

DESAIN DAN OPTIMASI SISTEM TENAGA HIBRIDA UNTUK LISTRIK RUMAH TANGGA MENGGUNAKAN HOMER PRO: ANALISIS BIAYA DAN KEBERLANJUTAN

Zikri Hanafi^{1*}, Teguh Kurniawan², Galih Alif Artanto³, Michael Aritha⁴, Dian Budhi Santoso⁵

^{1,2,3,4,5}Prodi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang, Karawang, Jawa Barat, Indonesia

Keywords:

*Energy efficiency;
HOMER Pro;
Hybrid power system;
Renewable energy.*

Correspondent Email:

2110631160064@student.unsika.ac.id

Abstrak. Krisis energi global dan dampak negatif emisi gas rumah kaca telah mendorong banyak negara, termasuk Indonesia, untuk mencari solusi energi yang lebih berkelanjutan. Sumber energi terbarukan seperti fotovoltaik (PV) dan turbin angin menawarkan alternatif yang ramah lingkungan, namun pemanfaatannya terkendala oleh ketergantungan pada kondisi cuaca dan iklim. Penelitian ini bertujuan untuk merancang, mengoptimalkan, dan membandingkan enam konfigurasi sistem tenaga hibrida menggunakan perangkat lunak HOMER Pro di daerah Cikarang, Kabupaten Bekasi, Jawa Barat, Indonesia, guna menemukan konfigurasi yang paling efisien dan ekonomis dalam memenuhi kebutuhan listrik. Simulasi dilakukan dengan mempertimbangkan berbagai parameter teknis dan ekonomis, termasuk biaya modal, biaya operasi, dan data meteorologi setempat. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi PV-Turbin Angin-Jaringan adalah yang paling optimal dengan biaya energi (COE) sebesar Rp.838,04/kWh, biaya bersih saat ini (NPC) sebesar Rp.211.000.000, dan biaya operasional tahunan sebesar Rp.2.040.000. Sistem ini juga menghasilkan emisi CO₂ yang lebih rendah dibandingkan konfigurasi berbasis generator diesel. Kombinasi PV dan turbin angin terbukti lebih efisien dan berkelanjutan, menjadikannya solusi yang ideal untuk daerah dengan potensi energi terbarukan tinggi seperti Indonesia. Penelitian ini juga menegaskan pentingnya penggunaan perangkat lunak simulasi untuk mendukung pengambilan keputusan dalam perencanaan sistem energi yang lebih efisien dan ramah lingkungan.



JITET is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

Abstract. The global energy crisis and the negative impact of greenhouse gas emissions have prompted many countries, including Indonesia, to seek more sustainable energy solutions. Renewable energy sources such as photovoltaic (PV) and wind turbines offer an environmentally friendly alternative, but their utilisation is constrained by dependence on weather and climate conditions. This study aims to design, optimise and compare six hybrid power system configurations using HOMER Pro software in the Cikarang area, Bekasi Regency, West Java, Indonesia, to find the most efficient and economical configuration in meeting electricity demand. Simulations were conducted by considering various technical and economic parameters, including capital costs, operating costs, and local meteorological data. The simulation results show that the PV-Wind Turbine-Network configuration is the most optimal

with an energy cost (COE) of Rp.838.04/kWh, a net present cost (NPC) of Rp.211,000,000, and an annual operating cost of Rp.2,040,000. The system also produces lower CO₂ emissions than the diesel generator-based configuration. The combination of PV and wind turbines proved to be more efficient and sustainable, making it an ideal solution for regions with high renewable energy potential such as Indonesia. This research also confirms the importance of using simulation software to support decision-making in planning more efficient and environmentally friendly energy systems

1. PENDAHULUAN

Krisis energi global yang dipicu oleh peningkatan permintaan energi, kenaikan harga bahan bakar fosil, serta dampak negatif terhadap lingkungan dari emisi gas rumah kaca, telah mendorong banyak negara untuk mencari solusi energi yang lebih berkelanjutan [1]. Saat ini, sekitar 87% dari total energi dunia masih dihasilkan dari bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak, dan gas alam [2]. Bahan bakar ini menghasilkan emisi karbon dioksida (CO₂) yang signifikan, berkontribusi pada pemanasan global dan perubahan iklim yang dapat mengganggu keseimbangan ekosistem dan kesehatan manusia. Oleh karena itu, upaya untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil telah menjadi prioritas utama dalam kebijakan energi global.

Di tengah tantangan tersebut, energi terbarukan seperti fotovoltaik (PV) dan turbin angin menawarkan solusi yang menarik karena sumber daya ini melimpah, berkelanjutan, dan ramah lingkungan. Energi surya dan angin dianggap sebagai pilihan utama untuk memenuhi kebutuhan energi masa depan karena dapat dihasilkan tanpa menghasilkan emisi CO₂. Namun, salah satu tantangan utama dalam pemanfaatan sumber energi terbarukan adalah ketidakpastian dalam ketersediaan sumber daya tersebut, karena tergantung pada faktor cuaca dan iklim yang tidak selalu dapat diprediksi.

Untuk mengatasi masalah ini, teknologi sistem tenaga hibrida yang menggabungkan berbagai sumber energi terbarukan menjadi semakin populer. Sistem hibrida adalah kombinasi dari dua atau lebih sumber energi (misalnya, PV dan angin) yang dirancang untuk bekerja bersama guna meningkatkan efisiensi, keandalan, dan keberlanjutan pasokan energi [3]. Dengan menggabungkan beberapa jenis sumber energi, sistem ini dapat memaksimalkan produksi energi sepanjang tahun, sekaligus meminimalkan biaya dan emisi.

Penelitian tentang optimasi sistem tenaga hibrida menjadi semakin relevan, terutama bagi negara-negara berkembang seperti Indonesia yang memiliki potensi besar dalam energi terbarukan. Indonesia menerima radiasi matahari yang bervariasi antara 4,6 hingga 7,2 kWh/m²/day selama periode setahun, yang 50-100% lebih tinggi dibandingkan dengan negara-negara di Eropa [4]. Selain itu, terdapat potensi yang signifikan dalam memanfaatkan kecepatan angin di beberapa daerah, terutama selama musim monsun.

Namun, tantangan utama dalam penerapan teknologi ini adalah biaya awal yang tinggi serta ketidakpastian terkait efisiensi sistem di lapangan. Oleh karena itu, diperlukan analisis yang cermat menggunakan perangkat lunak simulasi seperti HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) untuk mengidentifikasi konfigurasi sistem yang paling ekonomis dan andal. HOMER memungkinkan penilaian terhadap berbagai skenario dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti biaya modal, biaya operasi, umur perangkat, dan data meteorologi setempat [5].

Penelitian ini berfokus pada studi kasus di daerah Cikarang, Kabupaten Bekasi, Jawa Barat, Indonesia. Studi ini bertujuan untuk merancang, mengoptimalkan, dan membandingkan enam konfigurasi sistem tenaga yang berbeda dengan menggunakan perangkat lunak HOMER. Tujuan utamanya adalah untuk menemukan konfigurasi yang paling efisien dalam hal biaya energi (Cost of Energy, COE), biaya bersih saat ini (Net Present Cost, NPC), serta biaya operasional, yang pada akhirnya dapat diusulkan sebagai solusi terbaik untuk memenuhi kebutuhan listrik dengan cara yang berkelanjutan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Seiring dengan meningkatnya kesadaran akan krisis energi global dan perubahan iklim,

penggunaan energi terbarukan menjadi semakin penting. Menurut International Energy Agency (IEA), sekitar 87% dari kebutuhan energi global masih dipenuhi oleh bahan bakar fosil [6]. Penggunaan energi fosil menghasilkan emisi CO₂ yang signifikan, yang mendorong penelitian terhadap sistem tenaga yang lebih bersih, salah satunya adalah sistem tenaga hibrida.

Sistem tenaga hibrida merupakan kombinasi dari dua atau lebih sumber energi, seperti fotovoltaik (PV), turbin angin, dan generator diesel, yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi, keandalan, dan keberlanjutan pasokan listrik [7]. Penggabungan berbagai sumber energi dapat menyeimbangkan ketergantungan terhadap kondisi cuaca dan meningkatkan kontinuitas pasokan listrik.

Indonesia memiliki potensi besar dalam pengembangan energi terbarukan, terutama energi surya dan angin. Data menunjukkan bahwa radiasi matahari di Indonesia berkisar antara 4,6 hingga 7,2 kWh/m²/hari, menjadikannya salah satu negara dengan potensi tenaga surya terbesar di Asia Tenggara [8]. Selain itu, daerah tertentu di Indonesia juga memiliki potensi angin yang cukup signifikan, terutama pada musim-musim tertentu [9].

Untuk merancang dan mengoptimalkan sistem tenaga hibrida, perangkat lunak simulasi seperti HOMER Pro digunakan secara luas. HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) merupakan alat analisis berbasis simulasi yang dapat mengevaluasi kelayakan teknis dan ekonomis dari berbagai konfigurasi sistem energi [10]. Dengan mempertimbangkan variabel seperti biaya modal, biaya operasi, umur perangkat, dan data meteorologi lokal, HOMER membantu pengguna dalam memilih konfigurasi sistem energi yang paling efisien dan berkelanjutan.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi konfigurasi sistem tenaga hibrida yang paling efisien dan ekonomis untuk memenuhi kebutuhan listrik rumah tangga di daerah Cikarang, Kabupaten Bekasi, Jawa Barat, Indonesia. Untuk mencapai tujuan tersebut, digunakan perangkat lunak Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER Pro) sebagai alat simulasi dan optimasi. Pendekatan yang digunakan dalam

penelitian ini melibatkan beberapa langkah utama, termasuk pengumpulan data, pemodelan sistem, simulasi, serta analisis hasil. Berikut adalah penjelasan lebih rinci dari masing-masing tahapan metodologi:

3.1. Area Studi dan Beban Listrik Terhubung

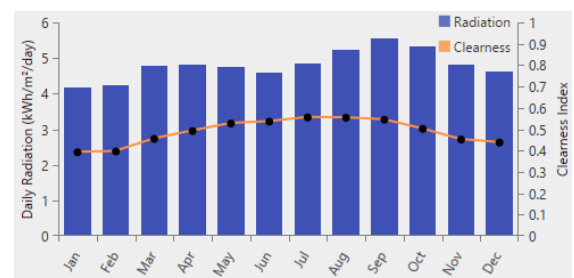
Area studi yang dipilih adalah rumah Peneliti, yang terletak di Cikarang Selatan, Kabupaten Bekasi, Jawa Barat, Indonesia (06°22'18,26"S, 107°06'01"E). Pemilihan lokasi ini didasarkan pada kebutuhan energi yang signifikan serta potensi energi terbarukan di wilayah tersebut. Untuk simulasi, beban listrik yang digunakan adalah beban yang dihubungkan ke rumah.

Beban listrik ditentukan berdasarkan perangkat yang mengonsumsi daya di rumah. Beban puncak terukur sebesar 2,4 kW, dengan rata-rata beban harian sebesar 11 kWh/hari. Beban ini berfluktuasi dengan variasi antara ±10% hingga 20% sepanjang tahun.

3.2. Data Meteorologi Area yang Diteliti

Data meteorologi yang akurat sangat penting dalam perancangan sistem tenaga hibrida, terutama yang bergantung pada sumber energi seperti matahari dan angin. Data yang dikumpulkan meliputi:

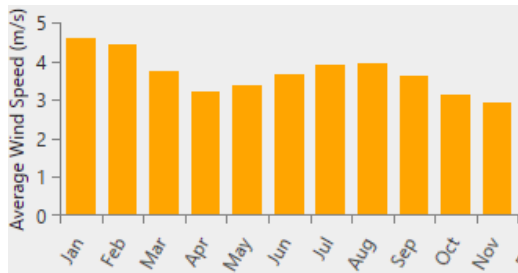
- Radiasi Matahari:** Data radiasi matahari rata-rata bulanan diperoleh dari basis data NASA Surface Meteorology and Solar Energy. Rata-rata tahunan radiasi matahari di lokasi studi diperkirakan sebesar 4,81 kWh/m² per hari [11].



Gambar 1. Data radiasi matahari di Cikarang Selatan

- Kecepatan Angin:** Kecepatan angin diukur pada ketinggian 50 meter di atas permukaan tanah. Data menunjukkan bahwa kecepatan angin di lokasi bervariasi antara 2,93 hingga 4,58 m/s,

dengan kecepatan tertinggi tercatat pada bulan Januari [11].



Gambar 2. Data kecepatan angin di Cikarang Selatan

3.3. Data Ekonomi dan Teknis Komponen

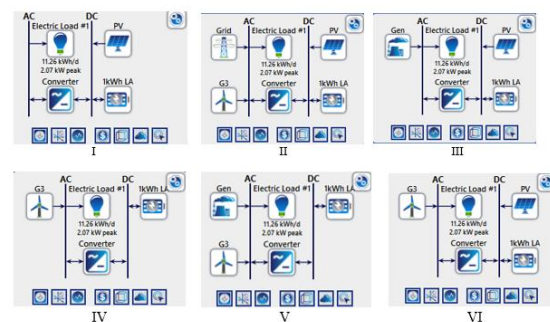
Simulasi dilakukan dengan menggunakan panel fotovoltaik, turbin angin, generator diesel, konverter, dan baterai. Sebagai sumber daya cadangan, digunakan jaringan yang dimuat dengan tarif pembelian Rp. 1.467/kWh dan tarif penjualan Rp.900/kWh [12].

Tabel 1 Data ekonomi dan teknis komponen

Input Parameter	Panel PV	Baterai	Converter	Generator Diesel	Turbin Angin
Replacment Cost (Rp.)	5.000.000	450.000	450.000	1.000.000	120.000.000
Capital Cost (Rp.)	5.000.000	450.000	450.000	1.000.000	120.000.000
Operating and Maintenance Cost (Rp.)	150.000	100.000	0	5.000	10.000.000
Lifetime (year)	25	10	15	2,5	20
Efficiency (%)			95		
Hub Height (meter)					17
Operating Temperature (Cel)	47				
Derating Factor (%)	80				
Fuel price (Rp.)				10.000	
Initial SOC (%)		100			
Minimum SOC (%)		40			
Nominal Voltage (V)		12			
Nominal Capacity (kWh)		1			
Maximum Capacity (Ah)		83,4			

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini, simulasi dilakukan untuk mengevaluasi enam konfigurasi sistem tenaga hibrida yang berbeda menggunakan perangkat lunak HOMER Pro. Tujuannya adalah untuk menemukan konfigurasi yang paling optimal dari segi biaya energi (Cost of Energy, COE), biaya bersih saat ini (Net Present Cost, NPC), serta biaya operasional untuk memenuhi kebutuhan listrik.



Gambar 3. Schematic rangkaian konfigurasi simulasi pada HOMER Pro

Hasil simulasi menunjukkan bahwa dari enam konfigurasi yang dianalisis, konfigurasi PV-Turbin Angin-Jaringan dengan penyimpanan dan konverter memiliki performa

terbaik dari segi efisiensi biaya dan dampak lingkungan. Berikut adalah rincian hasil dari setiap konfigurasi:

- PV dengan penyimpanan & konverter (Schematic I) : Sistem ini menghasilkan COE sebesar Rp.2.594 dan NPC sebesar Rp.139.000.000. Meskipun sistem ini bergantung pada energi matahari, ketergantungannya pada penyimpanan energi menyebabkan biaya yang relatif tinggi.
- PV-Turbin Angin-Jaringan (Schematic II) : Konfigurasi ini memiliki COE terendah yaitu Rp.838,04 dan NPC yang rendah sebesar Rp.211.000.000. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi antara PV, turbin angin, dan jaringan listrik menawarkan keseimbangan optimal antara produksi energi dan biaya.
- PV-Generator Diesel (Schematic III): Sistem ini memiliki COE sebesar Rp.2.295 dan NPC sebesar Rp.123.000.000. Penggunaan generator diesel sebagai sumber cadangan meningkatkan biaya operasional dan emisi.
- Turbin Angin dengan penyimpanan & konverter (Schematic IV) : Konfigurasi ini menunjukkan biaya yang sangat

tinggi, dengan COE sebesar Rp.58.896 dan NPC sebesar Rp.3.160.000.000. Ini disebabkan oleh tingginya biaya awal turbin angin dan kebutuhan penyimpanan energi yang besar.

- Generator Diesel-Turbin Angin (Schematic V) : Sistem ini memiliki COE sebesar Rp.12.936 dan NPC sebesar Rp.695.000.000. Meskipun biaya lebih tinggi dibandingkan sistem yang menggunakan PV, sistem ini lebih andal di daerah dengan pasokan sinar matahari yang tidak konsisten.
- PV-Turbin Angin (Schematic VI): Konfigurasi ini menghasilkan COE sebesar Rp.7.346 dan NPC sebesar Rp.394.000.000. Meskipun lebih efisien dibandingkan sistem yang hanya mengandalkan PV atau turbin angin, biaya bahan bakar dan pemeliharaan generator diesel tetap tinggi.

Dari hasil simulasi, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi PV-Turbin Angin-Jaringan memiliki keunggulan yang jelas dalam hal biaya dan keberlanjutan. Tabel 2 di bawah ini menunjukkan perbandingan biaya energi (COE), biaya bersih saat ini (NPC), dan Operating Cost dari setiap konfigurasi:

Tabel 2. Hasil simulasi perbandingan setiap konfigurasi

Konfigurasi	COE (Rp.)	NPC (Rp.)	Operating Cost (Rp.)
PV dengan penyimpanan & konverter	2.594	139.000.000	5.680.000
PV-Turbin Angin-Jaringan	838,04	211.000.000	2.040.000
PV-Generator Diesel	2.295	123.000.000	5.690.000
Turbin Angin dengan penyimpanan & konverter	58.896	3.160.000.000	137.000.000
Generator Diesel-Turbin Angin	12.936	695.000.000	43.100.000
PV-Turbin Angin	7.346	394.000.000	16.300.000

Berdasarkan tabel 2. di atas, sistem PV-Turbin Angin-Jaringan memiliki nilai COE dan NPC yang paling rendah, menjadikannya pilihan yang paling efisien dari segi biaya. Konfigurasi PV-Turbin Angin-Jaringan memiliki biaya operasional terendah sebesar Rp. 2.040.000 per tahun, karena tidak memerlukan biaya bahan bakar tambahan. Sebaliknya, konfigurasi berbasis generator

diesel memiliki biaya operasional yang jauh lebih tinggi karena biaya bahan bakar yang berkelanjutan dan kebutuhan perawatan yang lebih sering.

Dari hasil analisis, konfigurasi PV-Turbin Angin-Jaringan terbukti menjadi solusi yang paling layak. Sistem ini menawarkan keseimbangan optimal antara biaya rendah, keandalan, dan keberlanjutan. Selain itu,

penggunaan energi terbarukan dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan berkontribusi pada pengurangan emisi karbon dioksida.

Studi ini juga menunjukkan bahwa penggunaan perangkat lunak HOMER sebagai alat simulasi memungkinkan analisis yang lebih akurat dan komprehensif, sehingga dapat mendukung keputusan dalam perencanaan sistem energi di berbagai wilayah, terutama di daerah dengan potensi energi terbarukan yang tinggi.

Implikasi dari penelitian ini adalah bahwa sistem tenaga hibrida tidak hanya layak diterapkan di lingkungan pemukiman, tetapi juga dapat diadaptasi untuk daerah terpencil atau komunitas yang tidak terhubung ke jaringan listrik nasional. Selain itu, studi ini dapat menjadi model bagi institusi lain yang ingin mengadopsi teknologi energi terbarukan sebagai bagian dari inisiatif keberlanjutan mereka

5. KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi konfigurasi sistem tenaga hibrida yang paling optimal untuk memenuhi kebutuhan energi di daerah Cikarang, Kabupaten Bekasi, Jawa Barat, Indonesia, dengan menggunakan perangkat lunak HOMER Pro. Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

- a. Konfigurasi PV-Turbin Angin-Jaringan terbukti menjadi pilihan yang paling efisien dan ekonomis dibandingkan dengan konfigurasi lain yang dianalisis. Sistem ini memiliki biaya energi (COE) terendah sebesar Rp.2.594, biaya bersih saat ini (NPC) sebesar Rp.211.000.000, serta biaya operasional tahunan sebesar Rp.2.040.000. Hal ini menunjukkan bahwa sistem ini mampu menyediakan pasokan listrik yang andal dengan biaya yang minimal.
- b. Meskipun sistem PV-Turbin Angin-Jaringan membutuhkan investasi awal yang lebih tinggi dibandingkan dengan konfigurasi berbasis generator diesel, biaya operasional jangka panjang yang rendah dan tidak adanya biaya bahan bakar membuat sistem ini lebih

menguntungkan secara ekonomi dalam jangka panjang. Hal ini menjadikan sistem hibrida sebagai solusi yang lebih layak untuk memenuhi kebutuhan energi di wilayah yang memiliki potensi tinggi untuk energi terbarukan.

- c. Analisis menunjukkan bahwa pemanfaatan energi terbarukan, terutama dalam bentuk kombinasi PV dan turbin angin, sangat cocok untuk wilayah seperti Indonesia, yang memiliki potensi tinggi dalam hal radiasi matahari dan kecepatan angin. Hal ini dapat menjadi model bagi implementasi di wilayah lain dengan karakteristik sumber daya serupa.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan kontribusi dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. S. Logayah, B. R. Mustikasari, D. Z. Hidami, and R. P. Rahmawati, "Krisis Energi Uni Eropa: Tantangan dan Peluang dalam Menghadapi Pasokan Energi yang Terbatas," *Hasanuddin Journal of International Affairs*, vol. 3, no. 2, pp. 102–110, Aug. 2023.
- [2] T. S. Adebayo, A. A. Awosusi, S. D. Oladipupo, E. B. Agyekum, A. Jayakumar, and N. M. Kumar, "Dominasi Bahan Bakar Fosil dalam Bauran Energi Nasional Jepang dan Implikasinya terhadap Keberlanjutan Lingkungan," *J. Int. Environ. Res. Kesehatan Masyarakat*, vol. 18, no. 14, p. 7347, Jul. 2021.
- [3] A. A. Kurniawan, W. Aribowo, A. C. Hermawan, and M. Widyartono, "Perancangan dan Implementasi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Untuk Penerangan Jalan Umum," *J. Pendidik. Tek. Elektro*, vol. 12, no. 1, pp. 102–107, 2023.
- [4] K. Kananda, "Studi Awal Potensi Energi Surya Wilayah Lampung: Studi Kasus Kampus Institut Teknologi Sumatera (ITERA) Menuju Smart Campus," *J. Sci. Appl. Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 75–81, 2018.
- [5] F. Rinaldi, F. Moghaddampoor, B. Najafi, et al., "Analisis kelayakan ekonomi dan optimalisasi sistem energi terbarukan hibrida untuk elektrifikasi pedesaan di Peru," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 23, pp. 731–748, 2021.
- [6] M. Mofijur, M. Mahlia, A. Rahman, and H. Chyuan, "Renewable energy scenarios for

- major countries: Future trends and policy implications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 132, p. 110057, 2020.
- [7] S. Rehman, L. M. Al-Hadhrami, and M. M. Alam, “Pumped hydro energy storage system: A technological review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 44, pp. 586–598, Apr. 2015.
- [8] A. H. Tambunan, D. L. Purba, and R. S. Sitompul, “Evaluasi Potensi Energi Surya di Indonesia: Studi Kasus Wilayah Jakarta,” *J. Tek. Elektro*, vol. 13, no. 1, pp. 21–26, 2021.
- [9] A. Nugroho and S. Wibowo, “Analisis Potensi Energi Angin di Wilayah Pantai Selatan Pulau Jawa,” *J. Energi dan Kelistrikan*, vol. 9, no. 2, pp. 14–20, 2020.
- [10] P. Lilienthal, T. Lambert, and B. Gilman, “HOMER: The Micropower Optimization Model,” *Natl. Renew. Energy Lab. (NREL)*, Tech. Rep., 2005.
- [11] National Aeronautics and Space Administration, “NASA Surface meteorology and Solar Energy,” *NASA Langley Research Center*, Hampton, VA, USA, 2013.
- [12] Perusahaan Listrik Negara, “Tarif Tenaga Listrik,” PLN. [Online]. Available: <https://web.pln.co.id/pelanggan/tarif-tenaga-listrik>. [Accessed: May 2024].
- [13] K. M. S. Bhuiya *et al.*, “A Case Study on Hybrid Power Systems Using HOMER Pro: Design, Optimization and Comparison of Different Configurations and Proposing the Best Configuration for a University Campus,” in *Proc. Int. Conf. Mech. Ind. Mater. Eng. (ICMIME2022)*, 2022.
- [14] A. Kiswantono, “Pengembangan Sistem Energi Terbarukan: Pendekatan Multigenerator dan Simulasi ETAP,” *JITET (J. Inform. dan Tek. Elektro Terapan)*, vol. 12, no. 2, pp. 1163–1179, 2024.