

**Optimasi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terintegrasi Grid
pada Workshop Teknik Elektro Universitas Negeri Medan Berbasis
Data Beban Aktual dan Evaluasi Kinerja Ekonomi
Menggunakan HOMER Pro**

**Khata Ershada Sinuraya^{1*}, Ari Natanael Simaremare¹,
Caecilia Kristiwinita Sitanggang¹, Eka Dodi Suryanto¹, Dian Putra Saragi¹**

¹Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Medan
e-mail: khataershada.5231230013@mhs.unimed.ac.id

ABSTRACT

This study aims to optimize a grid-integrated solar power plant (PLTS) system at the Electrical Engineering Workshop at the State University of Medan (UNIMED) based on actual load data and evaluate its economic performance using HOMER Pro software. Load data was obtained through direct measurements during the building's operating hours, from 8:00 AM to 5:10 PM, with a total installed power of 183,507 kW. The modeled system includes key components: photovoltaic modules, converters, and the grid, with economic parameters adjusted to reflect real-world conditions. A simulation process was conducted to determine the optimal system configuration based on Net Present Cost (NPC) and Cost of Energy (COE). The simulation results indicate that a PLTS system with a specific capacity can reduce dependence on the electricity grid and provide long-term operational cost efficiency. Furthermore, the utilization of solar energy for daytime loads demonstrates a significant contribution of renewable energy to the building's energy needs. This research is expected to serve as a reference in designing PLTS systems at the scale of educational buildings using an approach based on actual data and software-assisted optimization.

Keywords: PLTS, HOMER Pro, energy optimization, actual load, renewable energy, economic analysis

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimasi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) terintegrasi grid pada Workshop Teknik Elektro Universitas Negeri Medan (UNIMED) berdasarkan data beban aktual serta mengevaluasi kinerja ekonominya menggunakan perangkat lunak HOMER Pro. Data beban diperoleh melalui pengukuran langsung selama jam operasional gedung, yaitu pukul 08.00 hingga 17.10, dengan total daya terpasang sebesar 183,507 kW. Sistem yang dimodelkan meliputi komponen utama berupa modul fotovoltaik, konverter, dan jaringan listrik (grid) dengan parameter ekonomi yang disesuaikan terhadap kondisi riil. Proses simulasi dilakukan untuk menentukan konfigurasi sistem optimal berdasarkan nilai Net Present Cost (NPC) dan Cost of Energy (COE). Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem PLTS dengan kapasitas tertentu mampu mengurangi ketergantungan terhadap jaringan listrik serta memberikan efisiensi biaya operasional dalam jangka panjang. Selain itu, pemanfaatan energi surya pada beban siang hari menunjukkan tingkat kontribusi energi terbarukan yang signifikan terhadap kebutuhan energi gedung. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam perancangan sistem PLTS skala gedung pendidikan dengan pendekatan berbasis data aktual dan optimasi berbantuan perangkat lunak.

Kata kunci: PLTS, HOMER Pro, optimasi energi, beban aktual, energi terbarukan, analisis ekonomi

1. PENDAHULUAN

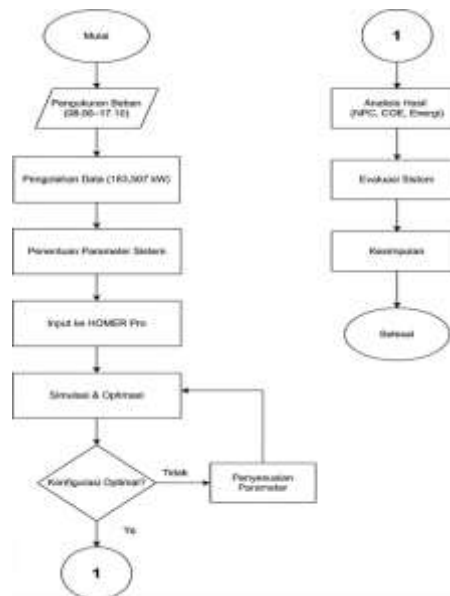
Kebutuhan energi listrik pada sektor pendidikan terus meningkat seiring dengan bertambahnya penggunaan peralatan listrik dan aktivitas operasional gedung. Di sisi lain, ketergantungan terhadap energi fosil masih menjadi permasalahan utama dalam sistem kelistrikan, baik dari segi ketersediaan maupun dampak lingkungan. Pemanfaatan energi terbarukan, khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), menjadi salah satu solusi yang efektif untuk mengurangi emisi karbon dan meningkatkan keberlanjutan sistem energi [1], [2]. Sistem PLTS memiliki keunggulan dalam implementasi pada beban siang hari, terutama pada gedung pendidikan yang memiliki profil beban dominan pada jam operasional [3].

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa integrasi PLTS dengan jaringan listrik (grid-connected system) mampu meningkatkan efisiensi energi serta menurunkan biaya operasional dalam jangka panjang. Penggunaan perangkat lunak simulasi seperti HOMER Pro telah banyak digunakan untuk melakukan optimasi kapasitas sistem serta evaluasi performa ekonomi berdasarkan parameter seperti Net Present Cost (NPC) dan Cost of Energy (COE) [4], [5]. Pendekatan ini memungkinkan perancangan sistem yang lebih optimal dengan mempertimbangkan kondisi teknis dan ekonomi secara simultan.

Namun demikian, beberapa penelitian sebelumnya masih menggunakan data beban berbasis asumsi atau data sekunder, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi operasional riil di lapangan. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan data beban aktual yang diperoleh melalui pengukuran langsung pada Workshop Teknik Elektro Universitas Negeri Medan (UNIMED). Berdasarkan hasil pengukuran, total daya beban yang digunakan selama periode operasional pukul 08.00 hingga 17.10 mencapai 183,507 kW, yang merepresentasikan karakteristik beban siang hari yang sangat potensial untuk integrasi PLTS.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan optimasi sistem PLTS terintegrasi grid berdasarkan data beban aktual serta mengevaluasi kinerja ekonomi sistem menggunakan simulasi HOMER Pro. Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah memberikan acuan dalam perancangan sistem PLTS skala gedung berbasis data riil serta mendukung implementasi energi terbarukan di lingkungan pendidikan. Ruang lingkup penelitian difokuskan pada pemodelan sistem, optimasi kapasitas komponen utama, serta analisis kinerja energi dan ekonomi tanpa membahas aspek konstruksi fisik instalasi.

2. METODE PENELITIAN



Gambar 1. Diagram Alir Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi untuk mengoptimasi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) terintegrasi grid pada Workshop Teknik Elektro Universitas Negeri Medan (UNIMED). Data yang digunakan merupakan data primer yang diperoleh melalui pengukuran langsung terhadap beban listrik gedung selama periode operasional, yaitu pukul 08.00 hingga 17.10, dengan total daya sebesar 183,507 kW. Data tersebut merepresentasikan karakteristik beban aktual yang digunakan sebagai dasar dalam pemodelan sistem.

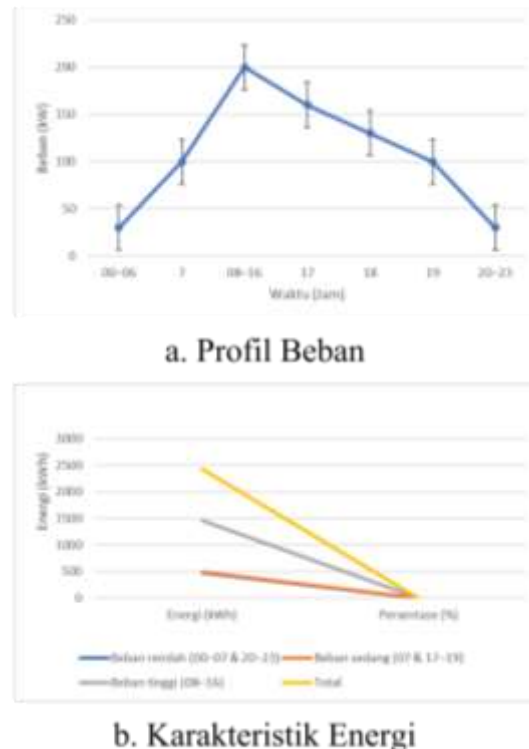
Perancangan sistem dilakukan dengan menentukan komponen utama yang meliputi modul fotovoltaik (PV), konverter, dan jaringan listrik (grid). Variasi kapasitas sistem ditentukan menggunakan metode *search space* pada perangkat lunak HOMER Pro dengan rentang kapasitas PV dan konverter antara 0 hingga 600 kW. Parameter ekonomi yang digunakan meliputi biaya investasi awal (capital cost), biaya penggantian (replacement cost), biaya operasi dan pemeliharaan (operation and maintenance), serta tarif listrik grid sebesar 1.444 Rp/kWh.

Proses analisis dilakukan dengan memasukkan seluruh parameter sistem ke dalam HOMER Pro untuk dilakukan simulasi dan optimasi. Perangkat lunak ini secara otomatis mengevaluasi berbagai konfigurasi sistem berdasarkan kriteria ekonomi dan teknis, kemudian menentukan konfigurasi optimal dengan mempertimbangkan nilai Net Present Cost (NPC) dan Cost of Energy (COE). Selain itu, parameter lain seperti produksi energi, kontribusi energi terbarukan (*renewable fraction*), serta ketergantungan terhadap grid juga dianalisis untuk mengevaluasi kinerja sistem secara menyeluruh.

Hasil simulasi selanjutnya dianalisis untuk mengidentifikasi konfigurasi sistem terbaik yang mampu memenuhi kebutuhan beban dengan biaya yang optimal. Dengan pendekatan ini, penelitian tidak hanya berfokus pada aspek teknis perancangan sistem, tetapi juga mempertimbangkan kinerja ekonomi berdasarkan kondisi operasional aktual.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Profil Beban dan Karakteristik Energi



Gambar 2. Grafik Profil Beban dan Karakteristik Energi

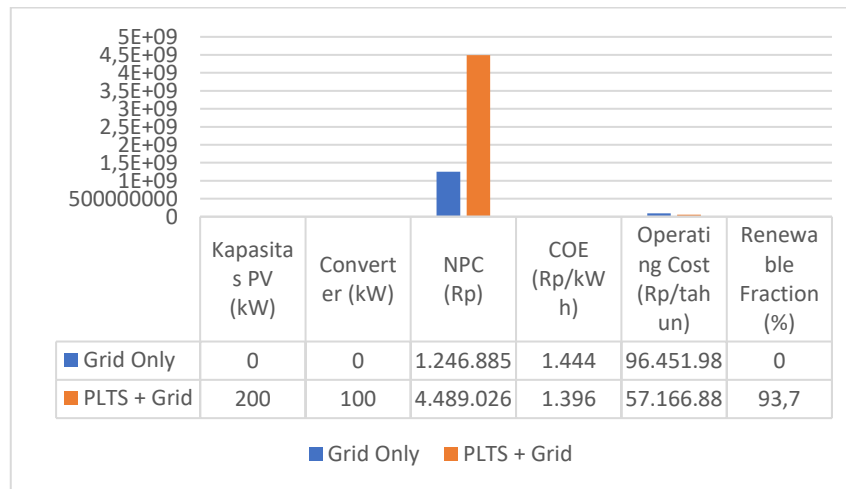
Profil beban listrik pada Workshop Teknik Elektro Universitas Negeri Medan diperoleh dari hasil pengukuran aktual yang selanjutnya dimodelkan menggunakan HOMER Pro. Berdasarkan hasil analisis, pola beban menunjukkan karakteristik yang sangat terpusat pada periode siang hari, dengan peningkatan signifikan mulai pukul 07.00 dan mencapai puncak pada rentang waktu 08.00–16.00 dengan nilai beban maksimum sekitar 200 kW. Setelah periode tersebut, beban mengalami penurunan bertahap hingga kembali ke kondisi minimum sebesar 30 kW pada malam hari.

Secara kuantitatif, distribusi energi harian menunjukkan dominasi konsumsi pada periode beban tinggi (08.00–16.00) yang mencapai sekitar 60% dari total energi harian, sementara beban sedang (07.00 dan 17.00–19.00) berkontribusi sekitar 20%, dan beban rendah (00.00–07.00 serta 20.00–23.00) sebesar 20%. Pola ini menegaskan bahwa konsumsi energi terkonsentrasi pada jam operasional utama, yang secara langsung selaras dengan profil produksi energi surya.

Nilai rata-rata daya sistem berada pada kisaran 100 kW dengan konsumsi energi harian sebesar ± 2.400 kWh, serta *load factor* sebesar 0,29 yang mengindikasikan adanya ketidakseimbangan distribusi beban sepanjang waktu. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem memiliki potensi optimal untuk integrasi PLTS, karena kesesuaian temporal antara puncak beban dan puncak produksi energi surya dapat meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan secara langsung (*self-consumption*).

Dengan karakteristik tersebut, sistem kelistrikan gedung dapat dikategorikan sebagai beban siang (*daytime-dominant load*), yang merupakan kondisi ideal dalam perancangan sistem PLTS terintegrasi grid. Hal ini memungkinkan pengurangan ketergantungan terhadap energi dari jaringan sekaligus meningkatkan efisiensi operasional sistem secara keseluruhan.

3.2 Hasil Optimasi Sistem



Gambar 3. Hasil Optimasi Sistem

Hasil optimasi sistem yang dilakukan menggunakan HOMER Pro menghasilkan dua konfigurasi utama, yaitu sistem berbasis jaringan listrik konvensional (*grid-only*) dan sistem hibrida PLTS terintegrasi grid. Perbandingan performa kedua sistem tersebut menunjukkan perbedaan yang signifikan baik dari aspek teknis maupun ekonomi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar dan Tabel analisis.

Pada sistem *grid-only*, diperoleh nilai Net Present Cost (NPC) sebesar Rp1.246.885.000 dengan Cost of Energy (COE) sebesar Rp1.444/kWh serta biaya operasional tahunan sebesar Rp96.451.980. Sementara itu, pada konfigurasi sistem PLTS terintegrasi grid dengan kapasitas PV sebesar 200 kW dan konverter 100 kW, nilai NPC meningkat menjadi Rp4.489.026.000, namun diikuti dengan penurunan COE menjadi Rp1.396/kWh serta biaya operasional tahunan yang lebih rendah, yaitu Rp57.166.880.

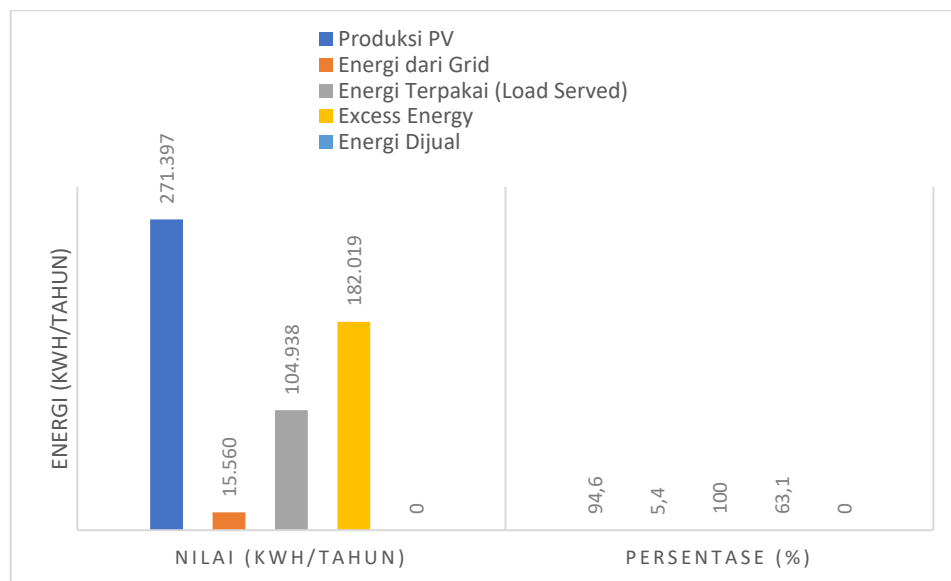
Fenomena ini menunjukkan adanya pergeseran struktur biaya (*cost shifting*), dimana sistem PLTS memerlukan investasi awal yang lebih besar, tetapi mampu menekan biaya operasional dan biaya energi dalam jangka panjang. Kondisi ini sejalan dengan berbagai penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa sistem energi terbarukan, khususnya PLTS, memiliki karakteristik biaya awal yang tinggi namun menawarkan keuntungan ekonomi pada fase operasional akibat minimnya biaya bahan bakar dan perawatan [6], [7], [8].

Selain itu, sistem PLTS menghasilkan *renewable fraction* sebesar 93,7%, yang menunjukkan dominasi kontribusi energi terbarukan dalam pemenuhan kebutuhan energi gedung. Tingginya penetrasi energi terbarukan ini tidak hanya berdampak pada pengurangan biaya operasional, tetapi juga berkontribusi terhadap peningkatan keberlanjutan sistem energi secara keseluruhan [9], [10].

Dari sisi teknis, kapasitas PLTS sebesar 200 kW terbukti mampu mengakomodasi sebagian besar kebutuhan beban pada periode siang hari yang memiliki puncak beban sekitar 200 kW. Hal ini menunjukkan adanya kesesuaian yang baik antara kapasitas pembangkitan dan profil beban (*load matching*), sehingga meningkatkan tingkat pemanfaatan energi surya secara langsung tanpa ketergantungan berlebih terhadap jaringan listrik [11].

Secara keseluruhan, hasil optimasi menunjukkan bahwa sistem PLTS terintegrasi grid memberikan keunggulan dalam hal efisiensi biaya operasional dan pemanfaatan energi terbarukan, meskipun memerlukan investasi awal yang lebih tinggi. Oleh karena itu, implementasi sistem ini perlu mempertimbangkan keseimbangan antara biaya investasi dan manfaat jangka panjang yang diperoleh, terutama dalam konteks bangunan dengan karakteristik beban siang hari [12].

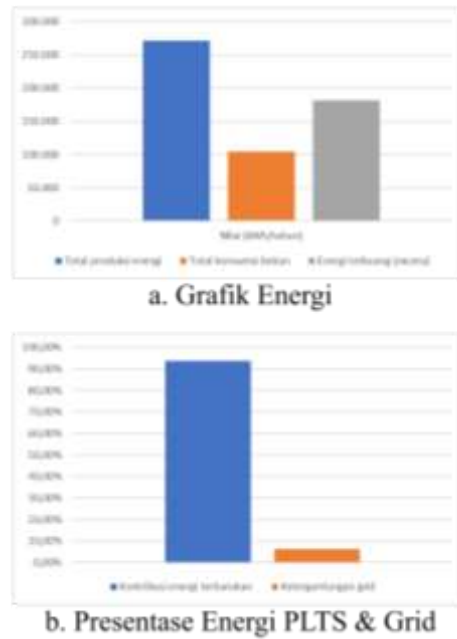
3.3 Analisis Produksi Energi



Gambar 4. Perbandingan Produksi dan Distribusi Energi Sistem PLTS

Gambar 4 menunjukkan perbandingan antara total produksi energi, konsumsi beban, dan energi berlebih (*excess energy*) pada sistem PLTS yang dihasilkan dari simulasi HOMER Pro. Total produksi energi dari sistem PLTS tercatat sebesar 271.397 kWh/tahun, sedangkan energi yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban hanya sebesar 104.938 kWh/tahun. Sementara itu, energi yang tidak dimanfaatkan mencapai 182.019 kWh/tahun.

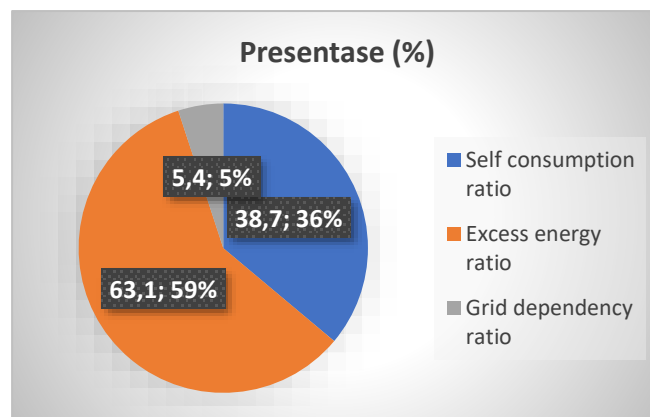
Perbedaan yang signifikan antara energi yang diproduksi dan energi yang digunakan menunjukkan bahwa sistem mengalami kondisi *overproduction*, dimana kapasitas pembangkitan lebih besar dibandingkan kebutuhan beban. Fenomena ini umum terjadi pada sistem PLTS tanpa dukungan penyimpanan energi atau skema ekspor energi ke jaringan, sehingga energi berlebih tidak dapat dimanfaatkan secara optimal [13], [14]. Kondisi ini mengindikasikan bahwa optimasi kapasitas sistem atau integrasi teknologi tambahan seperti baterai diperlukan untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi.



Gambar 5. Kontribusi Energi Terbarukan dan Ketergantungan terhadap Grid

Gambar 5 memperlihatkan kontribusi energi terbarukan terhadap sistem serta tingkat ketergantungan terhadap jaringan listrik. Berdasarkan hasil simulasi, kontribusi energi terbarukan mencapai 93,7%, sedangkan ketergantungan terhadap grid hanya sebesar 5,4%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem PLTS mampu memenuhi sebagian besar kebutuhan energi secara mandiri.

Tingginya penetrasi energi terbarukan dalam sistem menunjukkan kinerja yang sangat baik dari sisi keberlanjutan energi. Menurut beberapa penelitian, sistem dengan *renewable fraction* yang tinggi mampu mengurangi emisi karbon serta meningkatkan efisiensi sistem energi secara keseluruhan [15], [16]. Namun demikian, meskipun ketergantungan terhadap grid rendah, keberadaan grid tetap diperlukan sebagai sumber cadangan untuk menjaga keandalan sistem.



Gambar 6. Distribusi Pemanfaatan Energi Sistem PLTS

Gambar 6 menunjukkan distribusi pemanfaatan energi yang dihasilkan oleh sistem PLTS, yang terdiri dari *self-consumption ratio*, *excess energy ratio*, dan *grid dependency ratio*. Hasil analisis menunjukkan bahwa hanya sekitar 38,7% energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara

langsung oleh beban, sedangkan sebesar 63,1% energi terbuang sebagai *excess energy*, dan 5,4% energi masih dipenuhi dari jaringan listrik.

Rendahnya nilai *self-consumption* menunjukkan bahwa sistem belum optimal dalam memanfaatkan energi yang dihasilkan. Hal ini disebabkan oleh ketidaksesuaian antara waktu produksi energi dan kebutuhan beban serta tidak adanya sistem penyimpanan energi. Menurut literatur, peningkatan nilai *self-consumption* dapat dilakukan melalui integrasi sistem penyimpanan energi atau penerapan strategi manajemen beban (*load management*) [17], [18]. Dengan demikian, meskipun sistem memiliki potensi produksi energi yang tinggi, efisiensi pemanfaatannya masih dapat ditingkatkan melalui pendekatan teknis yang lebih optimal.

3.4 Analisis Ekonomi Sistem



Gambar 7. Perbandingan dan Selisih Parameter Ekonomi

Analisis ekonomi sistem dilakukan dengan mengevaluasi parameter utama yang meliputi Net Present Cost (NPC), Cost of Energy (COE), biaya operasional (*operating cost*), serta biaya investasi awal (*capital cost*) berdasarkan hasil simulasi menggunakan HOMER Pro. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7, sistem *grid-only* memiliki *capital cost* nol dengan biaya operasional tahunan sebesar Rp96.451.980 dan NPC sebesar Rp1.246.885.000. Sebaliknya, sistem PLTS terintegrasi grid memerlukan investasi awal sebesar Rp3.750.000.000, namun mampu menurunkan biaya operasional menjadi Rp57.166.880 per tahun, meskipun menghasilkan nilai NPC yang lebih tinggi yaitu Rp4.489.026.000.

Secara matematis, nilai biaya energi (*Cost of Energy*) dinyatakan sebagai:

$$COE = \frac{NPC}{E_{total}}$$

dimana NPC merupakan total biaya sistem selama umur proyek dan E_{total} adalah total energi yang dilayani sistem. Berdasarkan hasil perhitungan, sistem PLTS menghasilkan nilai COE sebesar Rp1.396/kWh, lebih rendah dibandingkan sistem *grid-only* sebesar Rp1.444/kWh. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun investasi awal sistem PLTS lebih besar, biaya energi per satuan kWh yang dihasilkan lebih efisien dalam jangka panjang.

Gambar 7 juga memperlihatkan bahwa selisih NPC antara kedua sistem mencapai Rp3.242.141.000, sedangkan penghematan biaya operasional tahunan sebesar Rp39.285.100. Dengan menggunakan pendekatan *simple payback period*, periode pengembalian investasi dapat dihitung sebagai:

$$PP = \frac{3.242.141.000}{39.285.100} = 82,5 \text{ tahun}$$

Nilai ini menunjukkan bahwa secara ekonomi konvensional, sistem PLTS belum mencapai titik impas dalam umur proyek yang direncanakan. Namun demikian, hasil ini mengindikasikan adanya fenomena *cost shifting*, dimana biaya sistem berpindah dari komponen operasional menuju investasi awal. Kondisi ini sejalan dengan karakteristik umum sistem energi terbarukan yang memiliki biaya bahan bakar rendah namun memerlukan investasi awal yang signifikan [19]–[21].

Lebih lanjut, meskipun nilai *payback period* relatif panjang, sistem PLTS tetap memberikan manfaat strategis dalam bentuk penurunan biaya operasional, stabilitas harga energi, serta peningkatan kontribusi energi terbarukan. Oleh karena itu, kelayakan sistem PLTS tidak hanya dinilai dari aspek ekonomi jangka pendek, tetapi juga dari perspektif keberlanjutan energi dan efisiensi sistem dalam jangka panjang.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa optimasi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) terintegrasi grid pada Workshop Teknik Elektro Universitas Negeri Medan berbasis data beban aktual menunjukkan potensi yang signifikan dalam meningkatkan efisiensi energi dan pemanfaatan energi terbarukan. Profil beban yang dominan pada siang hari (daytime-dominant load) dengan puncak sekitar 200 kW memiliki kesesuaian yang tinggi dengan karakteristik produksi energi surya, sehingga memungkinkan terjadinya *load matching* yang optimal. Hasil optimasi menggunakan HOMER Pro menunjukkan bahwa konfigurasi sistem terbaik diperoleh pada kapasitas PLTS sebesar 200 kW dengan kontribusi energi terbarukan mencapai 93,7% dan ketergantungan terhadap grid yang rendah.

Dari sisi produksi energi, sistem menghasilkan total energi sebesar 271.397 kWh/tahun, namun hanya sekitar 38,7% yang dapat dimanfaatkan secara langsung, sementara 63,1% lainnya menjadi energi berlebih (*excess energy*), yang mengindikasikan perlunya peningkatan strategi pemanfaatan energi seperti integrasi sistem penyimpanan atau manajemen beban. Secara ekonomi, sistem PLTS menunjukkan penurunan biaya operasional tahunan sebesar Rp39.285.100 dan nilai COE yang lebih rendah dibandingkan sistem konvensional, meskipun memiliki nilai Net Present Cost (NPC) yang lebih tinggi. Perhitungan periode pengembalian investasi menunjukkan nilai sebesar 82,5 tahun, yang mengindikasikan bahwa sistem belum layak secara ekonomi dalam jangka pendek. Namun demikian, implementasi PLTS tetap memberikan keuntungan strategis dalam jangka panjang, khususnya dalam hal efisiensi operasional, stabilitas biaya energi, serta peningkatan keberlanjutan sistem energi. Oleh karena itu, pengembangan sistem PLTS di masa mendatang perlu mempertimbangkan optimasi kapasitas, integrasi teknologi penyimpanan energi, serta kebijakan ekspor energi untuk meningkatkan kelayakan ekonomi sistem secara keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Brown, R., Shukla, A. and Natarajan, K.R., 2002, *Fiber Reinforcement of Concrete Structures*, diakses 10 Maret 2026, <http://www.uritc.uri.edu/media/finalreportspdf/536101.pdf>
- [2] Denholm, P., Ela, E., Kirby, B. and Milligan, M., 2010, The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation, *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, Colorado.
- [3] Hutaeruk, T.S., 1991, *Gelombang Berjalan dan Proteksi Surja*, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- [4] International Energy Agency (IEA), 2022, *Renewables 2022: Analysis and Forecast to 2027*, diakses 10 Maret 2026, <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>
- [5] International Energy Agency (IEA), 2022, *Solar PV Analysis Report*, diakses 10 Maret 2026, <https://www.iea.org>
- [6] International Renewable Energy Agency (IRENA), 2020, *Energy Storage and Renewable Integration*, diakses 10 Maret 2026, <https://www.irena.org>
- [7] International Renewable Energy Agency (IRENA), 2022, *Renewable Energy Economics Report*, diakses 10 Maret 2026, <https://www.irena.org>
- [8] International Renewable Energy Agency (IRENA), 2023, *Renewable Power Generation Costs in 2022*, diakses 10 Maret 2026, <https://www.irena.org/publications>
- [9] Islam, M.S., Rahim, N.A. and Solangi, K.H., 2011, Energy efficiency of building integrated photovoltaic system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 424–431.
- [10] Jacobson, M.Z., Delucchi, M.A., Cameron, M.A. and Frew, B.A., 2015, Low-cost solution to the grid reliability problem with 100% penetration of intermittent wind, water, and solar for all purposes, *Energy & Environmental Science*, vol. 8, pp. 2093–2117.
- [11] Lambert, T., Gilman, P. and Lilienthal, P., 2006, *Micropower System Modeling with HOMER*, Wiley-IEEE Press, New York.
- [12] Lazard, 2023, *Levelized Cost of Energy Analysis*, diakses 10 Maret 2026, <https://www.lazard.com>
- [13] Lilienthal, P., 2018, HOMER Pro Software for Hybrid System Optimization, *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, Colorado.
- [14] National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2022, *Cost of Renewable Energy Technologies*, diakses 10 Maret 2026, <https://www.nrel.gov>

- [15] National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2022, *Cost of Solar Energy Systems*, diakses 10 Maret 2026, <https://www.nrel.gov>
- [16] Rehman, S., Al-Hadhrami, L.M. and Alam, M.M., 2015, Pumped hydro energy storage system: A technological review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 586–598.
- [17] REN21, 2023, *Renewables Global Status Report*, diakses 10 Maret 2026, <https://www.ren21.net>
- [18] Sharma, A., Kolhe, M. and Sharma, A., 2019, Performance analysis of solar PV systems, *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 131–145.
- [19] Shell Structures, 2006, *Basic Concepts*, diakses 10 Maret 2026, <http://www.colorado.edu/engineering>
- [20] Wigroho, H.Y., 2001, *Analisis dan Perancangan Struktur Frame Menggunakan SAP 2000 Versi 7.42*, Penerbit Andi, Yogyakarta.
- [21] Zakeri, B. and Syri, S., 2015, Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 569–596.