

MODEL DAN SIMULASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA *HYBRID* DI KEPULAUAN SIAU SEBAGAI ALTERNATIF ENERGI TERBARUKAN

Ageng Tri Anggito

¹Magister Teknik Elektro, Institut Teknologi PLN, Jakarta, Indonesia
Alamat e-mail : agengtrianggito23@gmail.com

ABSTRACT

This study presents the design and simulation of a hybrid solar power generation system for the Siau Islands in North Sulawesi, Indonesia, which currently relies heavily on costly diesel generators with high carbon emissions. Using PVsyst and HOMER Pro software along with solar radiation data from Meeonorm, five hybrid configurations integrating photovoltaic (PV) systems, diesel generators, and battery energy storage systems (BESS) were evaluated. Simulation results indicate that the optimal configuration—comprising an 8,000 kWp PV system combined with diesel generators and batteries—can reduce fuel consumption by up to 85%, greenhouse xgas emissions by 70%, and energy costs compared to conventional diesel systems. This study demonstrates that hybrid PV systems are a technically and economically viable solution for improving energy sustainability and reliability in remote areas. The proposed model supports Indonesia’s carbon reduction targets and can be replicated in other off-grid regions.

Keywords : Hybrid solar system, photovoltaic (PV), diesel generator, battery storage (BESS), HOMER Pro, renewable energy

ABSTRAK

Penelitian ini merancang dan mensimulasikan sistem pembangkit listrik tenaga surya hibrida untuk Kepulauan Siau, Sulawesi Utara, yang saat ini bergantung pada pembangkit diesel berbiaya tinggi dan beremisi besar. Dengan perangkat lunak PVsyst dan HOMER Pro serta data radiasi matahari dari Meeonorm, dievaluasi lima konfigurasi yang mengintegrasikan fotovoltaiik (PV), generator diesel, dan sistem penyimpanan baterai (BESS). Hasil simulasi menunjukkan konfigurasi optimal dengan kapasitas PV 8.000 kWp, genset diesel, dan baterai mampu menurunkan konsumsi bahan bakar hingga 85%, emisi gas rumah kaca 70%, serta biaya energi dibandingkan sistem diesel konvensional. Studi ini menegaskan kelayakan teknis dan ekonomis sistem PV hibrida untuk meningkatkan keberlanjutan energi di daerah terpencil serta mendukung target pengurangan emisi karbon Indonesia.

Kata Kunci : Sistem surya hibrida, fotovoltaiik (PV), generator diesel, penyimpanan baterai (BESS), HOMER Pro, energi terbarukan

A. Pendahuluan

Indonesia dengan lebih dari 16.000 pulau dan jumlah penduduk lebih dari 281 juta jiwa pada tahun 2024 menghadapi tantangan besar dalam menyediakan infrastruktur energi yang merata, terutama di wilayah kepulauan terpencil (Andréfouët et al., 2022). Meskipun rasio elektrifikasi nasional telah mencapai 99,79% pada tahun 2023 (E6394-Buku-Statistik-Ketenagalistrikan-2023-Esdm-Revised.Pdf, n.d.), bauran energi nasional masih didominasi oleh bahan bakar fosil—batu bara (40,46%), minyak bumi (30,18%), dan gas alam (16,28%)—sementara kontribusi energi baru terbarukan (EBT) baru mencapai 13,09%, jauh dari target 23% pada tahun 2025 (PT PLN (PERSERO), n.d.).

Ketergantungan pada pembangkit berbahan bakar fosil, khususnya PLTD di daerah terpencil, menjadi penyumbang signifikan emisi gas rumah kaca (GRK) nasional. Pada tahun 2019, emisi sektor energi mencapai 638.452 Gg CO₂e, dengan sektor penyedia listrik sebagai kontributor terbesar (Inventarisasi Emisi GRK Bidang Energi, n.d.).

Sebagai bentuk komitmen terhadap Perjanjian Paris, Indonesia menargetkan penurunan emisi hingga 41% pada tahun 2030 melalui berbagai kebijakan, termasuk Peraturan Presiden No. 98 Tahun 2021 dan Permen ESDM No. 16 Tahun 2022 yang menekankan pengendalian dan pemantauan emisi (Permen ESDM No. 16 Tahun 2022, n.d.).

Di Kepulauan Siau, Provinsi Sulawesi Utara, sistem kelistrikan masih sangat bergantung pada PLTD yang berbiaya tinggi dan tidak ramah lingkungan. Padahal, wilayah ini memiliki potensi energi surya yang cukup besar. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem pembangkit listrik *hybrid* berbasis PLTS, genset, dan baterai sebagai solusi untuk meningkatkan akses energi berkelanjutan, mengurangi emisi, serta mendukung target transisi energi nasional (Badan Pusat Statistik, 2021).

Penggunaan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya *Hybrid* (PLTS *Hybrid*) telah menjadi fokus banyak studi dalam merespons isu ketergantungan energi fosil dan

kebutuhan energi berkelanjutan di daerah terpencil. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa sistem *hybrid* dengan kombinasi PV, genset, dan BESS (*Battery Energy Storage System*) dapat meningkatkan efisiensi energi, menurunkan biaya operasional, dan mengurangi emisi GRK.

A. Basit (2020) memodelkan sistem *hybrid* PV-genset biodiesel untuk BTS di daerah terpencil menggunakan HOMER Pro dan menghasilkan sistem optimal berbasis PV 6.59 kWp dan baterai 4.8 kWh. Azizah dan Purbawanto (2021) mengkaji integrasi PLTMH-PLTS sebagai solusi musim kering di Kebumen(A. Basit, 2020). Ragil et al. (2021) memodelkan PLTS *hybrid* skala kampus dengan PVsyst 7.0 dan menghasilkan efisiensi sistem sebesar 67%(Nugroho et al., n.d.).

Studi internasional oleh Afzal Awan et al. (2024) mensimulasikan 979 skenario *hybrid* di Universitas MUST, Pakistan, dan menunjukkan efisiensi tinggi dengan fraksi energi terbarukan mencapai 99%. Sementara itu, Pürlü et al. (2023) membandingkan enam konfigurasi *hybrid* di Turki dan menemukan

bahwa sistem off-grid PV/WT/BESS menghasilkan nol emisi karbon dan 100% energi terbarukan(Mateen et al., 2024).

Penelitian domestik lain oleh Azman dan Sulistiawan (2024) di Pulau Legundi menunjukkan bahwa sistem *hybrid* off-grid mampu menyuplai 296.391 kWh/tahun dan menurunkan konsumsi diesel hingga 79.3%(Azman & Sulistiawan, 2024).

Perbandingan dengan penelitian ini menunjukkan keunikan pendekatan yang digunakan, yaitu kombinasi simulasi PVsyst dan HOMER Pro serta fokus pada wilayah non-interkoneksi seperti Kepulauan Siau.

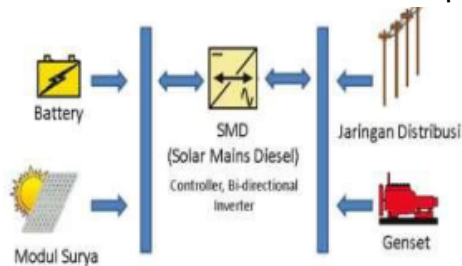
1. Konsep Teknik PLTS Hybrid

PLTS merupakan sistem pembangkitan berbasis teknologi fotovoltaik yang mengubah energi surya menjadi energi listrik DC. Sistem ini dikombinasikan dengan inverter untuk konversi DC ke AC, dan dengan baterai sebagai penyimpan energi. Komponen utama meliputi:

- Modul PV
- Inverter
- BESS
- Power Conditioning System (PCS)

2. Hybrid

Skema sistem PLTS *hybrid* menggambarkan integrasi panel surya fotovoltaik (PV), sistem penyimpanan energi baterai (BESS), dan sumber energi konvensional seperti generator diesel (genset) dalam satu kesatuan sistem pembangkitan. Energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya dapat langsung digunakan untuk memenuhi beban atau disimpan



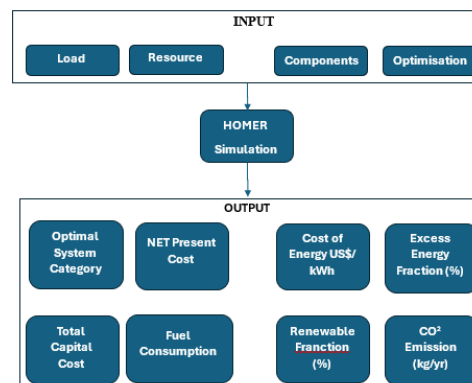
dalam baterai untuk digunakan saat radiasi matahari rendah. Genset berfungsi sebagai sumber cadangan untuk memastikan kontinuitas suplai daya ketika kebutuhan beban melebihi output dari PV dan BESS. Sistem ini dilengkapi dengan pengatur daya (inverter dan controller) untuk mengatur aliran energi antar komponen dan menjaga kestabilan tegangan serta frekuensi dalam sistem kelistrikan (Zhao et al., 2017).

Gambar 1. Skema PLTS *Hybrid*

3. Homer pro

HOMER Energy (*Hybrid Optimization Model for Electric*

Renewables) merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk simulasi dan optimasi sistem pembangkit listrik *hybrid* berbasis energi terbarukan. Platform ini mampu memodelkan sistem stand-alone maupun grid-connected dengan berbagai kombinasi sumber daya seperti panel surya, turbin angin, mikrohidro, genset, fuel cell, baterai, hingga penyimpanan hidrogen. HOMER menghitung keseimbangan energi selama 8.760 jam per tahun untuk



mengevaluasi performa teknis dan biaya operasional sistem. Fitur utama meliputi proses simulation, optimization berdasarkan Net Present Cost (NPC), serta sensitivity analysis terhadap variabel eksternal seperti intensitas radiasi surya. Keunggulannya terletak pada kemudahan penggunaan dan efisiensi analisis ekonomi, meskipun masih terbatas dalam pemodelan sistem fisik

yang sangat kompleks dan teknologi energi tertentu(Zoulikha et al., 2015).

Gambar 2. Arsitektur Homer Pro

4. Emisi

Integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dengan sumber bioenergi seperti biomassa, biogas, atau biodiesel berpotensi signifikan dalam menurunkan emisi gas rumah kaca, khususnya CO₂. Teknologi *hybrid* ini memungkinkan efisiensi energi tinggi dan bahkan mendekati nol emisi jika dikombinasikan dengan teknologi penangkapan karbon. Evaluasi dampak lingkungannya dapat dilakukan menggunakan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA)(San Miguel & Corona, 2014), yang mempertimbangkan berbagai aspek seperti perubahan iklim, toksisitas, dan penggunaan lahan. Penggunaan bahan bakar fosil seperti solar masih menghasilkan emisi signifikan seperti CO, NO_x, SO₂, dan PM, dengan emisi CO₂ mencapai 2,68–2,70 kg/liter. Kebijakan nasional melalui penggunaan biodiesel B30 bertujuan menekan emisi tersebut, meskipun cenderung meningkatkan emisi NO_x (Nina et al., 2021). Penggunaan B30 juga menyebabkan sedikit peningkatan konsumsi bahan

bakar spesifik (SFC), namun tanpa dampak signifikan terhadap keandalan mesin. Standar emisi Tier 3 dari U.S. EPA mengatur batasan ketat untuk CO, NO_x+NMHC, dan PM, mendorong penggunaan teknologi efisiensi tinggi seperti injeksi bahan bakar tekanan tinggi dan EGR. Penerapan sistem PLTS *hybrid* berbasis biodiesel di daerah terpencil memberikan solusi kompromi antara keberlanjutan energi dan kepatuhan terhadap regulasi emisi(Nina et al., 2021).

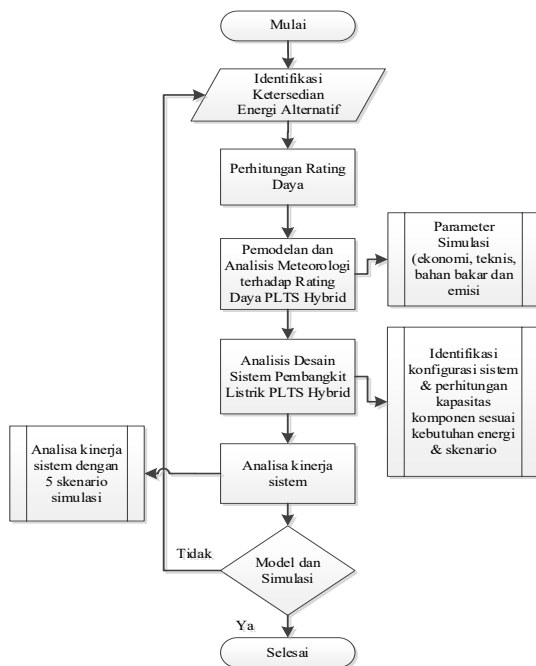
Tabel 1. Ambang batas emisi Tier 3

Kapasitas Mesin	CO (g/kWh)	NO _x + NMHC (g/kWh)	PM (g/kWh)
>1.000 kW	3.5	6.4	0.2

B. Metodologi

1. Desain Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *hybrid* di Kepulauan Siau, Sulawesi Utara. Pendekatan yang digunakan meliputi analisis teknis dan ekonomi terhadap beberapa konfigurasi sistem, dengan mempertimbangkan kondisi geografis, klimatologis, dan beban listrik eksisting. Diagram alur proses penelitian disajikan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

2. Lokasi dan Data Penunjang

Lokasi penelitian adalah Kabupaten Kepulauan Siau Tagulandang Biaro (Sitaro), dengan luas wilayah 3.066,95 km², terdiri dari 9% daratan dan 91% lautan. Data klimatologis diperoleh dari Meteonorm, NASA Surface Meteorology, dan Solar Energy Database, mencakup rata-rata suhu, kecepatan angin, dan tingkat irradiansi. Data beban listrik dan kondisi pembangkit eksisting diperoleh dari BPS dan RUPTL 2021–2030 (P. R. Indonesia, 2007).

3. Perangkat Lunak dan Instrumen Simulasi

Penelitian menggunakan perangkat lunak:

- HOMER Pro: untuk simulasi dan optimasi sistem *hybrid* berdasarkan kriteria teknis dan ekonomi.
- PVsyst: untuk analisis teknis PLTS, termasuk shading dan evaluasi produksi energi.
- Meteonorm & NASA: untuk data iklim dan irradiansi.
- AutoCAD: untuk perancangan tata letak sistem.
- Microsoft Excel: untuk pengolahan dan tabulasi data hasil simulasi.

4. Skenario Simulasi

Simulasi dilakukan terhadap lima konfigurasi sistem PLTS *hybrid*. Masing-masing skenario mengombinasikan pembangkit diesel (genset), sistem fotovoltaik (PV), dan sistem penyimpanan energi baterai (BESS). Tabel 2 menyajikan ringkasan konfigurasi utama setiap skenario, termasuk kapasitas daya, komponen yang digunakan, serta mode operasinya (load following dan cyclic charging).

Tabel 2. Skenario simulasi sistem PLTS *Hybrid*

SK	Genset	PV (kWp)	Baterai (MWh)	Mode Operasi
1	2 unit Genset CAT 1700 kVA	8000	4 string Luna 2000	Cyclic charging dan load Following
2	3 unit Genset CAT 1700, 1700, 725 kW	4800	3 string Luna 2000	Cyclic charging dan load Following
3	2 unit Genset CAT 1700, 250 kW	13.550	89 String Luna 2000	Cyclic charging dan load Following
4	3 unit Genset CAT 1700, 250, 725 kW	10.070	15 String Luna 2000	Cyclic charging dan load Following
5	3 × Genset (1700, 1700, 725 kW)	0	0	Load Following Only

5. Parameter Penilaian

Untuk simulasi biaya dengan perangkat lunak HOMER, umur proyek ditentukan selama 25 tahun penentuan umur proyek ini berdasarkan umur komponen yang terlama sesuai rekomendasi dari software homer yaitu modul PV, sedangkan tingkat bunga sebesar 5,75% berdasarkan keputusan Gubernur BI pada April 2025 (B. Indonesia, 2025) Harga bahan bakar diesel non-subsidi/non-PSO (*public service obligation*) harga pada bulan Desember 2024 sebesar \$0,87 per liter atau sekitar Rp. 14.389 (HIP BBN Biodiesel Desember 2024 Naik Menjadi

Rp14.389 per Liter, 2024) Parameter-parameter lain yang digunakan dalam simulasi ini disajikan pada tabel 3.

Tabel 3. Parameter simulasi sistem
PLTS Hybrid

Parameter	Nilai			
Ekonomi				
Tingkat Bunga	5,75%/ tahun			
Umur Proyek	25 tahun			
Operational Genset (%)	75 - 85			
Teknis	Capital Cost (\$)	Replacement Cost (\$)	O&M Cost (\$)	Life time (year)
CAT 1700 kVA 1360 kW 50 Hz	112.132	100.919	12.8	
CAT 725 kW 50 Hz	59.776	53.799	6.28	
CAT 250 kW 50 Hz	20.613	18.551	2.35	
TenKSolar TKA650M-132BF (PV)	72,78/ unit	65.6/ unit	5/ Hour	25
Ingeteam SUN 1000TL B360 IP54 H1000	12.796 / unit	11.516 / unit	5/ Hour	15
Luna 2000 – 2.0 MWh 2H0	71.348 / unit	57.078 / unit	10/ Hour	5
Random Variability	5 % day to day dan 2 % Timestep			
Bahan Bakar				
Harga Biodiesel	Rp. 14.389 atau \$0.87 (555.Pers/04/SJI/2024)			
Faktor Emisi (Tier3)				
CO	3,5 g/kWh			
UHC	1 g/kWh			
PM	0,02 g/kWh			
NOx	3,5 g/kWh			

Kinerja sistem dianalisis berdasarkan parameter teknis dan ekonomi:

- *Net Present Cost* (NPC): total biaya sepanjang umur proyek dalam satuan dolar masa kini, dihitung menggunakan rumus:

$$C_{NPC} = \sum_{n=0}^{R_{proj}} \frac{FV_n}{(1+i)^n} \quad (1)$$

- *Cost of Energy* (COE): biaya rata-rata produksi listrik per kWh:

$$COE = \frac{C_{ann,tot}}{E_{served}} \quad (2)$$

- Biaya Tahunan (C): diperoleh dari hasil simulasi HOMER melalui:

$$C_{ann} = CRF(i, R_{proj}) \cdot C_{NPC} \quad (3)$$

Simulasi juga mempertimbangkan parameter lingkungan seperti emisi CO₂ dan konsumsi bahan bakar diesel. Analisis sensitivitas dilakukan untuk

C. Hasil dan Pembahasan

1. Evaluasi Keteknikan Sistem PLTS Hybrid

Analisis awal dilakukan terhadap profil beban harian Kepulauan Siau dengan beban puncak sebesar 3.527 kW dan beban rata-rata 2.491,8 kW, menghasilkan faktor beban 0,71. Data iradiasi surya menunjukkan rata-rata 4,88 kWh/m²/hari (NASA), yang memungkinkan integrasi optimal PLTS.

Simulasi dilakukan pada lima konfigurasi sistem pembangkit *hybrid* yang melibatkan kombinasi PLTS,

BESS, dan genset diesel. Parameter teknis dan ekonomi dimasukkan ke dalam perangkat lunak HOMER Pro, dengan masa proyek 25 tahun dan tingkat bunga 5,75%.

2. Analisis Hasil Simulasi Sistem

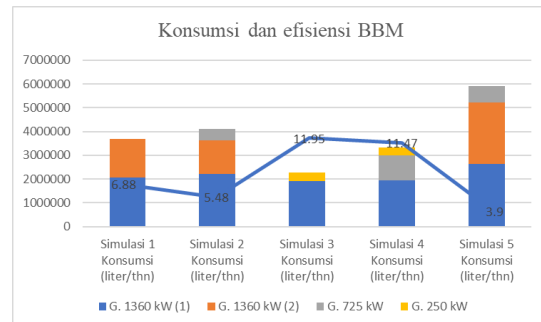
a. Komposisi Sistem dan Kinerja Energi

Simulasi I (PLTS 8000 kW, dua genset CAT 1700 kVA, dan BESS) menunjukkan hasil paling optimal, dengan biaya energi (COE) sebesar \$0.172/kWh dan *Net Present Cost* (NPC) \$60,2 juta. Skenario ini menghasilkan 25.335 MWh/tahun, dengan kontribusi PV sebesar 43%.

Skenario III menghasilkan produksi energi tertinggi (27.359 MWh/tahun) dengan kontribusi PV sebesar 67%, tetapi mencatat nilai *unmet load* tertinggi (14.911 kWh/tahun) dan NPC tertinggi (\$100,6 juta), menunjukkan ketidakseimbangan antara kapasitas PV dan penyimpanan.

Skenario V (tanpa PV dan BESS) menjadi baseline eksisting, menghasilkan biaya operasional dan emisi tertinggi, dengan total konsumsi biodiesel 5.920.073 liter/tahun dan emisi NOx sebesar 86.490 kg/tahun.

Tabel 4. Data Hasil Simulasi Homer
Pro



Item	SK I	SK II	SK III	SK IV	SK V
Operating Cost (\$)	3.6 juta	3,8 juta	5,7 juta	3,9 juta	5,4 juta
NPC (\$)	60,2 juta	63,5 juta	100,8 juta	64,8 juta	87 juta
COE (\$)	0.172	0.180	0.287	0.185	0.248
Total Konsumsi Biodiesel (liter/per tahun)					
Generator CAT 1700 kVA (1)	2,1 juta	2,2 juta	1,9 juta	1,9 juta	2,6 juta
Generator CAT 1700 kVA (2)	1,6 juta	1,4 juta			2,58 juta
Generator CAT 725 kW		481,6 ribu		1 juta	697,4 ribu
Generator CAT 250 kW			359,2 ribu	343,4 ribu	
Total	3,6 juta	4,1 juta	2,3 juta	3,3 juta	5,9 juta
Waktu Operasi Pembangkit (jam/tahun)					

Generator CAT 1700 kVA (1)	6,560	6,963	5,729	5,772	8,760
Generator CAT 1700 kVA (2)	5,345	4,920			8,758
Generator CAT 725 kW		2,877		5,679	4,123
Generator CAT 250 kW			5,494	5,258	
PV	4,354	4,354	4,354	4,354	
Total Produksi Energi Listrik (kWh/ tahun)					
Genset	14,5 juta	16 juta	9 juta	12,9 juta	23 juta
PV	10,8 juta	6,5 juta	18,3 juta	13,6 juta	
Kontribusi PV	42,7 %	28,7 %	67 %	51,3 %	0%
Kelebihan Energi Listrik (kWh/ tahun)					
Unmet load/	32,40		14,911	7,278	0
Emisi					
CO (kg/tahun)	6,920	7,164	4,648	5,328	10,279
UHC (kg/tahun)	994	1,012	561	626	1,452
PM (kg/tahun)	994	998	561	595	1,431
Nitrogen oksida, NOx (kg/tahun)	53,224	60,230	34,733	51,225	86,490

b. Efisiensi Konsumsi BBM

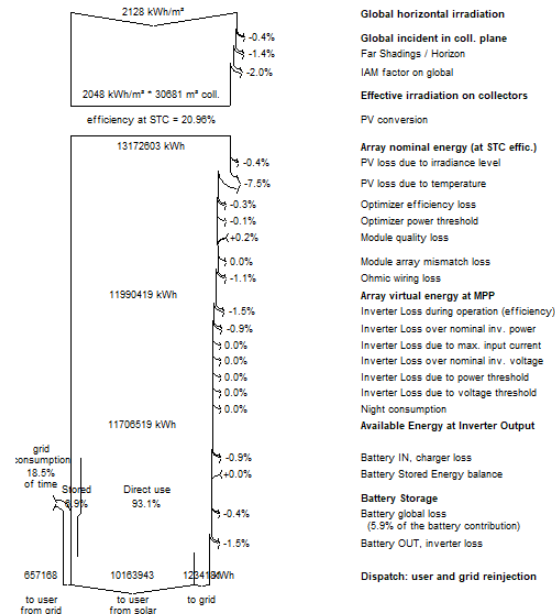
Efisiensi tertinggi dicapai pada Skenario III (11,95 kWh/liter), namun dibarengi *unmet load* tinggi. Skenario I dan II lebih seimbang dengan efisiensi 6,88 dan 5,48 kWh/liter, dan keandalan tinggi (*unmet load* ≈ 0).

Gambar 4. Konsumsi dan Efisiensi BBM

c. Emisi dan Keberlanjutan

Skenario V menghasilkan emisi tertinggi untuk CO (10.279 kg/tahun)

dan NO_x (86.490 kg/tahun), sementara Skenario III mencatat emisi terendah karena dominasi energi PV. Seluruh skenario bebas dari emisi CO₂ dan SO₂ karena penggunaan



biodiesel B30.

Penerapan teknologi mitigasi seperti *Diesel Particulate Filter* (DPF) dan *Selective Catalytic Reduction* (SCR) direkomendasikan untuk mengurangi PM dan NO_x, terutama pada skenario berbasis genset dominan.

Tabel 5. Emisi PLTS Hybrid

Polutan	Thresh old	SK 1	SK 2	SK 3	SK 4	SK 5
CO (g/l)	3,5	0,48	0,44	0,51	0,41	0,45
UHC (g/l)	1,0	0,07	0,06	0,06	0,05	0,06
PM (g/l)	0,02	0,07	0,06	0,06	0,05	0,06
NO _x (g/l)	3,5	3,67	3,74	3,85	3,96	3,75

3. Simulasi PV Syst dan Kinerja Teknis PLTS

Dengan PVsyst 7.4, skenario I sebagai baseline dari semua parameter sistem PLTS 8 MWp dan 8 MWh (BESS) disimulasikan menggunakan 9.877 unit PV dan 7 inverter. Rata-rata kinerja energi tercatat 5,07 kWh/kWp/hari, dengan *Performance Ratio* (PR) 0,838.

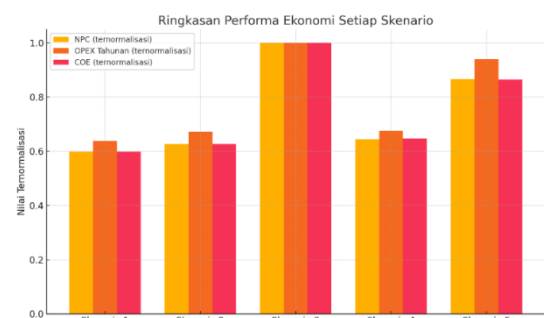
Faktor kerugian tertinggi berasal dari temperatur modul (7,5%), disusul *shading* dan *losses* sistem lainnya. Produksi listrik bulanan tertinggi terjadi pada September (5,52 kWh/kWp/hari), sejalan dengan GHI maksimum pada Agustus.

Gambar 5. Diagram Loss PLTS Hybrid 8 MWh

4. Analisis Ekonomi

a. Net Present Cost dan COE

Skenario I menunjukkan performa paling ekonomis (NPC: \$60,2 juta, COE: \$0.172/kWh). Sebaliknya,



skenario berbasis genset penuh (Skenario V) mencatat COE tertinggi \$0.248/kWh, tidak ekonomis untuk jangka panjang.

Gambar 6. Performa ekonomi pada setiap skenario

b. Rekomendasi Konfigurasi

Optimal

Skenario I dan II direkomendasikan untuk implementasi di Kepulauan Siau, mempertimbangkan efisiensi, emisi, biaya, dan keandalan sistem. Skenario V hanya layak sebagai cadangan darurat karena emisi dan biaya tinggi.

D. Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis performa teknis dan ekonomis dari lima konfigurasi sistem pembangkit listrik *hybrid* berbasis PLTS, BESS, dan genset di Kepulauan Siau. Hasil simulasi menggunakan HOMER Pro dan PVsyst menunjukkan bahwa integrasi PLTS secara signifikan dapat mengurangi konsumsi bahan bakar fosil dan emisi gas buang.

Skenario 1, yang mengkombinasikan PLTS berkapasitas 8 MWp, dua unit genset besar, dan sistem baterai, memberikan hasil paling optimal

dengan biaya energi (COE) terendah sebesar \$0,172/kWh, efisiensi konsumsi bahan bakar 6,88 kWh/liter, dan tingkat keandalan sistem mendekati 100%. Selain itu, emisi polutan seperti CO, UHC, PM, dan NOx juga berada pada level terendah dibandingkan skenario lain.

Sebaliknya, skenario yang sepenuhnya bergantung pada genset (Skenario 5) menghasilkan konsumsi bahan bakar dan emisi tertinggi, serta biaya operasional yang tidak ekonomis. Simulasi PVsyst juga memperkuat temuan bahwa potensi energi surya di wilayah ini cukup tinggi, dengan rata-rata produksi listrik 5,07 kWh/kWp/hari dan performance ratio sebesar 0,838.

Dengan mempertimbangkan aspek teknis, ekonomis, dan lingkungan, maka konfigurasi Skenario 1 dapat direkomendasikan sebagai solusi pembangkitan energi berkelanjutan di wilayah kepulauan terpencil. Implementasi sistem ini perlu didukung dengan perencanaan teknis yang matang, pemilihan teknologi yang tepat, serta kebijakan energi yang mendukung transisi menuju sumber energi terbarukan.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Basit. (2020). *UNIVERSITAS INDONESIA*. Universitas Indonesia.
- Andréfouët, S., Paul, M., & Farhan, A. R. (2022). Indonesia's 13558 islands: A new census from space and a first step towards a One Map for Small Islands Policy. *Marine Policy*, 135, 104848. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104848>
- Azman, N., & Sulistiawan, R. (2024). Design and performance evaluation of an off-grid hybrid solar system in a remote location: A case study of Legundi Island. *MethodsX*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102716>
- Badan Pusat Statistik. (2021). *Hasil Sensus Penduduk Provinsi Sulawesi Utara Tahun 2020*. e6394-buku-statistik-*ketenagalistrikan-2023-esdm-revised.pdf*. (n.d.).
- HIP BBN Biodiesel Desember 2024 Naik Menjadi Rp14.389 per Liter. (2024, December 10). Media Center ESDM. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/hip-bbn-biodiesel-desember-2024-naik-menjadi-rp14389-per-liter#:~:text=JAKARTA-Kementerian Energi dan Sumber,per liter ditambah ongkos angkut.>
- Indonesia, B. (2025). *BI-Rate*. Bank Indonesia. <https://www.bi.go.id/id/statistik/indikator/bi-rate.aspx>
- Indonesia, P. R. (2007). *UU Nomor 15 Tahun 2007 Pembentukan Kabupaten Kepulauan Siau Tagulandang Biaro di Provinsi Sulawesi Utara*.
- Inventarisasi Emisi GRK Bidang Energi*. (n.d.).
- Mateen, M., Awan, A., & Abbas, S. M. (2024). *Selecting the system Site load Calculation*. 43(4), 130–139.
- Nina, K. S., Suntoro, D., Irsyad, M. I. Al, Zulkarnain, Widhiatmaka, Srikandi, G. P., Khaldun, T., Fauzi, Anggarani, R., & Faridha. (2021). Performance and emission effects of biodiesel 30% (B30) usage in oil-fired power plants and gas engine power plants. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 749(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/749/1/012056>
- Nugroho, R. A., Winardi, B., & Sudjadi, D. (n.d.). *PERANCANGAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) HYBRID DI GEDUNG ICT UNIVERSITAS DIPONEGORO MENGGUNAKAN SOFTWARE PVSYST 7.0* (Vol. 10, Issue 2). <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/transient>
- Permen ESDM No. 16 Tahun 2022*. (n.d.). <https://peraturan.bpk.go.id/Detail/142322/permen-esdm-no-16-tahun-2019>
- PT PLN (PERSERO). (n.d.). www.pln.co.id

- San Miguel, G., & Corona, B. (2014). Hybridizing concentrated solar power (CSP) with biogas and biomethane as an alternative to natural gas: Analysis of environmental performance using LCA. *Renewable Energy*, 66, 580–587.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.023>
- Zhao, Y., Hong, H., Jin, H., & Li, P. (2017). Thermodynamic mechanism for hybridization of moderate-temperature solar heat with conventional fossil-fired power plant. *Energy*, 133, 832 – 842.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.069>
- Zoulikha, M.-R., Thierry, M., Jean-Michel Qiuyu, Z., Nouviaire, A., & Sid-Ahmed, R. (2015). Combined steam-explosion toward vacuum and dilute-acid spraying of wheat straw. Impact of severity factor on enzymatic hydrolysis. *Renewable Energy*, 78, 516–526.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.038>