

STUDI KELAYAKAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA HIBRIDA SURYA-MIKROHIDRO DI SIANJUR MULA-MULA MENGGUNAKAN PERANGKAT HOMER

Leo Michel¹

UNIVERSITAS NEGERI MEDAN
leomichel.5243230041@mhs.unimed.ac.id¹,

Abstrak

Penelitian ini bertujuan merancang Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida (SPLTH) berbasis energi surya dan mikrohidro di Kecamatan Sianjur Mula-Mula, Kabupaten Samosir menggunakan perangkat lunak HOMER Pro. Wilayah ini memiliki beban harian komunal 8.819 kWh/hari dengan beban puncak 850 kW. Hasil optimasi HOMER Pro merekomendasikan konfigurasi off-grid paling optimal yang terdiri atas panel surya (PV) 6.372 kW, mikrohidro (Generic Hydro) 100 kW (daya turbin aktual 14,1 kW), baterai Generic 100 kWh Li-Ion sebanyak 240 string, dan konverter 2.430 kW. Secara teknis, total produksi listrik mencapai 8.683.176 kWh/tahun yang didominasi oleh panel surya sebesar 98,9% dan mikrohidro 1,06%. Sistem ini memiliki keandalan sangat tinggi dengan nilai Unmet Electric Load hanya 0,0809% dan Renewable Fraction mencapai 100%. Dari aspek ekonomi, proyek ini membutuhkan modal awal (CAPEX) \$33.800.000,00, biaya operasional tahunan \$793.437,00, dan total Net Present Cost (NPC) \$44.054.000,00, sehingga menghasilkan Cost of Energy (COE) sebesar \$1,06 per kWh. Komponen baterai mendominasi pengeluaran finansial terbesar yaitu \$25.688.880,35 demi menjaga kontinuitas daya malam hari. Kesimpulannya, sistem hibrida ini sangat layak diimplementasikan sebagai solusi listrik mandiri yang andal dan bersih di lokasi penelitian.

Kata Kunci: Pembangkit Tenaga Listrik, Sistem Hibrida, Panel Surya, Mikrohidro, HOMER Pro.

Abstract

This study aims to design a Hybrid Renewable Energy System (HRES) based on solar and micro-hydro energy in Sianjur Mula-Mula, Samosir Regency using HOMER Pro software. This region has a daily load of 8,819 kWh/day with a peak load of 850 kW. The optimization results recommend the most optimal off-grid configuration consisting of 6,372 kW PV, 100 kW Generic Hydro (14.1 kW actual turbine), 240 strings of Generic 100 kWh Li-Ion battery, and a 2,430 kW converter. Technically, the total annual electricity production reaches 8,683,176 kWh/year, dominated by solar panels at 98.9% and supported by micro-hydro at 1.06%. The system exhibits high reliability with an Unmet Electric Load of only 0.0809% and a 100% Renewable Fraction. Economically, the project requires a CAPEX of \$33,800,000.00, an annual operating cost of \$793,437.00, and a Net Present Cost (NPC) of \$44,054,000.00, yielding a Cost of Energy (COE) of \$1.06 per kWh. The battery dominates the largest expenditure at \$25,688,880.35 to ensure nighttime power continuity. In conclusion, this hybrid system is highly feasible as a reliable and clean standalone power solution at the study site.

Keywords: Power Plant, Hybrid System, Solar PV, Micro-hydro, HOMER Pro.

A. PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan energi listrik merupakan konsekuensi dari pertumbuhan penduduk, perkembangan teknologi, serta meningkatnya aktivitas ekonomi masyarakat. Kondisi tersebut mendorong kebutuhan akan sistem penyediaan energi yang tidak hanya mampu memenuhi kebutuhan daya secara berkelanjutan, tetapi juga memiliki tingkat keandalan tinggi dan ramah lingkungan. Ketergantungan terhadap energi fosil masih menjadi tantangan utama dalam sistem ketenagalistrikan Indonesia, sehingga pemanfaatan energi baru terbarukan menjadi langkah strategis dalam mendukung transisi energi nasional sebagaimana diamanatkan dalam Kebijakan Energi Nasional melalui Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014. Oleh karena itu, pengembangan sistem pembangkit berbasis energi terbarukan menjadi salah satu alternatif untuk menjawab kebutuhan energi masa depan yang lebih berkelanjutan [1], [2].

Indonesia memiliki potensi energi terbarukan yang sangat besar, terutama pada energi surya dan energi air skala mikrohidro. Sebagai negara tropis yang terletak di wilayah khatulistiwa, Indonesia memperoleh intensitas penyinaran matahari yang relatif tinggi sepanjang tahun, sehingga memiliki peluang besar dalam pengembangan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) [3], [4]. Selain energi surya, potensi energi air juga cukup melimpah, terutama pada daerah dengan kondisi geografis berbukit dan memiliki aliran sungai yang stabil. Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) menjadi salah satu solusi energi terbarukan yang efektif karena mampu menghasilkan energi listrik secara kontinu dengan memanfaatkan debit dan tinggi jatuh air (head) [5], [6].

Pemanfaatan energi surya maupun mikrohidro secara mandiri memiliki keterbatasan tertentu. Energi surya sangat dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari dan kondisi cuaca, sehingga produksi energi cenderung mengalami fluktuasi pada waktu tertentu [3], [7]. Di sisi lain, pembangkit mikrohidro bergantung pada kestabilan debit air yang dapat berubah akibat faktor musim maupun kondisi lingkungan sekitar [8], [9]. Oleh sebab itu, integrasi kedua sumber energi tersebut dalam bentuk sistem pembangkit listrik tenaga hibrida menjadi pendekatan yang menjanjikan untuk meningkatkan kontinuitas dan keandalan suplai energi listrik [10], [11].

Sistem pembangkit listrik tenaga hibrida (*hybrid renewable energy system*) merupakan sistem yang mengintegrasikan dua atau lebih sumber energi terbarukan guna memperoleh performa pembangkitan yang lebih optimal. Kombinasi antara energi surya dan mikrohidro memungkinkan adanya mekanisme saling melengkapi (*complementary system*), di mana energi mikrohidro dapat menyuplai listrik secara kontinu, sementara energi surya berkontribusi dalam memenuhi kebutuhan daya pada siang hari [2], [11], [12]. Dengan demikian, sistem hibrida berpotensi meningkatkan keandalan pasokan energi, mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi konvensional, serta menekan biaya operasional jangka panjang [1], [7].

Dalam proses perancangan sistem pembangkit listrik tenaga hibrida, diperlukan metode simulasi dan optimasi untuk memperoleh konfigurasi sistem yang paling sesuai baik dari aspek teknis maupun ekonomi. Salah satu perangkat lunak yang banyak digunakan dalam analisis sistem energi terbarukan adalah HOMER (*Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources*). HOMER mampu melakukan simulasi performa sistem, optimasi konfigurasi komponen, serta analisis

kelayakan ekonomi berdasarkan parameter seperti *Net Present Cost* (NPC), *Cost of Energy* (COE), dan sensitivitas sumber energi [13], [14]. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa HOMER efektif digunakan dalam perencanaan sistem pembangkit energi terbarukan, termasuk sistem hibrida berbasis surya dan mikrohidro pada wilayah terpencil maupun daerah *off-grid* [6], [8], [10].

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa integrasi energi surya dan mikrohidro memiliki potensi yang baik dalam meningkatkan efisiensi sistem pembangkitan listrik. Penelitian oleh Wijaya [8] menunjukkan bahwa sistem hibrida piko hidro-surya yang dianalisis menggunakan HOMER mampu menghasilkan konfigurasi pembangkit yang lebih optimal dibandingkan sistem tunggal [15]. Penelitian lain oleh Prasetyo dkk [10], serta Wibowo dkk [2], juga menunjukkan bahwa pendekatan techno-economic menggunakan HOMER mampu menghasilkan desain sistem energi hibrida yang lebih efisien dan ekonomis, khususnya pada daerah yang belum sepenuhnya terjangkau jaringan listrik utama.

Kecamatan Sianjur Mula-Mula, Kabupaten Samosir, merupakan wilayah yang memiliki karakteristik geografis berbukit serta potensi sumber daya alam yang mendukung pengembangan energi terbarukan. Keberadaan aliran sungai di beberapa kawasan berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi mikrohidro, sementara intensitas radiasi matahari yang cukup tinggi mendukung penerapan sistem PLTS, [10]. Kondisi tersebut menjadikan wilayah ini berpotensi untuk pengembangan sistem pembangkit listrik tenaga hibrida berbasis surya dan mikrohidro sebagai solusi penyediaan energi listrik yang mandiri dan berkelanjutan.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk merancang sistem pembangkit listrik tenaga hibrida berbasis energi surya dan mikrohidro di Kecamatan Sianjur Mula-Mula, Kabupaten Samosir menggunakan perangkat lunak HOMER. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh konfigurasi sistem yang optimal berdasarkan aspek teknis dan ekonomi, sehingga diharapkan dapat menjadi alternatif solusi penyediaan energi listrik yang andal, efisien, dan berkelanjutan bagi wilayah dengan karakteristik geografis serupa.

B. METODE PENELITIAN

2.1 Waktu dan tempat

Penelitian ini dilaksanakan di Gunung Pusuk Buhit sebagai tempat panel surya dan Air Terjun Hadabuan Nai Sogop Sebagai Tempat Mikrohidro, yang terletak di Kecamatan Sianjur Mula Mula, Kabupaten Samosir, Sumatra Utara.

2.2 Alat dan bahan

Adapun alat dan bahan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Laptop
- b. Software HOMER
- c. GPS (Global Position System)
- d. Data Demografi dan Fasilitas Wilayah
- e. Data Potensi Energi Terbarukan Lokasi (Meteorological Resources)

2.3 DATA BEBAN LISTRIK (Electric Load Profile)



- Jumlah Rumah Tangga (1 Kecamatan): 2.390 Rumah Tangga (*Sumber : BPS Kabupaten Samosir atau BPS Kecamatan Sianjur Mula-Mula*).
- Fasilitas Umum Terpetakan: 22 Sekolah (19 SD, 2 SMP, 1 SMA), 1 Puskesmas, 12 Kantor Desa, dan 50 titik Penerangan Jalan Umum (PJU). (*Sumber : BPS, Dinas Pendidikan, atau Profil Kecamatan*)

1. Beban Rumah Tangga:

$$E_{RT} = 2.390 \text{ rumah} \times 3,50 \text{ kWh/hari} = 8.365 \text{ kWh/hari}$$

2. Beban Sekolah:

$$E_{Sekolah} = 22 \text{ sekolah} \times 15,00 \text{ kWh/hari} = 330 \text{ kWh/hari}$$

3. Beban Kantor Desa:

$$E_{Kantor} = 12 \text{ kantor} \times 8,00 \text{ kWh/hari} = 96 \text{ kWh/hari}$$

4. Beban Puskesmas:

$$E_{Puskesmas} = 1 \text{ unit} \times 24,00 \text{ kWh/hari} = 24 \text{ kWh/hari}$$

5. Beban Penerangan Jalan (PJU):

$$E_{PJU} = 50 \text{ titik} \times 0,08 \text{ kWh/hari} = 4 \text{ kWh/hari}$$

Total Akumulasi Beban Harian:

$$E_{total} = 8.365 + 330 + 96 + 24 + 4 = 8.819 \text{ kWh/hari}$$

Data beban listrik total sebesar 8.819 kWh/day merupakan hasil kalkulasi tekno-ekonomis menggunakan pendekatan pemodelan beban makro komunal. Data dasar jumlah konsumen dan jenis fasilitas umum diadopsi secara sekunder dari laporan resmi Badan Pusat Statistik (BPS) Kabupaten Samosir (Kecamatan Sianjur Mulamula Dalam Angka 2024). Asumsi konsumsi daya per sektor didasarkan pada standar kelistrikan perdesaan Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan (DJK) ESDM dan PT PLN (Persero) untuk wilayah 3T/Perdesaan.

Tabel 1 Profil Beban Harian 24 Jam (Aktivitas Makro):

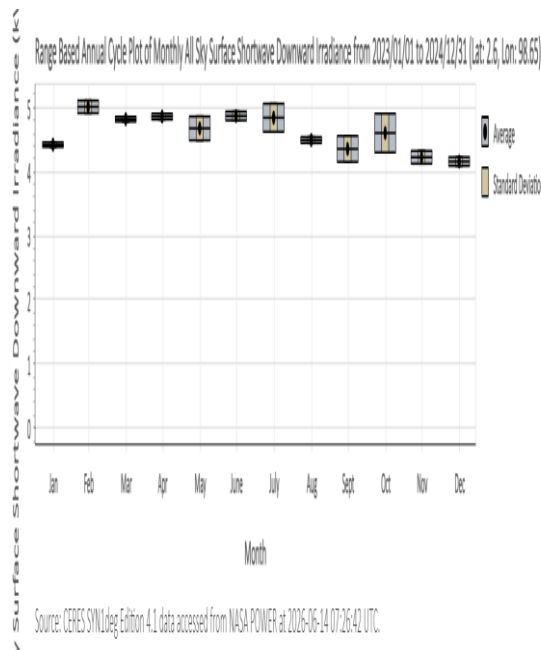
Jam (WIB)	Estimasi Beban (kW)	Pembagian Waktu	Kluster
00.00 - 05.00	220 kW s.d. 260 kW	Beban Rendah (Lampu malam, PJU, kulkas, & standby Puskesmas).	
05.00 - 07.00	480 kW	Jam Puncak Pagi: Pompa air domestik dan alat masak menyala.	
07.00 - 16.00	320 kW s.d. 380 kW	Jam Kerja/Siang: Rumah kosong, Masyarakat pergi bekerja ke ladang, beban pindah ke 22 sekolah & 12 kantor desa.	

16.00 - 18.00	340 kW s.d. 420 kW	Persiapan sore hari, warga kembali ke rumah.
18.00 - 21.00	850 kW	Jam Puncak Malam: Lampu jalan (PJU) aktif, TV, perangkat elektronik domestik maksimal.
21.00 - 24.00	650 kW s.d. 300 kW	Penurunan bertahap menjelang waktu istirahat warga.

Sumber: Asumsi peneliti berdasarkan karakteristik konsumsi energi rumah tangga dan fasilitas umum di Kecamatan Sianjur Mula-Mula (2024).

Beban Puncak (Peak Load) Di Kecamatan Sianjur Mula mula beradapada pukul 19.00 - 21.00 WIB sebesar 850 kW

2.4 DATA POTENSI SURYA (PV)



Gambar 2. Radiasi Matahari 2023-2024
 Sumber : Satelit NASA POWER

Berdasarkan data satelit NASA POWER (CERES SYN1deg Edition 4.1) terbaru pada koordinat eksak proyek Anda, radiasi matahari di wilayah Pusuk Buhit sangat stabil:

- Global Solar Radiation (GHI Rata-rata): = 4,61 kWh/m²/day (Nilai tengah tahunan).

- Temperatur Rata-rata: 21°C - 23°C (Suhu dataran tinggi Pusuk Buhit yang sejuk sangat menguntungkan karena menjaga efisiensi keluaran sel surya dari *overheating*).

Tabel 2 Data Bulanan Radiasi Matahari

Bulan	Radiasi Matahari Rata-rata (kWh/m ² /day)
Januari	4,45
Februari	5,02
Maret	4,82
April	4,88
Mei	4,70
Juni	4,88
Juli	4,85
Agustus	4,51
September	4,38
Oktober	4,62
November	4,25
Desember	4,18

Sumber : Satelit NASA POWER

2.5 DATA POTENSI MIKROHIDRO

Parameter Teknis PLTMH Hadabuan Naisogop Sianjur Mula Mula

- Available Head (Tinggi Jatuh Efektif): 9 meter.
- Design Flow Rate (Debit Rencana): 0,20 m³/s (atau 200 L/s).
- Turbine Efficiency: 80% (standar efisiensi untuk sistem mikrohidro).
- Water Density: 1.000 kg/m³ (standar).
- Gravity: 9,81 m/s² (standar).

Tabel 3 Proyeksi Debit Aliran Air (*Stream Flow*) dan Referensi Curah Hujan 2024

Bulan	Curah Hujan (mm)	Debit Aliran (m ³ /s)
Januari	220	0,19
Februari	210	0,18
Maret	230	0,17
April	240	0,16
Mei	190	0,15
Juni	120	0,12
Juli	130	0,14
Agustus	140	0,14
September	200	0,18
Oktober	260	0,21
November	280	0,22
Desember	310	0,24

Sumber: Hasil analisis hidrologi berbasis data klimatologi (BMKG/Regional Samosir) dan estimasi debit aliran untuk kebutuhan simulasi sistem (2024).

2.6 Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida

2.6.1 Mikrohidro

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) yang digunakan pada sistem pembangkit listrik tenaga hibrida (PLTH) dalam penelitian ini memanfaatkan potensi sumber daya air di kawasan Air Terjun Hadabuan Naisogop, Kecamatan Sianjur Mula-Mula, Kabupaten Samosir. Berdasarkan karakteristik geografis dan hidrologi wilayah, sistem mikrohidro dirancang menggunakan tinggi jatuh efektif (*available head*) sebesar 9 meter dan debit rencana (*design flow*) sebesar 0,20 m³/s.

Jenis turbin yang dipilih pada penelitian ini adalah turbin crossflow, karena memiliki karakteristik yang sesuai untuk kondisi head rendah (*low head*) dan debit air menengah pada lokasi penelitian. Selain itu, turbin crossflow memiliki efisiensi yang relatif baik pada variasi debit musiman, konstruksi yang sederhana, serta biaya operasi dan pemeliharaan yang lebih rendah dibandingkan jenis turbin lainnya.

Perhitungan daya keluaran PLTMH dilakukan menggunakan persamaan daya hidrolik sebagai berikut:

$$P = \rho gQH\eta$$

dengan:

P = daya keluaran pembangkit (W)

ρ = massa jenis air (1000 kg/m^3)

g = percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$)

Q = debit aliran air ($0,20 \text{ m}^3/\text{s}$)

H = tinggi jatuh efektif (9 m)

η = efisiensi turbin (80%)

Maka kapasitas daya PLTMH dapat dihitung sebagai berikut:

$$P = (1000)(9,81)(0,20)(9)(0,80)$$

$$P = 14.126,4 \text{ W}$$

$$P = 14,12 \text{ kW}$$

Dari hasil perhitungan diperoleh kapasitas keluaran nominal PLTMH sebesar 14,12 kW. Karena PLTMH beroperasi secara kontinu selama 24 jam, maka energi listrik harian yang dapat dihasilkan dihitung sebagai berikut:

$$E = P \times t$$

$$E = 14,12 \times 24$$

$$E = 338,88 \text{ kWh/day}$$

Untuk mengetahui kontribusi PLTMH terhadap kebutuhan energi wilayah, dilakukan perbandingan terhadap total kebutuhan listrik Kecamatan Sianjur Mula-Mula sebesar 8.819 kWh/hari, sehingga diperoleh:

$$\text{Kontribusi PLTMH} = \frac{338,88}{8819} \times 100\%$$

Kontribusi PLTMH = 3,84%

Berdasarkan hasil tersebut, PLTMH mampu menyuplai sekitar 3,84% kebutuhan energi harian wilayah penelitian. Oleh karena itu, sistem mikrohidro tidak digunakan sebagai sumber energi utama, melainkan sebagai sumber energi pendukung (*secondary source*) yang berfungsi menjaga kontinuitas pasokan listrik dan mengurangi beban sistem baterai, terutama pada saat intensitas radiasi matahari menurun atau malam hari.

Selain itu, berdasarkan data debit bulanan, keluaran daya PLTMH dapat berubah mengikuti kondisi musim. Pada saat debit minimum sebesar 0,12 m³/s (musim kemarau), kapasitas daya minimum dihitung sebagai berikut:

$$P = (1000)(9,81)(0,12)(9)(0,80)$$

$$P = 8,47 \text{ kW}$$

Sedangkan pada kondisi debit maksimum sebesar 0,24 m³/s (musim hujan), kapasitas daya maksimum yang dihasilkan adalah:

$$P = (1000)(9,81)(0,24)(9)(0,80)$$

$$P = 16,95 \text{ kW}$$

Dengan demikian, keluaran daya PLTMH pada lokasi penelitian berada pada rentang 8,47–16,95 kW bergantung pada kondisi debit air musiman. Walaupun kontribusinya terhadap kebutuhan energi wilayah relatif kecil, keberadaan PLTMH tetap penting dalam sistem pembangkit listrik tenaga hibrida karena menyediakan suplai energi yang lebih stabil dan kontinu dibandingkan sumber energi intermiten lainnya.

2.6.2 Modul Surya (PV)

Modul surya yang digunakan dalam sistem ini memanfaatkan potensi radiasi matahari rata-rata sebesar 4,61 kWh/m²/day, yang tergolong sangat baik untuk pembangkitan listrik tenaga surya di daerah tropis dataran tinggi. Efisiensi modul surya diasumsikan sebesar 80% (derating system HOMER). Perhitungan kapasitas modul surya dilakukan berdasarkan kebutuhan energi harian:

- Beban harian = 8.819 kWh/day
- Peak Sun Hour (PSH) = 4,61
- Efisiensi sistem = 0,8

$$Kapasitas \text{ PV} = \frac{E_{load}}{PSH \times \eta}$$

$$Kapasitas \text{ PV} = \frac{8.819}{4,61 \times 0,8}$$

$$Kapasitas \text{ PV} = \frac{8.819}{3,688} = 2.39 \text{ MW}$$

Dari hasil perhitungan, kapasitas modul surya yang dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan energi adalah sekitar 2,0 – 2,5 MWp. Modul surya berfungsi

sebagai sumber utama energi listrik (primary source) dalam sistem pembangkit listrik tenaga hibrida ini.

2.6.3 Konverter (Inverter/Converter)

Konverter yang digunakan dalam sistem ini berfungsi untuk mengubah arus DC dari panel surya dan baterai menjadi arus AC yang digunakan oleh beban. Kapasitas konverter ditentukan berdasarkan beban puncak sistem yaitu 850 kW dengan faktor keamanan 20%.

$$\begin{aligned} \text{Kapasitas inverter} &= 1,2 \times P_{peak} \\ \text{Kapasitas inverter} &= 1,2 \times 850 = 1020 \text{ kW} \end{aligned}$$

Sehingga dibutuhkan konverter dengan kapasitas sekitar 1,0 - 1,2 MW untuk menjamin sistem dapat bekerja pada kondisi beban maksimum. Konverter juga berfungsi menjaga kestabilan tegangan dan frekuensi sistem pada kondisi operasi off-grid.

2.6.4 Baterai (Battery Storage System)

Sistem baterai digunakan untuk menyimpan energi dari panel surya dan turbin angin, serta memasok energi saat beban puncak malam hari dan saat produksi energi rendah. Berdasarkan kurva beban, beban dominan malam hari (18.00–24.00) diperkirakan sekitar 60% dari total beban harian.

$$\begin{aligned} E_{malam} &= 0,6 \times 8.819 \\ E_{malam} &= 5.291 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Karena PLTMH tetap beroperasi secara kontinu selama malam hari, maka energi mikrohidro turut membantu menyuplai sistem sekitar:

$$\begin{aligned} E_{PLTMH} &= 14,12 \times 6 \\ E_{PLTMH} &= 84,72 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Sehingga kebutuhan energi yang harus dipenuhi baterai menjadi:

$$\begin{aligned} E_{battery} &= 5291 - 84,72 \\ E_{battery} &= 5291 - 84,72 \\ E_{battery} &= 5206,28 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Dengan asumsi Depth of Discharge (DoD) sebesar 80%, kapasitas baterai dihitung sebagai berikut:

$$\text{Kapasitas baterai} = \frac{E_{battery}}{\text{DoD}}$$

$$\text{Kapasitas baterai} = \frac{5206,28}{0,8}$$

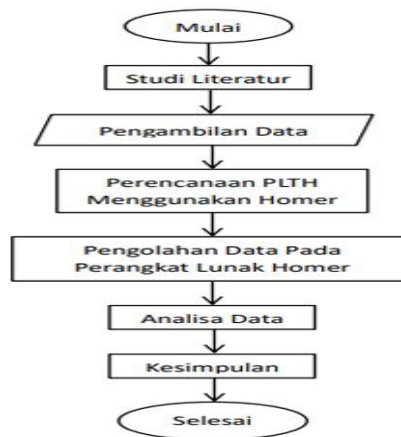
$$\text{Kapasitas baterai} = 6508 \text{ kWh}$$

hingga kapasitas baterai yang dibutuhkan adalah sekitar 6–7 MWh (6.000–7.000 kWh).

Baterai berfungsi sebagai:

- penyimpan energi PV dan wind
- penyeimbang beban puncak
- sumber energi utama pada malam hari

2.7 Alur Penelitian

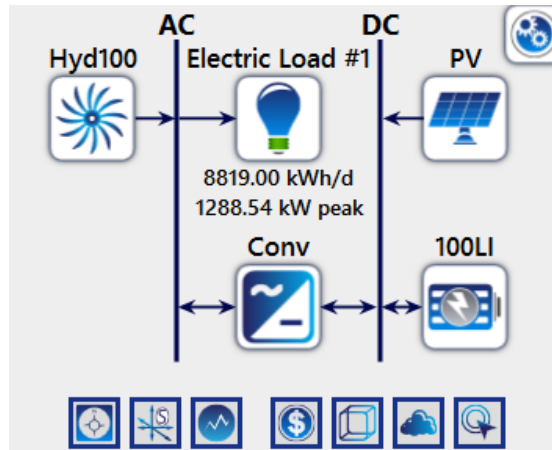


Gambar 1 Alur penelitian

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida Menggunakan Perangkat Lunak HOMER Di Daerah Sianjur Mula Mula

Konfigurasi dan interkoneksi antarkomponen dalam Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida (SPLTH) yang dirancang pada penelitian ini dimodelkan menggunakan perangkat lunak HOMER

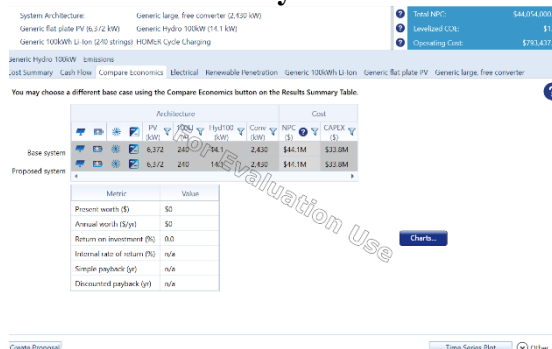


Gambar 2 Tampilan Desain Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTS - PLTMH) Pada HOMER

3.2 Hasil Simulasi Sistem Pembangkit Hybrid PLTB PLTS

Proses simulasi ini mengintegrasikan data beban listrik warga, potensi matahari di Pusuk Buhit, dan data aliran air di Air Terjun Hadabuan Naisogop. Hasil olahan data ini ditampilkan untuk menemukan konfigurasi sistem mandiri (*off-grid*) yang paling andal dan ekonomis untuk masa pakai proyek selama 25 tahun. Analisis detail mengenai spesifikasi sistem, rincian biaya komponen, dan performa kelistrikan.

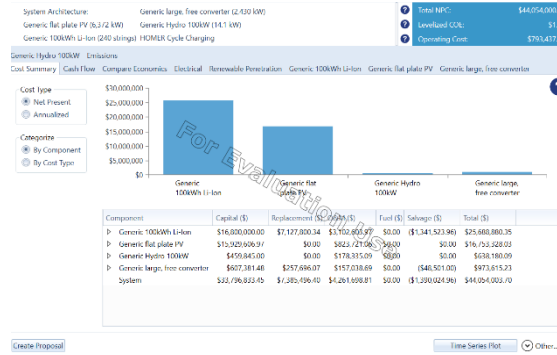
3.2.1 Spesifikasi Sistem & Kelayakan Finansial



Gambar 3 Hasil Spesifikasi Sistem & Kelayakan Finansial Berdasarkan Simulasi Homer

Berdasarkan hasil optimasi akhir menggunakan perangkat lunak HOMER Pro, diperoleh konfigurasi sistem pembangkit listrik tenaga hibrida (*off-grid*) yang paling optimal untuk memenuhi kebutuhan listrik wilayah penelitian. Sistem tersebut terdiri dari beberapa komponen utama yaitu *Generic Flat Plate PV* (panel surya) dengan kapasitas 6.372 kW, *Generic 100 kWh Li-Ion* (baterai) sebanyak 240 string, *Generic Hydro* (PLTMH) dengan kapasitas 100 kW dengan kapasitas aktual turbin sebesar 14,1 kW, serta *Generic Large Free Converter* (inverter) dengan kapasitas 2.430 kW. Konfigurasi ini menunjukkan bahwa sistem didominasi oleh pembangkit berbasis energi surya, sedangkan PLTMH berfungsi sebagai sumber energi pendukung yang bersifat stabil.

3.2.2 Rincian Biaya per Komponen (Cost Summary)

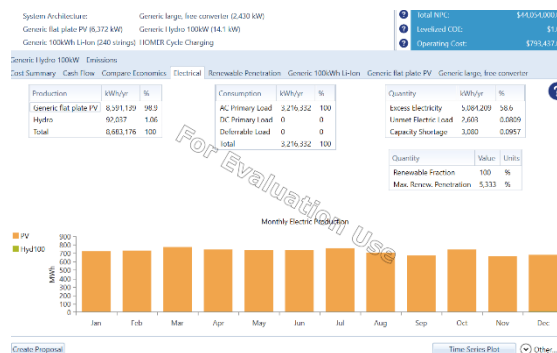


Gambar 4 Hasil Rincian Biaya per Komponen (Cost Summary) Berdasarkan Simulasi Homer

Dari sisi evaluasi ekonomi, hasil simulasi menunjukkan bahwa total Net Present Cost (NPC) sistem adalah sebesar \$44.054.000,00 yang mencakup seluruh biaya investasi awal, penggantian komponen, serta biaya operasional selama periode proyek 25 tahun. Sementara itu, nilai Capital Expenditure (CAPEX) tercatat sebesar \$33.800.000,00 atau setara dengan \$33,8 juta yang merupakan biaya awal pembangunan sistem. Adapun nilai Cost of Energy (COE) yang dihasilkan adalah sebesar \$1,06 per kWh, yang menunjukkan biaya produksi listrik dari sistem hibrida skala besar ini. Selain itu, biaya operasional tahunan sistem mencapai \$793.437,00 per tahun yang digunakan untuk menjaga kinerja seluruh komponen sistem agar tetap optimal.

Berdasarkan rincian biaya per komponen, diketahui bahwa sistem baterai *Generic 100 kWh Li-Ion* memiliki kontribusi biaya terbesar dengan total sebesar \$25.688.880,35 yang terdiri dari biaya modal awal, biaya penggantian, serta biaya operasional dan pemeliharaan. Tingginya biaya ini disebabkan oleh kebutuhan penyimpanan energi yang besar untuk menopang beban malam hari serta menjaga kestabilan sistem. Komponen panel surya memiliki total biaya sebesar \$16.753.328,03, sedangkan PLTMH memiliki total biaya sebesar \$638.180,09. Komponen inverter memiliki total biaya sebesar \$973.615,23. Secara keseluruhan, total pengeluaran bersih sistem mencapai \$44.054.003,70 setelah memperhitungkan nilai sisa (*salvage value*) sebesar \$1.390.024,96 yang sebagian besar berasal dari nilai akhir komponen baterai.

3.2.3 Analisis Produksi Listrik dan Beban (Electrical)



Gambar 5 Hasil Analisis Produksi Listrik dan Beban (Electrical) Berdasarkan Simulasi Homer

Dari aspek performa elektrik, hasil simulasi menunjukkan bahwa total produksi listrik tahunan sistem mencapai 8.683.176 kWh per tahun. Kontribusi terbesar berasal dari panel surya yang menghasilkan 8.591.139 kWh per tahun atau sekitar 98,9% dari total produksi energi, sedangkan PLTMH menghasilkan 92.037

kWh per tahun atau sekitar 1,06% sebagai sumber energi dasar yang stabil. Sementara itu, total konsumsi beban AC primer masyarakat tercatat sebesar 3.216.332 kWh per tahun. Selisih antara produksi dan konsumsi menghasilkan kelebihan energi sebesar 5.084.209 kWh per tahun atau sekitar 58,6%, yang dimanfaatkan untuk pengisian baterai serta potensi pengembangan beban di masa depan.

Dari sisi keandalan sistem, nilai Unmet Electric Load tercatat sebesar 2.603 kWh per tahun atau hanya 0,0809%, sedangkan Capacity Shortage sebesar 0,0957%. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat keandalan yang sangat tinggi karena hampir seluruh kebutuhan energi dapat terpenuhi sepanjang waktu. Selain itu, sistem juga memiliki nilai Renewable Fraction sebesar 100% dengan biaya bahan bakar (fuel cost) sebesar \$0,00, yang menunjukkan bahwa seluruh sistem beroperasi menggunakan energi terbarukan tanpa ketergantungan pada bahan bakar fosil, sehingga bersifat ramah lingkungan dan berkelanjutan.

3.3 Pembahasan Kritis Hasil Simulasi Sistem Hibrida

Hasil simulasi menggunakan HOMER Pro menunjukkan bahwa sistem pembangkit listrik tenaga hibrida berbasis panel surya dan mikrohidro memiliki tingkat keandalan yang sangat tinggi dalam memenuhi kebutuhan energi listrik wilayah penelitian. Dominasi produksi energi oleh panel surya yang mencapai 98,9% mengindikasikan bahwa sistem sangat bergantung pada sumber energi surya sebagai pembangkit utama. Kondisi ini menunjukkan bahwa karakteristik sistem lebih menyerupai sistem fotovoltaik skala besar yang diperkuat oleh sumber energi tambahan berupa mikrohidro, sehingga peran energi air lebih bersifat pendukung kestabilan sistem dibandingkan sebagai sumber utama pembangkitan.

Kontribusi mikrohidro yang hanya sebesar 1,06% menunjukkan bahwa potensi energi air pada lokasi penelitian belum dimanfaatkan secara maksimal dalam konfigurasi sistem yang dihasilkan oleh HOMER. Meskipun mikrohidro beroperasi secara kontinu dan stabil, kapasitas yang relatif kecil menyebabkan kontribusinya terhadap total produksi energi menjadi terbatas. Hal ini mengindikasikan bahwa fungsi utama mikrohidro dalam sistem lebih berperan sebagai penyeimbang beban dasar (*base load support*) dibandingkan sebagai penyedia energi utama.

Tingginya nilai kelebihan energi (*excess electricity*) yang mencapai 58,6% menunjukkan adanya kapasitas pembangkitan yang melebihi kebutuhan beban aktual. Kondisi ini umumnya terjadi pada sistem dengan kapasitas panel surya yang besar untuk menjamin keandalan suplai energi sepanjang tahun. Namun demikian, kondisi tersebut juga menunjukkan adanya ketidakefisienan dari sisi pemanfaatan energi, karena sebagian besar energi yang dihasilkan tidak langsung dikonsumsi oleh beban dan hanya dialihkan ke sistem penyimpanan.

Nilai *Unmet Electric Load* yang sangat rendah, yaitu sebesar 0,0809%, menunjukkan bahwa sistem mampu memenuhi hampir seluruh kebutuhan energi listrik tanpa kegagalan suplai yang signifikan. Meskipun demikian, rendahnya nilai ini juga menunjukkan bahwa sistem dirancang dengan kapasitas berlebih sebagai bentuk konservasi keandalan, sehingga terdapat margin keamanan yang cukup besar dalam desain sistem pembangkitan.

Dari sisi ekonomi, dominasi biaya pada komponen baterai menunjukkan bahwa sistem penyimpanan energi merupakan elemen paling krusial dalam

konfigurasi sistem hibrida ini. Tingginya kebutuhan baterai berkaitan langsung dengan sifat intermiten energi surya serta pola beban harian yang didominasi konsumsi pada malam hari. Oleh karena itu, performa ekonomi sistem sangat dipengaruhi oleh efisiensi, umur siklus, serta biaya penggantian baterai dalam jangka panjang.

Secara keseluruhan, sistem menunjukkan kinerja teknis yang sangat baik dalam aspek keandalan dan keberlanjutan energi karena mampu mencapai tingkat energi terbarukan sebesar 100% tanpa ketergantungan pada bahan bakar fosil. Meskipun demikian, dari perspektif optimasi ekonomi, masih terdapat ruang perbaikan terutama pada pengurangan kapasitas pembangkitan berlebih dan peningkatan strategi manajemen energi agar sistem menjadi lebih seimbang antara aspek keandalan dan efisiensi biaya.

D. KESIMPULAN

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan dan simulasi sistem pembangkit listrik tenaga hibrida berbasis panel surya dan mikrohidro menggunakan perangkat lunak HOMER Pro pada Kecamatan Sianjur Mula-Mula, Kabupaten Samosir, diperoleh bahwa sistem yang dirancang mampu memenuhi kebutuhan energi listrik wilayah dengan tingkat keandalan yang sangat tinggi. Konfigurasi optimal sistem terdiri dari panel surya sebagai sumber energi utama dengan kapasitas 6.372 kW, mikrohidro dengan kapasitas aktual 14,1 kW dari 100 kW terpasang, serta sistem penyimpanan energi berbasis baterai dan konverter sebagai pendukung kestabilan sistem.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa total produksi energi tahunan mencapai 8.683.176 kWh dengan dominasi kontribusi panel surya sebesar 98,9% dan mikrohidro sebesar 1,06%. Sistem juga mampu mencapai tingkat keandalan yang sangat baik dengan nilai Unmet Electric Load sebesar 0,0809% dan Capacity Shortage sebesar 0,0957%, yang menunjukkan bahwa hampir seluruh kebutuhan beban dapat terpenuhi secara kontinu.

Dari sisi ekonomi, sistem memiliki nilai Net Present Cost sebesar \$44.054.000,00 dengan Cost of Energy sebesar \$1,06/kWh. Meskipun nilai investasi relatif tinggi, sistem ini sepenuhnya berbasis energi terbarukan dengan Renewable Fraction mencapai 100% dan tanpa ketergantungan pada bahan bakar fosil, sehingga memiliki nilai keberlanjutan yang tinggi untuk jangka panjang.

4.2 Saran

Pengembangan sistem ke depan disarankan untuk melakukan optimasi ulang terhadap kapasitas panel surya dan baterai agar dapat mengurangi kelebihan energi yang cukup besar pada hasil simulasi. Selain itu, pemanfaatan mikrohidro dapat ditingkatkan melalui kajian teknis lanjutan terhadap potensi debit air musiman agar kontribusinya terhadap sistem dapat lebih optimal.

Penelitian lanjutan juga disarankan untuk mempertimbangkan integrasi sistem dengan jaringan listrik PLN atau penambahan sumber energi alternatif lain guna meningkatkan fleksibilitas dan efisiensi sistem. Selain itu, diperlukan kajian implementasi lapangan untuk memastikan kesesuaian antara hasil simulasi dan kondisi operasional sebenarnya, terutama dalam aspek biaya investasi, performa komponen, dan manajemen energi.

Dengan demikian, sistem pembangkit listrik tenaga hibrida ini memiliki potensi untuk diterapkan sebagai solusi elektrifikasi di daerah terpencil dengan karakteristik sumber daya energi terbarukan yang beragam, meskipun masih memerlukan optimalisasi lebih lanjut dari sisi teknis maupun ekonomis.

E. REFERENSI

- [1] M. K. Al-Rashed, "Optimization of Hybrid Renewable Energy Systems for Rural Electrification using HOMER Pro: A Review of Case Studies," *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, vol. 42, no. 2, pp. 115–132, 2024.
- [2] S. A. Wibowo, T. P. Hidayat, and R. N. Hidayat, "Techno-Economic Analysis of Hybrid Hydro-Solar Power Systems in Off-Grid Areas of Indonesia," *Jurnal Energi Indonesia*, vol. 10, no. 2, pp. 88–102, 2024.
- [3] V. R. T. Manullang, A. Nugroho, and E. W. Sinuraya, "Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Menggunakan Software Homer Di Departemen Teknik Industri Universitas Diponegoro," *Transient Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 9, no. 2, pp. 148–156, 2020.
- [4] Z. Hanafi, "Desain dan Optimasi Sistem Tenaga Hibrida untuk Listrik Rumah Tangga Menggunakan HOMER Pro: Analisis Biaya dan Keberlanjutan," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 3, 2025.
- [5] I. W. B. Saputra, A. I. Weking, and L. Jasa, "Rancang Bangun Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Menggunakan Kincir Overshot Wheel," *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol. 16, no. 2, p. 48, 2017.
- [6] F. I. Prabowo, "Simulation of Micro Hydro Power Generation Using HOMER Software: A Case Study in Sukosari Area," *TESLA: Jurnal Teknik Elektro*, vol. 26, no. 1, 2024.
- [7] B. K. Putra and I. G. N. A. P. E. Wijaya, "Performance Evaluation of Hybrid Solar-Micro-Hydro Power Plants using HOMER Pro Software: A Case Study," *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 19, no. 3, pp. 210–218, 2024.
- [8] M. A. W. Wijaya, "Analisis Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid Piko Hidro-Surya Menggunakan Perangkat Lunak HOMER (Studi Kasus di Sungai Citarum)," 2022.
- [9] L. Zhang, Y. Wang, and F. S. Chen, "Reliability Assessment of Micro-Hydro and Photovoltaic Hybrid Systems in Mountainous Regions," *Renewable Energy Focus*, vol. 50, pp. 12–25, 2025.
- [10] R. B. Prasetyo, F. U. Rahman, and A. B. Muljono, "Desain Sistem Pembangkit Listrik Optimal On-Grid Tenaga Surya, Bayu dan PLTMH Menggunakan Software Homer Di Desa Sesela," *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 5, no. 3, pp. 47–59, 2024.
- [11] D. Y. S. P. Hartono and A. M. H. S. B. T. Putra, "Optimasi Penempatan dan Kapasitas Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida (Surya-Mikrohidro) Menggunakan Algoritma Genetika," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, vol. 12, no. 1, pp. 45–54, 2025.
- [12] R. Syahputra and I. Soesanti, "Renewable energy systems based on micro-hydro and solar photovoltaic for rural areas: A case study in Yogyakarta, Indonesia," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 472–490, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.01.015.

- [13] 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. 1, no. 1, pp. 12–18, 2019.
- [14] S. Situmorang, “Pelatihan Perancangan Dan Analisis Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Menggunakan Perangkat Lunak Homer Di SMK Cinta Rakyat,” *Ikraith-Abdimas*, vol. 5, no. 2, pp. 75–81, 2021.
- [15] M. A. D. Prasetyo, “Perancangan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida Angin-PV di Daerah Puger Menggunakan Perangkat Lunak Homer,” 2015.