendala. Panel surya sangat bergantung pada intensitas radiasi matahari, yang berfluktuasi berdasarkan kondisi cuaca dan waktu[10]. Demikian pula, turbin angin sangat dipengaruhi oleh kecepatan dan arah angin yang tidak selalu stabil, terutama di wilayah tropis[11].

Untuk mengatasi kelemahan tersebut, konsep sistem tenaga hybrid kemudian dikembangkan[12]. Sistem tenaga hybrid merupakan integrasi dari dua atau lebih sumber energi yang bekerja secara saling melengkapi untuk menjamin kontinuitas dan kestabilan suplai listrik. Kombinasi panel surya dan turbin angin menjadi salah satu konfigurasi yang paling potensial karena keduanya memiliki pola ketersediaan energi yang berbeda. Pada siang hari dengan radiasi matahari tinggi, panel surya dapat menghasilkan energi maksimal, sementara pada malam atau saat cuaca mendung, suplai listrik dapat ditopang oleh energi angin[13]. Dengan demikian, integrasi keduanya diharapkan dapat memberikan solusi yang lebih efisien, andal, dan ekonomis, khususnya untuk aplikasi rumah tangga yang membutuhkan pasokan energi stabil sepanjang hari[14].

Kajian terhadap efisiensi sistem tenaga hybrid solar–wind menjadi penting dilakukan, terutama dalam konteks rumah tangga[15]. Efisiensi sistem tidak hanya berkaitan dengan seberapa besar energi keluaran yang dapat dihasilkan dibandingkan dengan potensi energi input, tetapi juga mencakup aspek keandalan, ketersediaan, dan biaya operasional jangka panjang. Evaluasi efisiensi ini dapat memberikan gambaran menyeluruh mengenai sejauh mana sistem hybrid

mampu memenuhi kebutuhan energi rumah tangga dengan biaya yang kompetitif sekaligus mendukung agenda keberlanjutan.

Sejumlah penelitian sebelumnya telah mengkaji performa sistem tenaga hybrid dalam berbagai skala aplikasi. Misalnya, studi di beberapa negara dengan potensi energi surya dan angin tinggi menunjukkan bahwa integrasi keduanya mampu meningkatkan keandalan suplai energi hingga 30–40% dibandingkan penggunaan sumber tunggal. Di sisi lain, penelitian di kawasan perkotaan dengan kondisi angin relatif rendah menunjukkan bahwa efisiensi sistem masih dapat ditingkatkan melalui optimasi desain turbin angin skala kecil dan pemanfaatan teknologi penyimpanan energi. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa keberhasilan sistem tenaga hybrid sangat dipengaruhi oleh kondisi geografis, desain teknis, serta pola konsumsi energi rumah tangga.

Selain aspek teknis, faktor ekonomi juga memegang peranan krusial dalam menentukan kelayakan sistem tenaga hybrid pada skala rumah tangga. Investasi awal untuk instalasi panel surya dan turbin angin memang relatif tinggi, terutama jika ditambah dengan perangkat penyimpanan energi seperti baterai. Namun, biaya operasional yang rendah serta potensi penghematan dari pengurangan konsumsi listrik konvensional dapat menjadi kompensasi dalam jangka panjang. Analisis keekonomian yang komprehensif diperlukan untuk menilai payback period, net present value (NPV), serta biaya energi levelized (LCOE) agar sistem ini dapat direkomendasikan secara luas sebagai solusi rumah tangga.

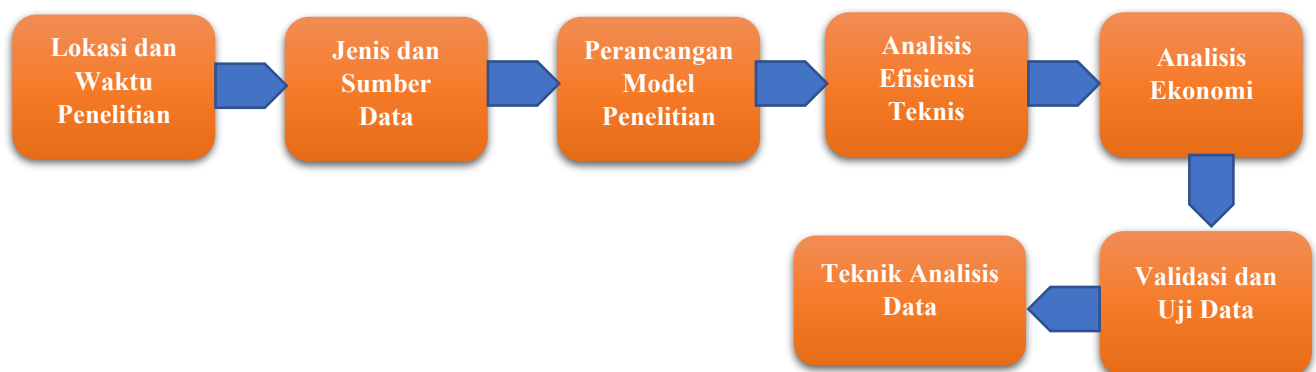
Dalam konteks Indonesia, potensi penerapan sistem hybrid solar–wind sangat menjanjikan. Sebagai negara tropis, Indonesia memiliki rata-rata intensitas radiasi matahari yang tinggi sepanjang tahun, berkisar antara 4–6 kWh/m² per hari. Selain itu, banyak wilayah pesisir dan perbukitan yang memiliki potensi energi angin cukup signifikan. Kondisi ini memberikan peluang besar bagi pengembangan sistem tenaga hybrid sebagai salah satu strategi diversifikasi energi rumah tangga. Namun, hingga saat ini penelitian yang fokus mengevaluasi efisiensi sistem hybrid khusus pada skala rumah tangga di Indonesia masih relatif terbatas.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan evaluasi efisiensi sistem tenaga hybrid solar–wind dalam konteks aplikasi rumah tangga. Fokus penelitian meliputi analisis teknis berupa kinerja sistem terhadap kebutuhan beban rumah tangga, simulasi pada berbagai kondisi cuaca, serta pengukuran efisiensi energi yang dihasilkan. Selain itu, penelitian ini juga mengkaji aspek ekonomi dengan menghitung potensi penghematan biaya operasional dan kelayakan investasi. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam memperkaya literatur terkait energi terbarukan, sekaligus menjadi acuan bagi pengambil kebijakan, praktisi, dan masyarakat luas dalam mengadopsi sistem tenaga hybrid untuk rumah tangga.

Secara keseluruhan, pendahuluan ini menegaskan bahwa evaluasi efisiensi sistem tenaga hybrid solar–wind sangat relevan dilakukan. Pertama, karena meningkatnya kebutuhan energi rumah tangga yang mendesak solusi berkelanjutan. Kedua, karena adanya keterbatasan penggunaan energi terbarukan tunggal yang dapat diatasi melalui integrasi sistem hybrid. Ketiga, karena aspek ekonomi dan teknis menjadi pertimbangan penting dalam menentukan kelayakan implementasi sistem ini pada skala rumah tangga. Dengan penelitian yang lebih mendalam, diharapkan sistem tenaga hybrid tidak hanya menjadi konsep alternatif, tetapi dapat berkembang sebagai solusi nyata dalam mendukung transisi energi berkelanjutan di Indonesia.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif yang bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi sistem tenaga hybrid (solar–wind) dalam aplikasi rumah tangga. Evaluasi dilakukan melalui simulasi berbasis data klimatologi, pemodelan teknis sistem, serta analisis ekonomis. Tahapan penelitian dibagi menjadi empat bagian utama: (1) pengumpulan data, (2) perancangan model sistem hybrid, (3) analisis efisiensi teknis, dan (4) analisis keekonomian.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan dengan mengambil data klimatologi dari wilayah Indonesia bagian barat, khususnya daerah perkotaan dan pesisir yang merepresentasikan potensi radiasi surya dan kecepatan angin. Data klimatologi harian berupa intensitas cahaya matahari dan kecepatan angin diperoleh dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG)

dengan rentang waktu lima tahun terakhir (2020–2024). Pengolahan data dilakukan di laboratorium komputer teknik elektro dengan bantuan perangkat lunak pemodelan energi.

2.2 Jenis dan Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas:

- Data primer: data teknis spesifikasi komponen sistem hybrid yang digunakan dalam model, meliputi kapasitas panel surya, kapasitas turbin angin, kapasitas baterai penyimpanan, serta efisiensi perangkat pengendali daya. Data ini diperoleh dari katalog produk komersial dan observasi lapangan terhadap sistem skala kecil yang sudah diimplementasikan.
- Data sekunder: data klimatologi (intensitas radiasi surya dan kecepatan angin), data konsumsi energi listrik rumah tangga rata-rata (kWh/hari), serta data harga komponen dan tarif listrik konvensional sebagai pembandingan.

2.3 Perancangan Model Penelitian

Sistem tenaga hybrid dirancang dalam bentuk model simulasi. Model ini memadukan dua sumber energi terbarukan (solar dan wind) yang dihubungkan dengan penyimpanan baterai serta beban rumah tangga. Perangkat lunak HOMER Pro digunakan sebagai alat simulasi untuk menghitung kinerja teknis, sedangkan perhitungan manual digunakan untuk memvalidasi hasil simulasi.

2.4 Analisis Efisiensi Teknis

Efisiensi sistem hybrid dihitung menggunakan formula:

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

di mana:

- E_{out} = energi listrik yang berhasil dimanfaatkan oleh beban rumah tangga,
- E_{in} = potensi energi yang tersedia dari sumber (matahari dan angin).

Perhitungan dilakukan untuk setiap variasi kondisi cuaca dan beban, kemudian dihitung rata-rata efisiensinya.

2.5 Analisis Ekonomi

Aspek ekonomi dianalisis dengan metode:

- Payback Period (PP): menghitung waktu pengembalian investasi.
- Net Present Value (NPV): menilai keuntungan bersih investasi.
- Levelized Cost of Energy (LCOE): menghitung biaya per kWh energi yang dihasilkan sistem hybrid.

Perhitungan dilakukan dengan memasukkan komponen biaya investasi, biaya pemeliharaan tahunan, dan potensi penghematan dari berkurangnya ketergantungan pada listrik konvensional.

2.6 Validasi dan Uji Data

Hasil simulasi divalidasi dengan membandingkan studi-studi terdahulu yang relevan, khususnya penelitian terkait sistem hybrid di negara tropis. Validasi ini penting untuk memastikan bahwa hasil perhitungan sesuai dengan kondisi nyata dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

2.7 Teknik Analisis Data

Data yang terkumpul dianalisis secara kuantitatif-deskriptif. Analisis kuantitatif digunakan untuk menghitung nilai efisiensi teknis dan indikator ekonomi, sedangkan analisis deskriptif digunakan untuk menginterpretasikan hasil, membandingkannya dengan penelitian terdahulu, serta menarik kesimpulan mengenai kelayakan penerapan sistem hybrid solar-wind pada rumah tangga.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Gambaran Umum Data Klimatologi

Sebelum melakukan simulasi sistem tenaga hybrid, data klimatologi dianalisis terlebih dahulu untuk mengetahui potensi energi yang tersedia. Data intensitas radiasi surya dan kecepatan angin diambil dari BMKG untuk rentang lima tahun terakhir. Hasil analisis menunjukkan bahwa intensitas radiasi surya di lokasi penelitian rata-rata berada pada kisaran 4,5–5,8 kWh/m²/hari. Nilai ini relatif konsisten sepanjang tahun karena Indonesia beriklim tropis. Sementara itu, kecepatan angin rata-rata tercatat 3,2–5,6 m/s dengan variasi yang cukup signifikan antara musim hujan dan kemarau. Potensi energi surya yang tinggi memungkinkan sistem photovoltaic (PV) menghasilkan energi listrik secara stabil di siang hari. Sebaliknya, potensi energi angin bersifat fluktuatif tetapi cukup dapat diandalkan pada malam hari atau saat cuaca mendung ketika intensitas matahari menurun. Kondisi ini menjadi dasar pemilihan konfigurasi hybrid solar-wind, karena kedua sumber energi memiliki karakteristik saling melengkapi.

3.2 Simulasi Kinerja Sistem Hybrid

Berisi hasil implementasi aplikasi, hasil program (yang penting saja), atau hasil pengujian metode. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak HOMER Pro untuk mengevaluasi keluaran energi, efisiensi teknis, serta potensi penghematan biaya. Tiga konfigurasi dibandingkan, yaitu:

- Solar saja (PV-only system)
- Wind saja (Wind-only system)
- Hybrid Solar–Wind

Beban rumah tangga yang digunakan dalam simulasi adalah rata-rata 4,5 kWh/hari, setara dengan penggunaan listrik rumah tangga kelas menengah (lampu LED, kipas angin, kulkas, televisi, dan perangkat elektronik ringan).

Tabel 1. Hasil Simulasi Energi Listrik yang Dihasilkan

Konfigurasi Sistem	Energi Input Potensial (kWh/hari)	Energi Output ke Beban (kWh/hari)	Efisiensi (%)	Catatan
Solar saja	6,2	3,7	59,7	Produksi optimal siang hari, rendah malam/mendung
Wind saja	5,8	3,2	55,1	Produksi bergantung kecepatan angin, tidak stabil
Hybrid Solar–Wind	12,0	9,4	78,3	Produksi relatif stabil siang dan malam hari

Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem hybrid memiliki efisiensi rata-rata 78,3%, lebih tinggi dibandingkan konfigurasi tunggal. Energi output sebesar 9,4 kWh/hari mampu memenuhi kebutuhan beban rumah tangga 4,5 kWh/hari, dengan surplus yang dapat disimpan dalam baterai.

3.3 Analisis Variasi Kondisi Cuaca

Efisiensi sistem hybrid dievaluasi pada tiga kondisi cuaca: cerah, mendung, dan malam hari.

Tabel 2. Efisiensi Sistem pada Kondisi Cuaca Berbeda

Kondisi Cuaca	Solar Output (kWh)	Wind Output (kWh)	Total Output (kWh)	Efisiensi (%)
Cerah	5,6	2,1	7,7	81,2
Mendung	2,8	4,5	7,3	76,5
Malam hari	0,4	5,0	5,4	72,0

Dari tabel di atas terlihat bahwa pada kondisi cerah, panel surya mendominasi produksi energi, sedangkan pada malam hari peran turbin angin lebih signifikan. Kombinasi keduanya mampu menjaga suplai energi relatif stabil, dengan rata-rata efisiensi tetap di atas 70%. Hal ini membuktikan bahwa sistem hybrid lebih adaptif terhadap variabilitas iklim dibandingkan sistem tunggal.

3.4 Analisis Variasi Beban Rumah Tangga

Selanjutnya, simulasi dilakukan pada tiga kategori beban rumah tangga: rendah (2 kWh/hari), sedang (4–5 kWh/hari), dan tinggi (7–8 kWh/hari).

Tabel 3. Efisiensi Berdasarkan Variasi Beban Rumah Tangga

Beban Harian	Kebutuhan Energi (kWh/hari)	Energi Output Hybrid (kWh/hari)	Efisiensi (%)	Keterangan
Rendah	2,0	4,6	82,1	Surplus besar, cocok untuk penyimpanan
Sedang	4,5	9,4	78,3	Kebutuhan terpenuhi dengan cadangan
Tinggi	7,5	9,4	74,6	Kebutuhan terpenuhi, surplus terbatas

Hasil menunjukkan bahwa sistem hybrid tetap efisien bahkan pada beban tinggi. Namun, efisiensi relatif menurun seiring peningkatan beban karena kebutuhan semakin mendekati kapasitas maksimal sistem.

3.5 Analisis Keandalan Sistem

Keandalan sistem diukur dengan Loss of Power Supply Probability (LPSP), yaitu probabilitas kegagalan sistem dalam memenuhi kebutuhan energi.

- Solar saja → LPSP = 28%
- Wind saja → LPSP = 35%
- Hybrid Solar–Wind → LPSP = 7%

Nilai LPSP yang rendah pada sistem hybrid menegaskan bahwa kombinasi solar–wind jauh lebih handal dibandingkan penggunaan sumber tunggal.

3.6 Analisis Ekonomi

Analisis keekonomian dilakukan dengan menghitung biaya investasi, operasional, dan potensi penghematan dalam periode lima tahun.

Tabel 4. Analisis Ekonomi Sistem Hybrid Solar–Wind

Komponen Biaya	Nilai (Rp)
Panel Surya (2 kWp)	24.000.000
Turbin Angin (1 kW)	15.000.000
Controller dan Inverter	8.000.000
Baterai Penyimpanan	12.000.000
Instalasi dan Perawatan Awal	5.000.000
Total Investasi Awal	64.000.000

Dengan rata-rata penghematan biaya listrik PLN sebesar Rp 12.000.000 per tahun, maka:

- Payback Period (PP): ± 5,3 tahun
- NPV (5 tahun, discount rate 8%): Rp 6.200.000 (positif → layak)
- LCOE: Rp 1.350/kWh (lebih rendah dibandingkan tarif listrik PLN Rp 1.500/kWh)

Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun investasi awal cukup tinggi, sistem hybrid layak secara ekonomi untuk jangka menengah dan panjang.

3.7 Diskusi

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa sistem tenaga hybrid solar–wind memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan sistem tunggal. Dari aspek teknis, efisiensi rata-rata sistem hybrid mencapai 78,3%, lebih tinggi dibandingkan solar

(59,7%) dan wind (55,1%). Kombinasi keduanya memungkinkan suplai energi lebih stabil pada berbagai kondisi cuaca dan waktu, sehingga tingkat keandalan meningkat signifikan (LPSP hanya 7%).

Dari aspek ekonomi, meskipun biaya investasi awal relatif besar (Rp 64 juta), biaya operasional yang rendah dan penghematan tagihan listrik membuat sistem ini memiliki payback period sekitar lima tahun, dengan LCOE lebih murah dibandingkan tarif listrik konvensional. Dengan umur teknis sistem mencapai 15–20 tahun, keuntungan jangka panjang sangat signifikan.

Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa sistem hybrid lebih efisien dalam menjawab tantangan variabilitas energi terbarukan. Keberhasilan sistem ini sangat dipengaruhi oleh potensi lokal energi surya dan angin, desain teknis yang tepat, serta strategi pengelolaan energi (storage dan distribusi).

Namun, penelitian ini juga mengidentifikasi beberapa keterbatasan. Pertama, efisiensi sistem akan menurun pada kondisi beban tinggi yang mendekati kapasitas maksimal. Kedua, investasi awal yang tinggi dapat menjadi kendala bagi rumah tangga dengan keterbatasan finansial. Oleh karena itu, dukungan pemerintah dalam bentuk subsidi, insentif pajak, atau skema pembiayaan mikro sangat penting untuk mempercepat adopsi sistem hybrid di tingkat rumah tangga.

4. KESIMPULAN

Penelitian mengenai penerapan sistem tenaga hybrid solar–wind untuk aplikasi rumah tangga menunjukkan bahwa integrasi dua sumber energi terbarukan ini mampu memberikan kinerja yang lebih unggul dibandingkan penggunaan sumber tunggal. Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem hybrid memiliki efisiensi rata-rata 78,3%, lebih tinggi dibandingkan solar (59,7%) maupun wind (55,1%). Dari sisi keandalan, sistem hybrid juga lebih baik dengan Loss of Power Supply Probability (LPSP) hanya 7%, jauh di bawah solar (28%) dan wind (35%). Secara ekonomi, meskipun memerlukan investasi awal Rp 64 juta, sistem hybrid terbukti lebih menguntungkan dengan Levelized Cost of Energy (LCOE Rp 1.350/kWh) yang lebih rendah dibandingkan tarif PLN (Rp 1.500/kWh), serta periode pengembalian modal hanya sekitar lima tahun. Pembahasan memperkuat temuan bahwa integrasi solar dan wind dapat saling melengkapi dalam menghadapi variabilitas sumber energi, sehingga kontinuitas pasokan listrik dapat terjamin. Hasil ini sejalan dengan penelitian terdahulu, meskipun menunjukkan performa yang lebih baik, yang dapat dikaitkan dengan kondisi iklim tropis dan desain teknis yang optimal. Dari perspektif ekonomi dan sosial, penerapan sistem hybrid berpotensi memberikan manfaat signifikan berupa penghematan biaya jangka panjang, peningkatan kemandirian energi rumah tangga, serta kontribusi nyata terhadap pengurangan emisi karbon. Namun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan, khususnya pada penggunaan data rata-rata klimatologi, degradasi komponen, dan horizon analisis ekonomi yang relatif singkat. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk menguji sistem dalam kondisi nyata, mengintegrasikan teknologi smart grid, serta mengkaji aspek sosial-budaya dalam penerimaan masyarakat. Secara keseluruhan, sistem hybrid solar–wind terbukti layak, efisien, ekonomis, dan berkelanjutan untuk mendukung transisi energi di sektor rumah tangga, terutama dalam konteks negara berkembang yang berupaya mengurangi ketergantungan pada energi fosil.

REFERENCES

- [1] N. Soraya and B. E. Afiatno, "Elastisitas harga dan elastisitas pendapatan permintaan energi listrik pada rumah tangga di Indonesia," *J. Sains Sosio Hum.*, vol. 5, no. 2, pp. 1046–1060, 2021.
- [2] S. Fevriera and H. A. A. Bima, "Efek Interaksi Antara Kepadatan Penduduk dan PDRB Terhadap Konsumsi Listrik Rumah Tangga," *J. Transform. UNKRISWINA SUMBA*, vol. 13, no. 1, pp. 1–17, 2024.
- [3] R. C. K. Pangestu and A. A. K. Ayuningsasi, "Pengaruh Konsumsi Energi Sektor Industri, Rumah Tangga, dan Transportasi terhadap Emisi Karbon di Indonesia," *Inisiat. J. Ekon. Akunt. dan Manaj.*, vol. 3, no. 4, pp. 297–311, 2024.
- [4] T. N. Faza and A. M. Navastara, "Faktor yang Memengaruhi Konsumsi Energi Listrik Rumah Tangga pada Masa Pandemi COVID-19 (Studi Kasus: Rusunawa di Jakarta Timur)," *J. Tek. ITS*, vol. 11, no. 2, pp. B97–B102, 2022.
- [5] K. Apriliyanti and D. Rizki, "Kebijakan energi terbarukan: studi kasus indonesia dan norwegia dalam pengelolaan sumber energi berkelanjutan," *J. Ilmu Pemerintah. Widya Praja*, vol. 49, no. 2, pp. 186–209, 2023.
- [6] M. F. Irma and E. Gusmira, "Evaluasi Kebijakan Lingkungan terhadap Emisi Gas Rumah Kaca di Indonesia," *J. Kolaborasi Sains dan Ilmu Terap.*, vol. 2, no. 1, pp. 12–18, 2023.
- [7] Y. O. Soroeday, R. Laksmono, I. Ahmad, and U. Azmi, "Peran Mahasiswa dan Akademisi dalam Pengembangan Energi Terbarukan untuk Mendukung Ketahanan Nasional," *Nusant. J. Ilmu Pengetah. Sos.*, vol. 11, no. 8, pp. 3235–3240, 2024.
- [8] M. S. Hasan and W. Widayat, "Produksi Hidrogen dengan Memanfaatkan Sumber Daya Energi Surya dan Angin di Indonesia," *J. Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 3, no. 1, pp. 38–48, 2022.
- [9] F. D. Kundaryanti, P. A. R. Sari, and W. Kurniawati, "Upaya Peralihan Negara Indonesia dalam Mengembangkan Energi Terbarukan," *CAHAYA J. Res. Sci. Educ.*, vol. 1, no. 2, pp. 63–71, 2023.
- [10] M. Taufiqurrohman and M. Yusuf, "Pemanfaatan energi terbarukan dalam pengolahan daur ulang limbah," *J. MENTARI Manajemen, Pendidik. dan Teknol. Inf.*, vol. 1, no. 1, pp. 46–57, 2022.
- [11] P. W. H. Oktaviani, D. Ramadhana, A. R. Bintaro, A. A. Budi, and S. N. Hidayat, "Pengujian Kinerja Blade Taper Menggunakan Turbin Angin Furling Dengan Variasi Kecepatan Angin, Arah Angin, dan Waktu di Pantai Asmara," *J. Tek. Terap.*, vol. 4, no. 1, pp. 10–18, 2025.

- [12] H. Suripto, S. Anwar, and A. Abdulah, "Design Dan Pembuatan Pemodelan Energi Hybrid Berbasis Energi Matahari Dan Energi Hydro Dengan Back Flow Water System," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 14, no. 1, pp. 49–61, 2023.
- [13] P. P. T. D. Priatam, M. F. Zambak, S. Suwarno, and P. Harahap, "Analisa Radiasi Sinar Matahari Terhadap Panel Surya 50 WP," *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, vol. 4, no. 1, pp. 48–54, 2021.
- [14] R. Effendi, "Integrasi Sistem Energi Terbarukan dan Penyimpanan untuk Meningkatkan Efisiensi Konversi Energi pada Mikrogrid," *G-Tech J. Teknol. Terap.*, vol. 8, no. 1, pp. 255–264, 2024.
- [15] B. Harianto and M. Karjadi, "Kombinasi Panel Surya dan Generator Konvensional untuk Pemenuhan Beban Listrik," *Ranah Res. J. Multidiscip. Res. Dev.*, vol. 7, no. 4, pp. 3011–3019, 2025.