

Simulasi PLTS *Off-Grid* Rumah Tangga di Karawang Menggunakan *Homer Pro*

Fitria Nurul Husna^{1*}, Dian Budhi Santoso²

^{1,2} Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Singaperbangsa Karawang
Jln. HS. Ronggowaluyo Telukjambe Timur Karawang 41363 INDONESIA

Email: ¹2110631160010@student.unsika.ac.id, ²dian.budhi@ft.unsika.ac.id

*Penulis Korespondensi

Abstract— The demand for electricity in Indonesia continues to grow, particularly in rural areas that still face limited access to the national power grid. One promising solution is the implementation of household-scale off-grid Solar Power Plants (PLTS). This study aims to design and analyze an off-grid PLTS system in Karawang Regency using the *Homer Pro* software, based on technical and economic parameters. Simulations were conducted to determine the optimal system configuration to meet household electricity needs of 4.27 kWh per day or 1,562.82 kWh per year. The results show that a PLTS system with a solar panel capacity of 8.2 kW is capable of generating 12,570 kWh annually, with a Levelized Cost of Energy (LCOE) of Rp 1.83/kWh, which is more economical compared to conventional electricity rates. The system is equipped with a lead-acid battery with a capacity of 8.01 kWh, an energy storage efficiency of 80.2%, and a lifespan of approximately 7.5 years. With an excess electricity production of 85.4%, this off-grid PLTS system has proven to be technically and economically feasible for implementation in households in areas that are not fully served by the national grid.

Intisari— Permintaan energi listrik di Indonesia terus meningkat, terutama di wilayah pedesaan yang masih menghadapi keterbatasan akses terhadap jaringan listrik nasional. Salah satu solusi yang menjanjikan adalah penerapan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid* skala rumah tangga. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menganalisis sistem PLTS *off-grid* di Kabupaten Karawang dengan menggunakan perangkat lunak *Homer Pro*, berdasarkan parameter teknis dan ekonomi. Simulasi dilakukan untuk menentukan konfigurasi sistem yang optimal dalam memenuhi kebutuhan listrik rumah tangga sebesar 4,27 kWh per hari atau 1.562,82 kWh per tahun. Hasil menunjukkan bahwa sistem PLTS dengan kapasitas panel surya 8,2 kW mampu menghasilkan 12.570 kWh per tahun, dengan LCOE sebesar Rp 1,83/kWh, yang lebih ekonomis dibandingkan tarif listrik konvensional. Sistem ini dilengkapi dengan baterai lead-acid berkapasitas 8,01 kWh, dengan efisiensi penyimpanan energi mencapai 80,2% dan masa pakai sekitar 7,5 tahun. Dengan kelebihan produksi listrik sebesar 85,4%, sistem PLTS *off-grid* ini terbukti layak secara teknis dan ekonomis untuk diimplementasikan pada rumah tangga di daerah yang belum sepenuhnya terlayani oleh jaringan listrik.

Kata Kunci— PLTS, *Off-grid*, *Homer pro*, Panel Surya

I. PENDAHULUAN

Permintaan energi listrik di Indonesia terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi dan perkembangan ekonomi. Namun, masih terdapat beberapa wilayah yang belum mendapatkan pasokan listrik secara optimal, terutama di daerah pedesaan dan terpencil. Salah satu solusi untuk

mengatasi keterbatasan pasokan listrik adalah penggunaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid*, yang memungkinkan rumah tangga memperoleh listrik secara mandiri tanpa bergantung pada jaringan listrik PLN [1], [2]. Karawang merupakan salah satu daerah yang memiliki potensi energi surya yang cukup besar karena tingkat radiasi matahari yang tinggi sepanjang tahun [3], [4].

Penelitian ini bertujuan untuk mendokumentasikan sistem PLTS *off-grid* skala rumah tangga di Karawang menggunakan perangkat lunak *Homer Pro* serta menganalisis kinerjanya berdasarkan parameter teknis dan ekonomi. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan konfigurasi sistem PLTS yang optimal agar dapat memenuhi kebutuhan energi rumah tangga dengan efisiensi yang tinggi dan biaya yang terjangkau. Ruang lingkup penelitian ini mencakup analisis potensi energi surya di Karawang berdasarkan data radiasi matahari serta kebutuhan listrik rumah tangga sebagai dasar perancangan sistem PLTS. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak *Homer Pro* untuk menerangi aspek teknis dan ekonomi dari sistem PLTS *off-grid* yang dirancang. Oleh karena itu, perlu dilakukan simulasi sistem PLTS *off-grid* untuk menyediakan kelayakan teknis dan ekonominya bagi rumah tangga di Karawang.

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa sistem PLTS *off-grid* dapat menjadi solusi efektif untuk daerah dengan akses listrik terbatas [5], [6]. Studi yang dilakukan penelitian sebelumnya membahas desain PLTS *off-grid* dengan berbagai konfigurasi panel surya dan baterai untuk mencapai efisiensi optimal [7], [8], [9]. Penelitian lain juga menyoroti aspek ekonomi dari implementasi PLTS *off-grid* dan membandingkannya dengan sumber energi konvensional [10], [11]. Kajian ini menjadi dasar dalam menentukan parameter teknis dan ekonomi yang digunakan dalam penelitian ini.

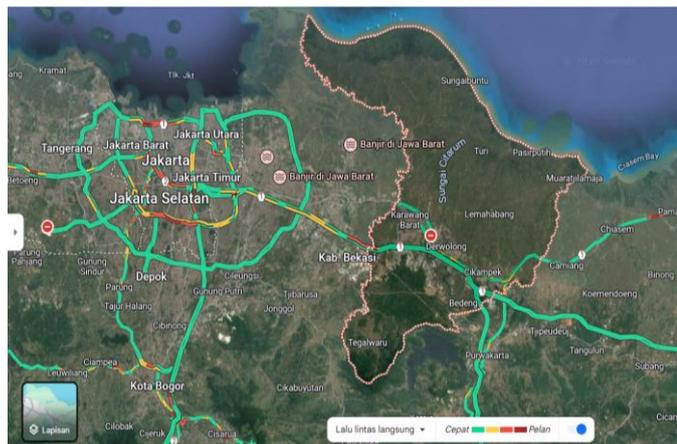
II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode simulasi dan analisis teknis-ekonomi untuk merancang sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid* skala rumah tangga di Karawang. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak *Homer Pro*, yang mampu menyiarkan berbagai skenario sistem energi terbarukan berdasarkan parameter teknis dan ekonomi.

A. Sasaran dan Mitra Penelitian

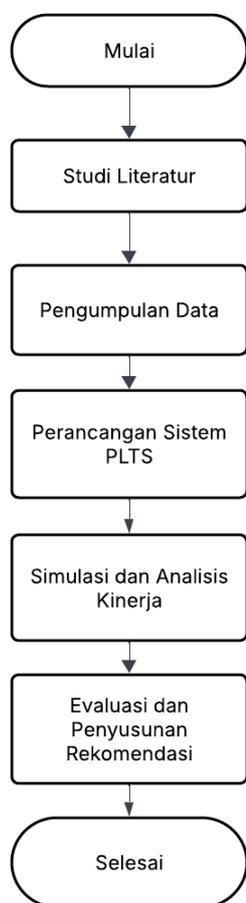
Lokasi penelitian ini bertempat di Kabupaten Karawang, Provinsi Jawa Barat, bisa terlihat pada Gambar. 1. Penelitian ini difokuskan pada rumah tangga listrik di Karawang yang

memiliki keterbatasan akses atau tertarik untuk beralih ke energi terbarukan. Mitra kegiatan adalah komunitas atau kelompok masyarakat setempat yang berpotensi menerapkan sistem PLTS *off-grid* dalam kehidupan sehari-hari.



Gambar. 1 Lokasi Penelitian di Kabupaten Karawang.

B. Tahapan Penelitian



Gambar. 2 Diagram alir penelitian.

Pelaksanaan kegiatan meliputi beberapa tahapan utama, yaitu:

- 1) Pengumpulan Data – Data radiasi matahari diperoleh dari data dasar NASA atau BMKG, sementara

kebutuhan beban listrik rumah tangga diperoleh melalui survei konsumsi energi di beberapa rumah tangga di Karawang.

- 2) Perancangan Sistem PLTS – Berdasarkan data yang diperoleh, dilakukan perancangan sistem PLTS yang mencakup panel surya, inverter, baterai, dan pengontrol muatan. Konfigurasi sistem ini kemudian dimasukkan ke dalam perangkat lunak *Homer Pro*.
- 3) Simulasi dan Analisis Kinerja – Sistem PLTS diuji melalui simulasi pada *Homer Pro* untuk memancarkan kinerja teknis dan ekonominya. Parameter utama yang dijelaskan meliputi efisiensi energi, daya tahan baterai, biaya investasi, serta biaya operasi dan pemeliharaan.
- 4) Evaluasi dan Penyusunan Rekomendasi – Hasil simulasi dianalisis untuk menentukan konfigurasi sistem PLTS yang optimal dengan mempertimbangkan aspek kemiskinan dan efisiensi biaya bagi rumah tangga di Karawang.

C. Bahan dan Alat

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

- 1) *Panel Surya*: Panel surya adalah kumpulan sel surya yang ditata sedemikian rupa agar efektif dalam menyerap sinar matahari [12]. Panel surya mengubah intensitas sinar matahari menjadi energi listrik melalui proses photovoltaic, dengan menggunakan komponen semi konduktor [13].
- 2) *Inverter*: Solar Inverter berperan untuk mengubah energi listrik DC, yang intermittent dari PLTS, menjadi AC untuk suplai ke arah beban [13], [14].
- 3) *Baterai*: Baterai yang paling sering digunakan dalam sistem PLTS *off-grid* adalah baterai *lead-acid*.
- 4) *Homer Pro*: Perangkat lunak HOMER adalah suatu perangkat lunak yang digunakan untuk optimasi model sistem pembangkit listrik skala kecil (*micropower*). Perangkat lunak ini mempermudah evaluasi desain sistem pembangkit listrik untuk berbagai jenis pembangkit listrik skala kecil baik yang tersambung ke jaringan listrik atau pun tidak [15], [16], [17].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan data yang diperoleh, konsumsi energi listrik rumah tangga di Karawang dengan berbagai peralatan elektronik mencapai 4,27 kWh per hari atau sekitar 1.562,82 kWh per tahun . Konsumsi energi terbesar berasal dari kulkas satu pintu yang membutuhkan 1.560 Wh per hari , diikuti oleh alat pemanas seperti penanak nasi dan setrika dengan masing-masing 700 Wh per hari . Rincian konsumsi energi harian dapat dilihat pada Tabel I.

Tabel 1. Daya beban

No	Beban	Daya (Watt)	Durasi (Jam)	Jumlah (Unit)	Total Daya (Watt)
1	Lampu LED	12	10	5	600
2	TV LED 24"	30	2	1	60
3	Kulkas	65	24	1	1560

No	Beban	Daya (Watt)	Durasi (Jam)	Jumlah (Unit)	Total Daya (Watt)
	(Tipe 1 pintu)				
4	Mesin Cuci (Tipe 2 tabung)	250	2	1	500
5	Kipas Angin 16"	50	3	1	150
6	Penanak Nasi	350	2	1	700
7	Setrika	350	2	1	700
Total Konsumsi Energi Per Hari (Wh/d)					4270
Total Konsumsi Energi Per Hari (kWh/d)					4.27
Total Konsumsi Energi Per Tahun (Wh/y)					1562820
Total Konsumsi Energi Per Tahun (kWh/y)					1562.82

Berdasarkan data yang diperoleh, konsumsi energi listrik rumah tangga di Karawang mencapai 4,27 kWh per hari atau sekitar 1.562,82 kWh per tahun. Dari total konsumsi tersebut, perangkat elektronik dengan kebutuhan energi terbesar adalah kulkas satu pintu, yang menggunakan 1.560 Wh per hari, atau sekitar 36,5% dari total konsumsi harian. Hal ini wajar karena kulkas bekerja sepanjang hari untuk menjaga suhu stabil di dalamnya. Selain itu, perangkat pemanas seperti penanak nasi dan setrika juga memiliki konsumsi energi yang cukup tinggi, masing-masing mencapai 700 Wh per hari. Konsumsi daya tinggi ini disebabkan oleh mekanisme pemanas yang membutuhkan energi dalam jumlah besar untuk mencapai suhu yang diinginkan dalam waktu singkat.

Selain itu, beberapa perangkat lain seperti mesin cuci (500 Wh per hari), kipas angin (150 Wh per hari), TV LED (60 Wh per hari), dan lampu LED (600 Wh per hari dari 5 unit yang beroperasi selama 10 jam) turut menyumbang konsumsi energi total rumah tangga. Meskipun daya per unitnya kecil, durasi penggunaan yang panjang dapat meningkatkan total konsumsi energi secara signifikan. Misalnya, lampu LED yang memiliki daya rendah tetap memberikan kontribusi yang cukup besar karena beroperasi lebih lama dibanding perangkat lain.

Dari analisis ini, dapat disimpulkan bahwa konsumsi energi rumah tangga di Karawang sangat dipengaruhi oleh peralatan yang bekerja terus-menerus (seperti kulkas) dan peralatan dengan daya besar meskipun digunakan dalam waktu singkat (seperti setrika dan penanak nasi). Oleh karena itu, strategi penghematan energi dapat difokuskan pada optimalisasi penggunaan peralatan pemanas dan pengaturan durasi pemakaian alat elektronik untuk mengurangi konsumsi listrik tanpa mengorbankan kenyamanan. Selain itu, penggunaan peralatan dengan teknologi hemat energi seperti kulkas inverter atau lampu LED dengan efisiensi lebih tinggi dapat membantu menekan konsumsi listrik rumah tangga secara signifikan.

Gambar. 3 tersebut menampilkan data *Solar Global Horizontal Irradiance* (GHI) bulanan yang diperoleh dari database NASA POWER. Data ini digunakan untuk menganalisis potensi energi surya di suatu lokasi berdasarkan pengukuran selama 22 tahun (1983–2005). GHI menunjukkan jumlah radiasi matahari yang diterima oleh permukaan horizontal, dinyatakan dalam kWh/m²/day, sedangkan

Cleanness Index mengindikasikan kejernihan atmosfer, di mana nilai yang lebih tinggi menunjukkan kondisi langit yang lebih cerah dengan lebih sedikit hambatan awan.



Gambar. 3 Diagram data *Solar Global Horizontal Irradiance* (GHI) bulanan

Tabel di sebelah kiri menampilkan rata-rata harian radiasi matahari dan indeks kejernihan atmosfer untuk setiap bulan. Nilai radiasi matahari bervariasi antara 4.20 hingga 5.56 kWh/m²/day, dengan puncak tertinggi pada bulan September. Grafik di sebelah kanan menunjukkan hubungan antara radiasi matahari (batang biru) dan *cleanness index* (garis oranye). Dari grafik ini, terlihat bahwa radiasi matahari cenderung lebih tinggi antara bulan Mei hingga Oktober, yang juga berkorelasi dengan nilai *cleanness index* yang lebih tinggi pada periode tersebut.

Rata-rata tahunan GHI sebesar 4.81 kWh/m²/day menunjukkan bahwa lokasi ini memiliki potensi energi surya yang cukup baik. Informasi ini sangat berguna dalam perancangan sistem PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya), baik untuk sistem *off-grid* maupun *grid-tied*, dengan estimasi produksi energi yang lebih optimal pada bulan-bulan dengan radiasi tinggi.



Gambar. 4 Diagram menunjukkan data sumber daya suhu (*Temperature Resource*)

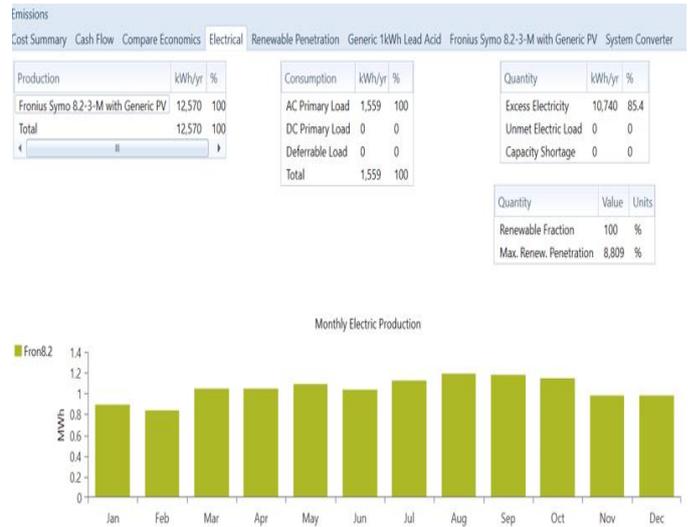
Gambar. 4 menunjukkan data sumber daya suhu (*Temperature Resource*) yang diperoleh dari database NASA POWER, yang mencakup rata-rata suhu udara bulanan selama 30 tahun (1984–2013). Data ini menunjukkan bahwa suhu udara harian berkisar antara 25,1°C hingga 26,92°C, dengan rata-rata tahunan 26,08°C. Grafik batang oranye memperlihatkan tren perubahan suhu bulanan, di mana suhu tertinggi terjadi pada bulan Oktober (26,92°C) dan suhu lebih stabil sepanjang tahun tanpa fluktuasi besar. Informasi ini penting dalam perancangan sistem PLTS karena suhu udara memengaruhi efisiensi panel surya, di mana suhu tinggi dapat menurunkan efisiensi konversi energi.

Dengan adanya kelebihan produksi listrik yang cukup besar, sistem ini berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan sistem penyimpanan energi (baterai) agar energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan lebih efisien, terutama pada malam hari atau saat cuaca mendung. Alternatif lain adalah mengintegrasikan sistem ini dengan jaringan listrik menggunakan skema net metering, sehingga kelebihan daya bisa dijual ke jaringan dan mengurangi biaya investasi dalam jangka panjang.

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa PLTS *off-grid* ini sangat layak untuk diterapkan di wilayah dengan tingkat konsumsi listrik rumah tangga yang rendah hingga menengah. Namun, untuk meningkatkan efisiensi ekonomi, diperlukan analisis lebih lanjut mengenai optimasi kapasitas sistem, strategi penyimpanan energi, serta kemungkinan pemanfaatan daya berlebih untuk keperluan lain seperti pompa air atau kendaraan listrik.

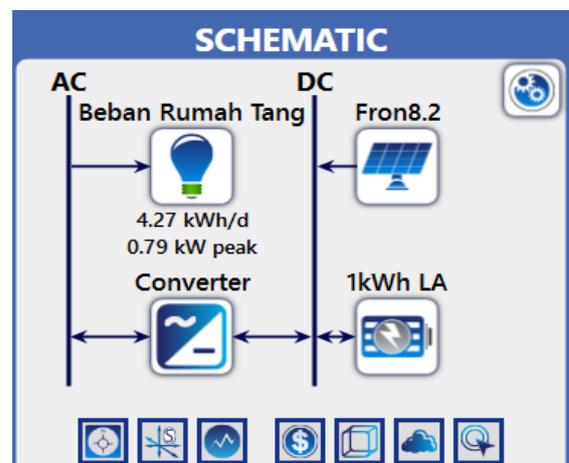
Gambar. 5 menampilkan data produksi listrik bulanan dari sistem PLTS *off-grid* yang menggunakan inverter Fronius Symo 8.2-3-M dengan kapasitas 8,20 kW dan panel surya generik. Sistem ini menghasilkan total 12.570 kWh/tahun, dengan produksi listrik bulanan yang relatif stabil, berkisar antara 0,8 hingga 1,2 MWh. Konsumsi energi rumah tangga tercatat 1.559 kWh/tahun, yang berarti sistem ini menghasilkan kelebihan listrik sebesar 10.740 kWh/tahun (85,4%) yang dapat digunakan untuk penyimpanan atau keperluan lain. Dengan *fraction renewable* 100%, sistem ini sepenuhnya berbasis energi terbarukan tanpa ketergantungan pada sumber listrik konvensional. Hal ini menunjukkan bahwa desain PLTS ini sangat mencukupi untuk memenuhi kebutuhan rumah tangga serta memiliki potensi untuk ekspansi atau pemanfaatan daya lebih lanjut.

Dengan fraksi energi terbarukan mencapai 100%, sistem ini sepenuhnya bergantung pada energi matahari tanpa ada keterlibatan sumber daya konvensional seperti genset berbahan bakar fosil. Keberhasilan ini dipengaruhi oleh potensi radiasi matahari di lokasi simulasi, yang berdasarkan data dari NASA POWER memiliki rata-rata tahunan sebesar 4,81 kWh/m²/hari. Perbedaan produksi listrik per bulan menunjukkan bahwa produksi cenderung lebih tinggi pada bulan Maret hingga Oktober, ketika tingkat radiasi dan indeks kejernihan atmosfer lebih tinggi dibandingkan bulan lainnya. Sementara itu, pada bulan Desember dan Januari, produksi listrik menurun akibat faktor cuaca seperti curah hujan yang lebih tinggi dan durasi sinar matahari yang lebih pendek.



Gambar. 5 Diagram data produksi listrik bulanan dari sistem PLTS *off-grid* yang menggunakan inverter Fronius Symo 8.2-3-M

Dari data ini, dapat disimpulkan bahwa sistem PLTS ini sangat *overproducing* dibandingkan dengan konsumsi listrik rumah tangga. Hal ini menunjukkan bahwa kapasitas sistem yang dipasang lebih besar dari kebutuhan dasar rumah tangga, yang dapat bermanfaat jika ada rencana ekspansi daya untuk tambahan perangkat listrik atau penyimpanan energi untuk penggunaan malam hari. Tidak terdapat listrik yang tidak terpenuhi (*unmet electric load* = 0 kWh), serta tidak ada kekurangan kapasitas (*capacity shortage* = 0 kWh), yang berarti sistem ini dapat bekerja secara mandiri tanpa perlu sumber listrik tambahan. Dengan *renewable fraction* 100%, sistem ini sepenuhnya berbasis energi terbarukan, menandakan keberhasilannya dalam menciptakan lingkungan rumah tangga yang bebas emisi karbon dan mandiri energi.



Gambar. 6 Diagram skematik sistem energi terbarukan.

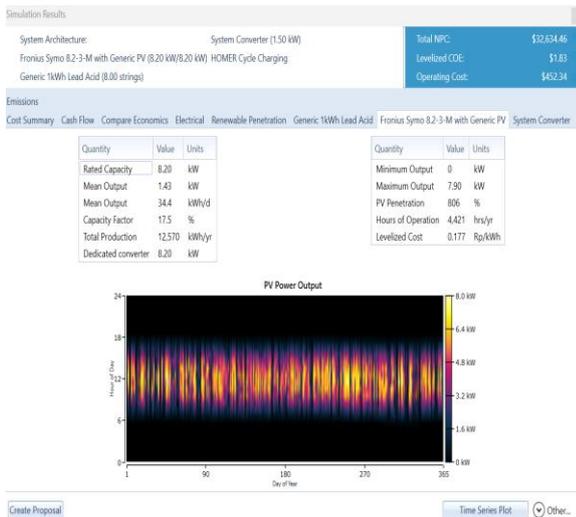
Kegiatan Simulasi ini berfokus pada implementasi sistem energi terbarukan berbasis pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) menggunakan inverter *Fronius Symo* 8.2-3-M. Sistem ini terdiri dari panel surya dengan kapasitas 8.2 kW, baterai penyimpanan 1 kWh *Lead Acid*, serta konverter daya 1.5 kW. Tujuan utama dari kegiatan ini adalah meningkatkan pemanfaatan energi surya untuk memenuhi kebutuhan rumah

tangga dengan beban listrik harian sekitar 4.27 kWh/d dan beban puncak 0.79 kW Gambar. 6.

Diagram skematik ini menunjukkan sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik rumah tangga. Sistem ini terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu panel surya *Fronius Symo 8.2* (Fron8.2) sebagai sumber energi utama yang menghasilkan listrik searah (DC), baterai timbal-asam 1 kWh (1kWh LA) sebagai penyimpanan energi, dan konverter yang mengubah listrik DC menjadi arus bolak-balik (AC) untuk digunakan oleh peralatan rumah tangga. Beban rumah tangga dalam sistem ini memiliki konsumsi harian sebesar 4.27 kWh dengan beban puncak mencapai 0.79 kW, yang berarti bahwa sistem ini dirancang untuk mencukupi kebutuhan listrik harian dengan kapasitas cadangan dari baterai.

Alur energi dalam sistem ini dimulai dari panel surya yang menghasilkan listrik DC dan mengisi baterai saat produksi listrik berlebih. Konverter kemudian mengambil energi dari baterai atau langsung dari panel surya untuk dikonversi menjadi listrik AC yang dibutuhkan oleh peralatan rumah tangga. Jika produksi energi dari panel surya lebih besar dari konsumsi, kelebihan daya dapat disimpan dalam baterai untuk digunakan saat matahari tidak bersinar, seperti di malam hari atau saat cuaca mendung. Sebaliknya, jika konsumsi listrik lebih besar dari produksi panel surya dan kapasitas baterai tidak mencukupi, sistem mungkin mengalami kekurangan daya, kecuali jika ada sumber daya tambahan.

Secara keseluruhan, skema ini menunjukkan sistem PLTS off-grid yang mandiri dan tidak bergantung pada jaringan listrik eksternal. Efisiensi sistem sangat bergantung pada kapasitas penyimpanan baterai dan tingkat produksi panel surya, serta konsumsi beban rumah tangga yang harus disesuaikan agar tidak melebihi daya yang tersedia.



Gambar. 7 Produksi Listrik Bulanan oleh Sistem PLTS.

Berdasarkan simulasi yang dilakukan menggunakan perangkat lunak *Homer Pro*, sistem PLTS ini mampu menghasilkan listrik sebesar 12,570 kWh per tahun, dengan rata-rata produksi harian sekitar 34.4 kWh/d. Beban utama rumah tangga hanya membutuhkan 1,559 kWh/tahun, yang berarti terdapat kelebihan listrik sebesar 10,740 kWh (85.4%)

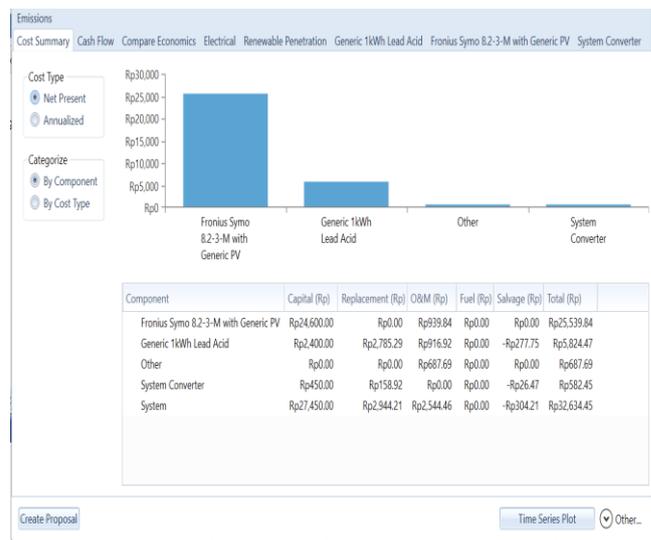
yang berpotensi dimanfaatkan lebih lanjut atau dijual ke jaringan listrik Gambar. 7.

Perhitungan manual produksi tahunan:

$$= \text{Kapasitas PV} \times \text{Faktor Kapasitas} \times (\text{jam/tahun}) \quad (1)$$

$$= 8,2 \times \frac{17,5}{100} \times 8760 = 12,570 \text{ kWh/tahun} \quad (2)$$

Hasil ini identik dengan hasil simulasi, menandakan bahwa asumsi faktor kapasitas 17.5% cukup realistis untuk wilayah tropis.



Gambar. 8 Grafik distribusi biaya pada masing-masing komponen.

Berdasarkan analisis biaya, total *Net Present Cost* (NPC) dari sistem ini adalah Rp 32,634.46 dengan biaya operasi tahunan sebesar Rp 452.34. Biaya listrik yang dihasilkan (*Levelized Cost of Energy*, LCOE) mencapai Rp 1.83/kWh, yang lebih murah dibandingkan tarif listrik konvensional. Komponen utama biaya investasi meliputi:

- Panel surya *Fronius Symo 8.2-3-M* dengan biaya Rp 24,600.00
- Baterai *Lead Acid* 1 kWh sebesar Rp 2,400.00
- Konverter sebesar Rp 450.00

Perhitungan manual (*Levelized Cost of Energy*, LCOE):

$$LCOE = \frac{NPC}{\text{Total Energi Seumur Sistem}} \quad (3)$$

$$LCOE = \frac{32,634.46}{12,570 \times 25} = Rp \ 0.1039/kWh \quad (4)$$

Nilai ini lebih rendah karena belum memperhitungkan:

- Diskonto tahunan
- Degradasi panel dan baterai
- Biaya penggantian baterai
- O dan M (Operasi & Pemeliharaan)

Jika faktor-faktor seperti diskonto tahunan, degradasi panel dan baterai, biaya penggantian baterai, serta biaya O dan

M tidak diperhitungkan, perhitungan LCOE akan menghasilkan angka yang lebih rendah dari yang seharusnya. Dalam prakteknya, untuk mendapatkan LCOE yang lebih akurat, seluruh faktor tersebut harus dimasukkan ke dalam perhitungan. Dengan memasukkan diskonto tahunan, degradasi, biaya penggantian baterai, dan O dan M, LCOE yang lebih realistis akan tercapai, yang lebih menggambarkan biaya energi yang sebenarnya dari sistem tersebut.

- Kapasitas Nominal Total: 8.01 kWh
- Kapasitas yang Dapat Digunakan (DoD 60%): 4.80 kWh
- Tegangan Bus: 12V
- Otonomi: 27 jam
- Throughput Seumur Hidup: 6,400 kWh
- Umur Pakai: 7.48 tahun

Efisiensi energi baterai:

$$Efisiensi = \frac{766}{955} \times 100\% = 80.2\% \tag{5}$$

- Energi Keluar: 766 kWh/tahun
- Kehilangan Energi: 189 kWh/tahun (~19.8%)

Walaupun efisiensi tergolong cukup baik, kehilangan energi dan deplesi penyimpanan (2.02 kWh/tahun) tetap perlu diperhatikan dalam desain sistem.

Hasil simulasi dari perangkat lunak HOMER Pro menunjukkan kinerja sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *off-grid* yang menggunakan panel surya Fronius Symo 8.2-3-M dengan kapasitas 8,20 kW. Sistem ini dilengkapi dengan baterai timbal-asam generik (8 string) dan konverter 1,50 kW, dengan skema operasi berbasis HOMER *Cycle Charging*, yang berarti baterai diisi hingga kapasitas maksimum sebelum energi digunakan langsung untuk beban. Dari segi kapasitas sistem, seluruh kapasitas nominal dan kapasitas yang dapat digunakan berasal dari sumber energi terbarukan (100%). Hal ini menegaskan bahwa sistem sepenuhnya bergantung pada tenaga surya, tanpa ada campuran dari sumber energi fosil atau grid eksternal.



Gambar. 9 Grafik data penyimpanan baterai *lead-acid*

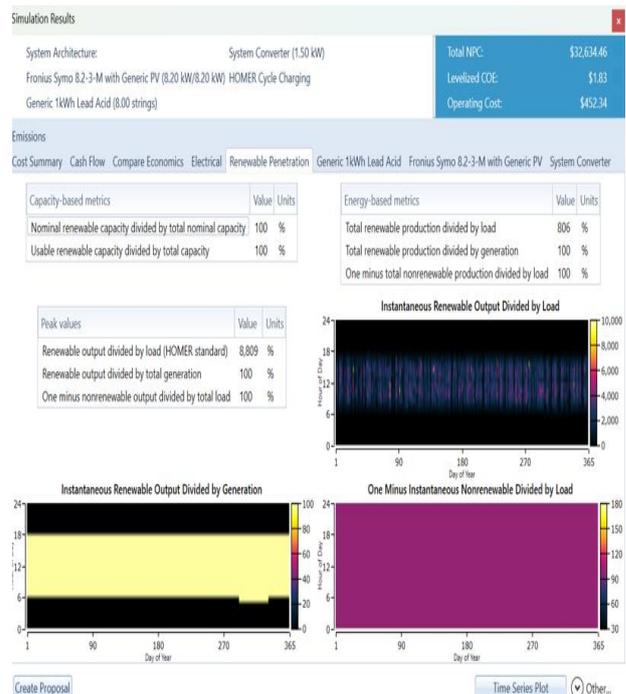
Gambar. 9 data terkait sistem penyimpanan energi berbasis baterai *lead-acid* 1 kWh dalam sistem PLTS. Sistem ini menggunakan 8 unit baterai yang dikonfigurasi dalam 8 string paralel dengan tegangan bus sebesar 12V. Baterai ini berfungsi sebagai penyimpanan cadangan energi untuk memastikan pasokan daya tetap tersedia ketika sinar matahari tidak cukup untuk menghasilkan listrik secara langsung.

Dari segi kapasitas, baterai memiliki kapasitas nominal sebesar 8.01 kWh, dengan kapasitas yang dapat digunakan hanya 4.80 kWh, yang menunjukkan bahwa sekitar 60% dari total kapasitas dapat dimanfaatkan. Hal ini disebabkan oleh batasan kedalaman pengosongan (*Depth of Discharge, DoD*) yang disarankan untuk memperpanjang umur baterai. Dengan otonomi selama 27 jam, sistem ini dapat menyediakan daya tanpa pengisian ulang dalam waktu yang cukup lama. *Throughput* seumur hidup dari baterai ini diperkirakan mencapai 6,400 kWh, dengan umur pakai sekitar 7,48 tahun sebelum baterai perlu diganti.

Dari segi efisiensi energi, baterai menerima energi masuk sebesar 955 kWh per tahun, tetapi hanya mampu mengeluarkan 766 kWh per tahun untuk digunakan, yang berarti terdapat kehilangan energi sekitar 191 kWh akibat proses penyimpanan dan efisiensi sistem konversi. Selain itu, terdapat deplesi penyimpanan sebesar 2,02 kWh per tahun. Jika dihitung, efisiensi siklus baterai ini mencapai 80.2%, yang menunjukkan bahwa sekitar 19.8% energi hilang dalam proses penyimpanan dan pelepasan daya. Dengan nilai efisiensi tersebut, sistem ini masih tergolong cukup baik dalam mendukung ketersediaan energi terbarukan, meskipun adanya kehilangan daya yang perlu diperhitungkan dalam desain dan optimalisasi sistem penyimpanan energi.

Analisis penyimpanan energi (Baterai *lead acid*):

- Jumlah Baterai: 8 unit @1 kWh



Gambar. 9 Grafik data penyimpanan rasio keluaran energi terbarukan terhadap beban listrik

Dari segi metrik energi, total produksi energi terbarukan dibandingkan dengan total beban mencapai 80.6%, yang menunjukkan bahwa sistem menghasilkan jauh lebih banyak listrik dibandingkan yang dikonsumsi. Selain itu, total produksi energi terbarukan dibandingkan dengan total produksi sistem juga 100%, yang berarti tidak ada kontribusi dari sumber daya lain selain panel surya. Metrik "*One minus total nonrenewable production divided by load*" juga bernilai 100%, menegaskan bahwa tidak ada energi yang berasal dari sumber non-terbarukan.

Perhitungan Nominal *Renewable Capacity / Total Capacity*:

$$\text{Nominal Renewable Capacity} = 8.20 \text{ kW (PV)} \quad (6)$$

$$\text{Total Capacity} = 8.20 \text{ kW (PV)} \frac{8.20}{8.20} \times 100\% = 100\% \quad (7)$$

Diagram "*Instantaneous Renewable Output Divided by Load*" menunjukkan variabilitas produksi energi surya dibandingkan dengan beban secara real-time sepanjang tahun. Grafik ini memperlihatkan fluktuasi produksi energi surya di setiap jam dalam satu tahun penuh, yang menunjukkan variasi akibat perubahan cuaca, musim, dan siklus harian matahari. Warna yang dominan gelap dengan sedikit pola warna lebih terang menunjukkan bahwa produksi energi lebih tinggi pada siang hari, sedangkan malam hari produksi turun ke nol.

Diagram "*Instantaneous Renewable Output Divided by Generation*" menunjukkan proporsi energi terbarukan yang dihasilkan dibandingkan dengan total energi yang diproduksi sistem. Grafik ini didominasi oleh warna kuning dan hitam, yang menunjukkan bahwa hampir seluruh energi yang dihasilkan berasal dari tenaga surya, dengan sangat sedikit atau bahkan tidak ada kontribusi dari sumber lain. Ini sesuai dengan hasil perhitungan bahwa fraksi energi terbarukan adalah 100%.

Diagram "*One Minus Instantaneous Nonrenewable Divided by Load*" menunjukkan bahwa seluruh beban listrik dipenuhi oleh energi terbarukan sepanjang tahun. Grafik ini ditampilkan dalam warna ungu pekat, yang mengonfirmasi bahwa tidak ada energi dari sumber non-terbarukan yang digunakan untuk memenuhi beban. Jika ada campuran dari sumber lain, warna akan bervariasi, tetapi dalam simulasi ini, warna seragam menandakan sistem bekerja sepenuhnya dengan energi surya tanpa dukungan dari bahan bakar fosil.

Secara keseluruhan, sistem ini sangat berlebih dalam kapasitas produksi dibandingkan konsumsi, sehingga menghasilkan energi surplus yang sangat besar, yaitu lebih dari 700% dari kebutuhan beban. Hal ini menunjukkan bahwa sistem dapat dimanfaatkan lebih jauh, seperti untuk mendukung penggunaan tambahan, penyimpanan energi lebih besar, atau bahkan dijual ke jaringan listrik jika diintegrasikan dengan sistem grid-tied. Namun, kelemahannya adalah adanya kemungkinan energi yang terbuang sia-sia, karena tidak ada mekanisme untuk memanfaatkan kelebihan daya ini.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan dari hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

- 1) Permintaan energi listrik yang terus meningkat dapat diatasi dengan PLTS *off-grid*, terutama di daerah

terpencil dan pedesaan yang belum terjangkau jaringan listrik PLN.

- 2) Karawang memiliki potensi energi surya tinggi, sehingga sistem PLTS dapat menjadi solusi berkelanjutan untuk kebutuhan listrik rumah tangga.
- 3) Hasil simulasi menggunakan *Homer Pro* menunjukkan bahwa sistem PLTS ini mampu menghasilkan 12,570 kWh per tahun, jauh melebihi konsumsi rumah tangga sebesar 1,562.82 kWh per tahun.
- 4) Dari segi ekonomi, sistem ini memiliki *Net Present Cost (NPC)* sebesar Rp 32,634.46 dengan biaya operasi tahunan Rp 452.34, serta LCOE Rp 1.83/kWh, yang lebih murah dibandingkan tarif listrik konvensional.
- 5) Efisiensi penyimpanan energi menggunakan baterai 80.2%, dengan kehilangan energi 19.8% akibat proses penyimpanan dan konversi.
- 6) Sistem PLTS *off-grid* terbukti layak secara teknis dan ekonomis, serta dapat menjadi model solusi energi terbarukan di wilayah lain dengan kondisi serupa.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusi dalam penelitian ini.

REFERENSI

- [1] D. Herliyanso and R. Ojak Abdul, "Perencanaan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off-grid Sebagai Suplai Daya Listrik Perpustakaan Universitas Pamulang," 2023. Accessed: Feb. 05, 2025. [Online]. Available: <https://elektro.ejournal.web.id/index.php/elektro/article/download/11/43/647>
- [2] Y. Chandra, "Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off Grid Untuk Penerangan dan Pengeras Suara pada Mushola Hidayatullah Desa Harapan Baru," *Journal of Electrical Network Systems and Sources*, vol. 02, no. 02, pp. 33–39, 2022, doi: 10.58466/entries.
- [3] D. Satria, C. V. Asmara Putri, M. A. Nasta Latu, E. A. Bangun, and A. Sutiya, "Penerapan PLTS Sebagai Sumber Energi Listrik Untuk UMKM Kerupuk Wanita Tani di Desa Tanjung Karawang," *IICOSIN: Indonesian Journal of Community Service and Innovation*, vol. 4, no. 2, Jul. 2024, doi: 10.20895/ijcosin.v4i1.1462.
- [4] M. Meilany, Dika Satria, R. Pusparina A, A. Dhia Saputro, B. Fasial Tanjung, and R. Hidayat, "Analisis Output Daya pada Sistem Pembersih Debu berbasis ESP32 terhadap Panel Surya," *Jurnal Komputer dan Elektro Sains*, vol. 2, no. 2, pp. 16–21, Jan. 2024, doi: 10.58291/komets.v2i2.169.
- [5] F. Salsa Hayani et al., "Hybrid Generator Termoelektrik Panel Surya Thin Film Sf 170-S Cis 170 Watt Pada Plts 1 Mw Cirata," 2021.
- [6] B. Dwi Cahyono, J. Teknik Elektro, P. Negeri Samarinda Jl Ciptomangkusumo, and K. Gunung Panjang, "Rancang Bangun Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Sebagai Catu Daya Pompa Air Submersible," 2023.
- [7] E. Wati, "Performance Analysis Of Off-Grid Solar Power Systems Configured In Parallel And Combination (Series-Parallel) For Indoor Lighting," 2023.
- [8] Y. S. Handayani, M. Hendy Jaza, A. Kurniawan, and B. Istijono, "Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terpusat OFF-GRID System Pada Gedung LAB Terpadu II Fakultas Teknik Universitas Bengkulu," *JURNAL AMPLIFIER : JURNAL ILMIAH BIDANG TEKNIK ELEKTRO DAN KOMPUTER*, vol. 14, no. 1, pp. 102–111, May 2024, doi: 10.33369/jamplifier.v14i1.134626.
- [9] W. Z. Z. Muna, R. E. Rachmanita, M. Nuruddin, and N. Faizin, "Studi Evaluasi PLTS Off-Grid di Gedung Jurusan Teknik Politeknik Negeri Jember," *Indonesian Journal of Energy and Mineral*, vol. 2, no. 2, pp. 1–12, Oct. 2022, doi: 10.53026/ijoem/2022/2.2/1017.

- [10] J. Windarta, S. Handoko, K. N. Irfani, S. M. Masfuha, and C. H. Itsnareno, "Analisis Teknis dan Ekonomis Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off-grid Menggunakan Software PVSyst untuk Usaha Mikro Kecil dan Menengah (UMKM) Coffeeshop Remote Area," *TEKNIK*, vol. 42, no. 1, pp. 290–298, Dec. 2021, doi: 10.14710/teknik.v42i3.40242.
- [11] H. Setiawan, "Implementasi Plts Sebagai Pengganti Sumber Energi Listrik Utama Rumah Tangga 1300va," pp. 219–232, 2021.
- [12] B. Widodo and Winarso, "Peningkatan Energi Listrik Serta Daya Keluaran Pada Panel Surya Dengan Penambahan Sistem Pendingin Heatsink Dan Reflektor Alluminium Foil," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer Triac*, vol. 09, no. 01, 2022, Accessed: Feb. 05, 2025. [Online]. Available: <https://journal.trunojoyo.ac.id/triac>
- [13] D. Dzulfikar and W. Broto, "Optimalisasi Pemanfaatan Energi Listrik Tenaga Surya Skala Rumah Tangga," Universitas Negeri Jakarta, 2016, pp. SNF2016-ERE-73-SNF2016-ERE-76. doi: 10.21009/0305020614.
- [14] L. Halim, "Perancangan Dan Implementasi Awal Solar Inverter Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off Grid," vol. 12, no. 1, 2020, doi: 10.24853/jurtek.12.1.31-38.
- [15] P. Seminar and N. Mipa, "Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Plts) Berbasis Homer Di Sma Negeri 6 Surakarta Sebagai Sekolah Hemat Energi Dan Ramah Lingkungan," 2019.
- [16] A. W. Akbar, N. Hiron, and N. Nadrotan, "Perencanaan Sistem Pembangkit Listrik Dengan Sumber Energi Terbarukan (Homer) Di Daerah Pesisir Pantai Pangandaran," *Journal Of Energy And Electrical Engineering*, vol. 01, no. 01, pp. 12–18, 2019, doi: <https://doi.org/10.37058/jeee.v1i1.1191>.
- [17] I. Wahyudin, A. Karim, M. Rumbayan, and G. M. C. Mangindaan, "Perencanaan Daya Cadang Menggunakan Panel Surya Di Perumahan Bukit Ranomuut Indah." Accessed: Feb. 05, 2025. [Online]. Available: <http://repo.unsrat.ac.id/3840/1/jurnal%20indra%20wahyudin.pdf>.