

## **Kajian Pemanfaatan Potensi Energi Baru Terbarukan Setempat Untuk Meningkatkan Bauran Energi Baru Terbarukan di Pulau Pusong, Nangroe Aceh Darussalam**

**Mujammil Asdhiyoga Rahmanta<sup>1</sup>; Prasetyo Adi Wibowo<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> PT. PLN (Persero) Puslitbang Ketenagalistrikan

<sup>1</sup> [mujammil1@pln.co.id](mailto:mujammil1@pln.co.id)

### **ABSTRACT**

*The hybrid power system (HPS) is used to reduce the use of fossil energy and take advantage of the potential for renewable energy (RE), especially in remote locations. HPS utilizes RE as the main energy source combined with a diesel engine as a backup energy source. Pusong Island, located in Langsa Regency, Nangroe Aceh Darussalam (NAD) Province, is an isolated area that uses generator unit as a source of power generation. The purpose of this study is to identify potential renewable energy sources (wind and solar) and develop a design and analysis of the economic feasibility of HPS in the area. The design & analysis of Hybrid Power Plants is carried out using the Hybrid Optimization Model of Electric Renewables (HOMER Energy) simulation. This system is a combination of Wind/PV/Diesel, battery, DC/DC converter, and DC/AC inverter. The simulation results show that the optimal configuration is 520 kW PV, 500 kW PV inverter, 2.7012 battery units, 100 kW diesel generator and 125 kW two-way inverter. The configuration has a Cost of Energy (COE) value of 0.125 \$/kWh and a Total Net Present Cost (NPC) of 0.973 million \$. This configuration can reduce the use of fuel oil by 94%.*

**Keywords:** Hybrid Power System, Cost of Energy, HOMER Energy

### **ABSTRAK**

*Sistem pembangkit listrik tenaga hibrida (PLT Hibrid) digunakan untuk mengurangi penggunaan energi fosil dan memanfaatkan potensi energi baru terbarukan (EBT), terutama di lokasi terpencil. SPLTH memanfaatkan EBT sebagai sumber energi utama yang dikombinasikan dengan generator mesin diesel sebagai sumber energi cadangan. EBT berasal dari energi matahari dan energi angin di lokasi setempat. Pulau Pusong terletak di Kabupaten Langsa, Provinsi Nangroe Aceh Darussalam (NAD) merupakan daerah terisolir yang menggunakan unit genset. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi potensi sumber energi terbarukan (angin dan matahari) dan mengembangkan desain serta analisis kelayakan ekonomi SPH di wilayah tersebut. Perancangan & analisis kelayakan PLT Hibrid dilakukan dengan menggunakan simulasi Hybrid Optimization Model of Electric Renewables (HOMER Energy). Sistem ini merupakan kombinasi dari Wind/PV/Diesel, baterai, DC/DC converter, dan DC/AC inverter. Hasil simulasi menunjukkan konfigurasi optimal adalah PV 520 kW, Inverter PV 500 kW, 2.7012 unit baterai, 100 kW diesel generator dan 125 kW inverter bi-directional. Konfigurasi tersebut memiliki nilai biaya energi sebesar 0,125 \$/kWh dan Total Biaya Bersih Sekarang sebesar 0,973 Juta \$. Konfigurasi ini dapat menekan penggunaan Bahan Bakar Minyak sebesar 94%. Simulasi sensitivitas menunjukkan bahwa nilai COE paling dipengaruhi oleh biaya PV, dan radiasi matahari.*

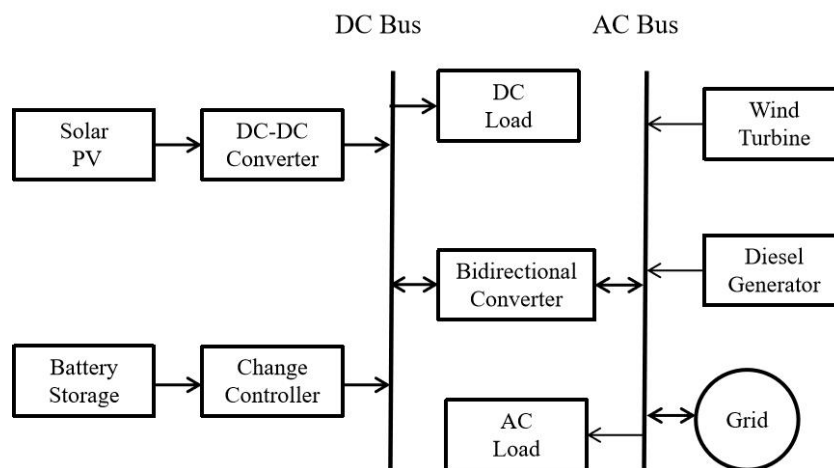
**Kata kunci:** Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid, Biaya Energi, HOMER Energi

## 1. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki potensi untuk mengembangkan pembangkit listrik berbasis energi terbarukan. Salah satunya adalah pemanfaatan energi matahari melalui pembangkit listrik tenaga surya photo voltaic (PV). Berdasarkan data, rata-rata penyinaran matahari di Indonesia bagian barat adalah 4,5 kWh/m<sup>2</sup> per hari dengan deviasi bulanan 10%, dan Indonesia bagian timur adalah 5,1 kWh/m<sup>2</sup> per hari dengan deviasi bulanan 9%. [1]. Rasio Elektrifikasi pada tahun 2018 telah mencapai 98,30 % [2] dan meningkat menjadi 99,90 % pada tahun 2019 dengan kontribusi dari energi terbarukan yang terus meningkat [2].

Sistem pembangkit listrik tenaga hibrida (SPLTH) adalah pembangkit listrik yang terdiri dari lebih dari 1 jenis generator yang menggabungkan beberapa sumber energi terbarukan dengan atau tanpa sumber energi tidak terbarukan [3]. SPLTH umumnya bertujuan untuk menggabungkan dua atau lebih sumber energi (sistem pembangkit) sehingga dapat menutupi kelemahan satu sama lain untuk mencapai keandalan pasokan dan efisiensi ekonomi pada beban tertentu. Umumnya sistem ini dikombinasikan dengan baterai sebagai sistem penyimpanan energi untuk mengantisipasi pola intermitten intrinsik dari pembangkit tenaga surya dan angin [4, 5]. Sistem ini merupakan sistem pembangkit alternatif yang cocok untuk daerah yang mengandalkan sumber energi Bahan Bakar Minyak (BBM) yang mahal karena biaya transportasinya dan tidak terjangkau oleh jaringan listrik skala besar [6].

Sistem kelistrikan yang terpencil atau terisolasi memerlukan pendekatan tekno-ekonomi yang baik untuk mendapatkan konfigurasi yang optimal. Optimasi diperlukan untuk meminimalkan total biaya. [7]. SPLTH berguna untuk membuat sistem hibrida yang berdiri sendiri, terutama di daerah terpencil, dan hanya mengandalkan energi BBM [8].



**Gambar 1.** Konfigurasi SPLTH

Komponen yang menyusun SPLTH meliputi pembangkitan (fosil atau terbarukan), sistem kontrol, baterai, dan beban seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Sistem PV mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik. Energi radiasi ditransfer melalui foto efek langsung ke elektron dalam kristal PV mereka. Radiasi matahari sangat berpengaruh pada sistem PV [9]. Salah satu parameter yang paling dibutuhkan untuk membuat sistem PV adalah nilai radiasi matahari global tahunan (kWh/m<sup>2</sup>/d). Dalam kondisi ideal atau Standard Test Conditions (STC), faktor kualitas (Q) adalah rasio keluaran energi aktual yang diukur pada keluaran sistem ( $E_{load}$ ) terhadap energi keluaran teoritis ( $E_{th}$ ).

$$Q = E_{load} / E_{th}$$

□ □ □

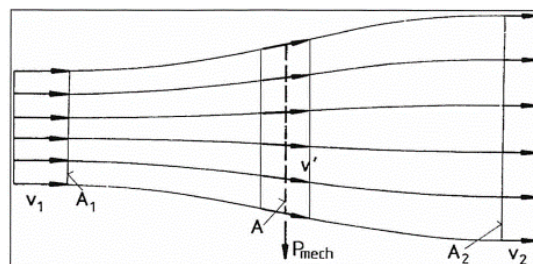
Dengan  $Q$  = faktor kualitas sistem,  $E_{load}$  = energi keluaran listrik aktual [kWh] dan  $E_{th}$  = energi keluaran teoritis dari sistem [kWh]. Sedangkan ukuran sistem PV didefinisikan sebagai  $P_{peak}$  atau daya maksimum yang dapat dibangkitkan oleh rangkaian sistem PV.

$$P_{peak} = (E_{load} \cdot I_{stc}) / (E_{glob} \cdot Q) \quad \square \quad (2) \square$$

Dimana  $P_{peak}$  = daya puncak di bawah STC [kWp],  $E_{load}$  = energi keluaran listrik nyata [kWh/a],  $I_{stc}$  = radiasi matahari di bawah STC [1 kW/m<sup>2</sup>],  $E_{glob}$  = radiasi matahari global tahunan [kWh/m<sup>2</sup>/a] dan  $Q$  = faktor kualitas sistem.

Array PV adalah kumpulan beberapa modul PV yang terhubung secara seri atau paralel. Intensitas radiasi matahari, material PV, hambatan listrik beban, temperatur panel PV, dan bayangan merupakan faktor yang sangat mempengaruhi kinerja panel PV [10].

Turbin Angin memanfaatkan angin atau energi kinetik untuk menggerakkan motor sehingga dapat berputar dan menghasilkan listrik [11]. Memutar rotor menghasilkan perubahan kecepatan angin dalam arah tangensial, yang menghasilkan pengurangan jumlah total energi yang dapat diekstraksi dari angin. Teori batas Betz menjelaskan bagaimana energi angin dapat diubah menjadi bentuk energi lain [12]. Kondisi aliran udara melalui rotor dapat diilustrasikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kondisi aliran udara [12]

Energi mekanik yang diambil dari angin per satuan waktu didasarkan pada perubahan kecepatan, yang dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$P = 1/2 \cdot \rho \cdot A_1 \cdot v_1^3 - 1/2 \cdot \rho \cdot A_2 \cdot v_2^3 \quad \square \square \square$$

Dimana  $P$  adalah daya (Watt),  $\rho$  adalah densitas udara (kg/m<sup>3</sup>),  $A_1$  adalah luas penampang aliran sebelum melalui rotor (m<sup>2</sup>),  $A_2$  adalah luas penampang aliran setelah melalui rotor (m<sup>2</sup>),  $v_1$  adalah kecepatan aliran sebelum melalui rotor (m/s), &  $v_2$  adalah kecepatan aliran setelah melalui rotor (m/s).

Diesel Generator berfungsi sebagai pembangkit listrik cadangan ketika sistem SPLTH antara matahari & angin tidak dapat menghasilkan listrik untuk memenuhi kebutuhan beban. Spesifikasi generator disesuaikan dengan kebutuhan beban untuk menghindari tegangan rendah. Kontroler PV digunakan untuk mengatur tegangan dari PV yang masuk ke baterai. *Inverter/System Controller* adalah rangkaian elektronika daya yang digunakan untuk mengubah tegangan searah (DC) menjadi tegangan bolak-balik (AC) [3].

HOMER adalah singkatan dari *Hybrid Optimization Model of Electric Renewable*, alat populer untuk merancang sistem energi terbarukan. Menurut gambar 3, HOMER Energy mensimulasikan dan mengoptimalkan sistem pembangkit listrik baik yang berdiri sendiri maupun yang terhubung ke jaringan dengan kombinasi turbin angin, PV, mikrohidro, biomassa, generator (diesel/bensin), turbin mikro, sel bahan bakar, baterai, dan penyimpanan hidrogen. Ini melayani beban listrik dan termal. [14].

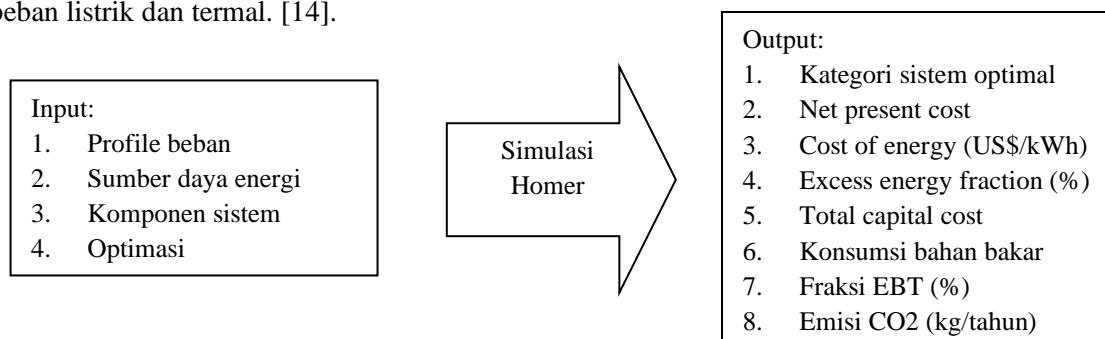
Total Net Present Cost (NPC) adalah nilai semua biaya yang dikeluarkan dalam hidup, nilai sekarang dari semua pendapatan yang diperoleh selama hidup. Biaya modal, biaya penggantian,

biaya O&M, biaya emisi, biaya pembelian daya dari jaringan listrik adalah beberapa biaya yang diperhitungkan. Sedangkan nilai sisa dan pendapatan dari penjualan tenaga listrik ke jaringan listrik termasuk dalam pendapatan [15]. Jumlah semua biaya tahunan untuk setiap komponen sistem, ditambah biaya tahunan, adalah Total Biaya Tahunan. Hal ini perlu dilakukan karena HOMER menggunakan nilai ini untuk menghitung Cost Of Energy (COE) dan Net Present Cost (NPC). Biaya Penggantian Tahunan adalah nilai tahunan dari semua biaya penggantian yang terjadi selama umur sistem dikurangi nilai sisa pada akhir periode proyek. Capital Recovery Factor adalah rasio yang digunakan untuk menghitung nilai sekarang dari suatu anuitas (serangkaian arus kas tahunan) [16].

Biaya operasi dan pemeliharaan sistem adalah biaya tahunan yang dikeluarkan sesuai dengan ukuran atau konfigurasi sistem pembangkit. Biaya ini digunakan untuk menghitung biaya modal tahunan lainnya, yang juga mempengaruhi total biaya sekarang bersih dari setiap sistem. Level Cost of Energy (LCOE) didefinisikan sebagai biaya rata-rata per kWh Produksi Energi Listrik yang digunakan oleh sistem [17]. Analisis sensitivitas membantu mengungkapkan seberapa sensitif output terhadap perubahan input. Dalam analisis sensitivitas, pengguna HOMER biasanya memasukkan beberapa nilai untuk variabel tertentu. Pada tahap ini, HOMER mengulangi proses optimasi untuk setiap nilai variabel dan melihat bagaimana hasilnya terpengaruh. Beberapa parameter yang dianalisis secara ekonomis antara lain biaya modal awal, biaya tahunan, dan konsumsi bahan bakar, biaya listrik (COE), biaya sekarang bersih (NPC), periode modal yang dibutuhkan, dan dihasilkan oleh sistem per kWh [18].

Desa Sebotok yang terletak di Kecamatan Labuhan Badas, Kabupaten Sumbawa, Provinsi Nusa Tenggara Barat merupakan daerah terisolir yang menggunakan 4 unit genset sebagai sumber pembangkit listriknya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi potensi sumber energi terbarukan (angin dan matahari) dan mengembangkan desain dan analisis kelayakan ekonomi HPS di wilayah tersebut.

HOMER adalah singkatan dari Hybrid Optimization Model of Electric Renewable, alat populer untuk merancang sistem energi terbarukan. Menurut gambar 3, HOMER Energy mensimulasikan dan mengoptimalkan sistem pembangkit listrik baik yang berdiri sendiri maupun yang terhubung ke jaringan dengan kombinasi turbin angin, PV, mikrohidro, biomassa, generator (diesel/bensin), turbin mikro, sel bahan bakar, baterai, dan penyimpanan hidrogen. Ini melayani beban listrik dan termal. [14].



**Gambar 3.** Struktur simulasi & optimasi HOMER [13]

Total Net Present Cost (NPC) atau total biaya bersih sekarang adalah nilai semua biaya yang dikeluarkan dalam hidup, nilai sekarang dari semua pendapatan yang diperoleh selama hidup.

Biaya modal, biaya penggantian, biaya operasi & pemeliharaan (*operation & maintenance*) atau disingkat O&M, biaya emisi, biaya pembelian daya dari jaringan listrik adalah beberapa biaya

yang diperhitungkan. Sedangkan nilai sisa dan pendapatan dari penjualan tenaga listrik ke jaringan listrik termasuk dalam pendapatan [15]. Jumlah semua biaya tahunan untuk setiap komponen sistem, ditambah biaya tahunan, adalah Total Biaya Tahunan. Hal ini perlu dilakukan karena HOMER menggunakan nilai ini untuk menghitung Cost Of Energy (COE) atau biaya energy dan Net Present Cost (NPC) atau biaya saat ini. Biaya Penggantian Tahunan adalah nilai tahunan dari semua biaya penggantian yang terjadi selama umur sistem dikurangi nilai sisa pada akhir periode proyek. Capital Recovery Factor adalah rasio yang digunakan untuk menghitung nilai sekarang dari suatu anuitas (serangkaian arus kas tahunan) [16].

Biaya operasi dan pemeliharaan sistem adalah biaya tahunan yang dikeluarkan sesuai dengan ukuran atau konfigurasi sistem pembangkit. Biaya ini digunakan untuk menghitung biaya modal tahunan lainnya, yang juga mempengaruhi total biaya sekarang bersih dari setiap sistem. Level Cost of Energy (LCOE) didefinisikan sebagai biaya rata-rata per kWh Produksi Energi Listrik yang digunakan oleh sistem [17]. Analisis sensitivitas membantu mengungkapkan seberapa sensitif output terhadap perubahan input. Dalam analisis sensitivitas, pengguna HOMER biasanya memasukkan beberapa nilai untuk variabel tertentu. Pada tahap ini, HOMER mengulangi proses optimasi untuk setiap nilai variabel dan melihat bagaimana hasilnya terpengaruh. Beberapa parameter yang dianalisis secara ekonomis antara lain biaya modal awal, biaya tahunan, dan konsumsi bahan bakar, biaya listrik (COE), biaya sekarang bersih (NPC), periode modal yang dibutuhkan, dan dihasilkan oleh sistem per kWh [18].

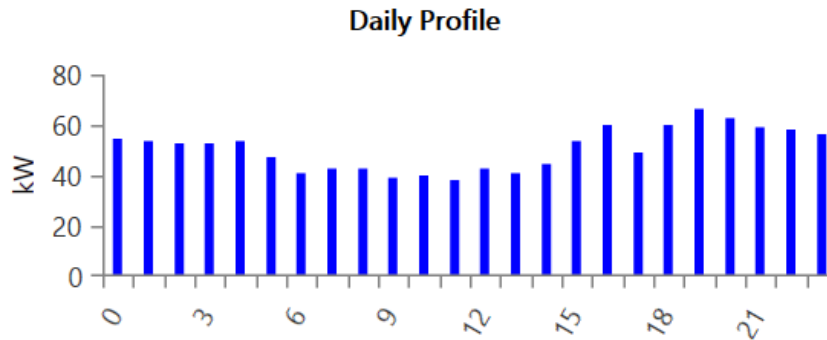
Kajian ini mengambil lokasi di Pulau Pusong yang terletak di Kabupaten Langsa Provinsi Nangroe Aceh Darussalam (NAD) merupakan daerah 3T (Terluar, Terdepan, Tertinggal). Lokasi tersebut tidak rencana ada Interkoneksi, karena merupakan sistem isolated kepulauan dan tidak benefit untuk dibangun interkoneksi kabel laut. Pulau tersebut disuplai unit PLTD milik PLN ULP

Langsa yang beroperasi selama 24 jam dengan kapasitas 2x125kW. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi potensi sumber energi terbarukan (angin dan matahari) dan mengembangkan desain dan analisis kelayakan ekonomi HPS di wilayah tersebut.

## **2. METODE PENELITIAN**

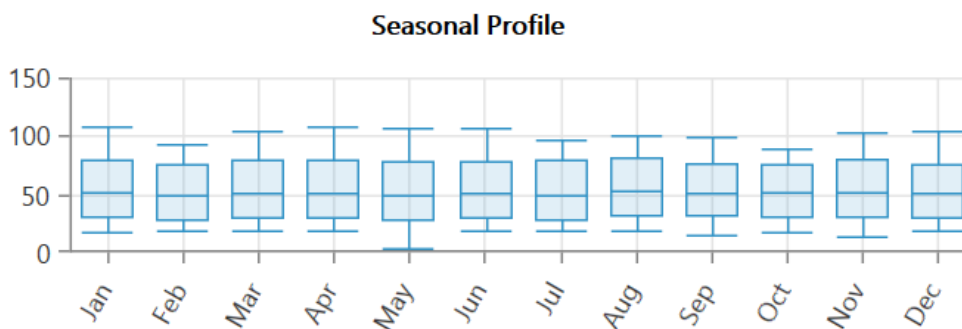
Langkah pertama penelitian adalah melakukan studi pustaka dan mencari data terkait kondisi eksisting dan potensi energi terbarukan di daerah tersebut. Kondisi kelistrikan daerah tersebut berkaitan dengan profil beban dan kondisi sistem yang diperoleh dari PT. PLN (Persero) Unit Induk Wilayah Aceh. Sedangkan data potensi energi matahari (solar radiation) & angin diperoleh dari National Aeronautics and Administration (NASA) yang terkoneksi dengan HOMER. Persiapan pemodelan HOMER dilakukan dengan merancang desain sistem kelistrikan eksisting dengan menambahkan komponen pembangkit tenaga surya & angin, baterai, inverter, dan sistem kontrol. Pada tahap ini juga dilakukan pencarian & verifikasi data teknis & ekonomi untuk setiap komponen sistem. Tahap selanjutnya adalah simulasi optimasi konfigurasi HPS dengan HOMER untuk meminimalkan NPC & cost of energy (COE). Hasil simulasi kemudian dianalisis dan didiskusikan.

## 2.1. Profil Beban



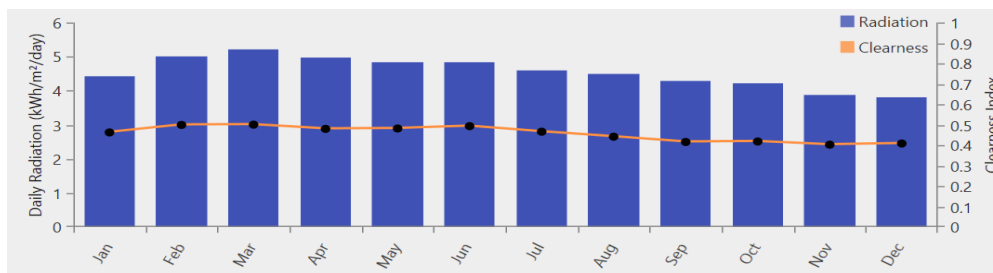
**Gambar 4.** Profil beban harian [19]

Gambar 4 & 5 di atas merupakan profil beban ketenagalistrikan harian dan tahunan di Pulau Pusong. Rata-rata beban adalah sebesar 50,58 kW dengan nilai faktor kapasitas sebesar 47%.



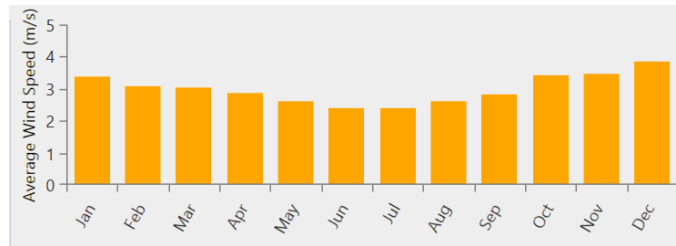
**Gambar 5.** Profil beban tahunan

## 2.2. Potensi EBT



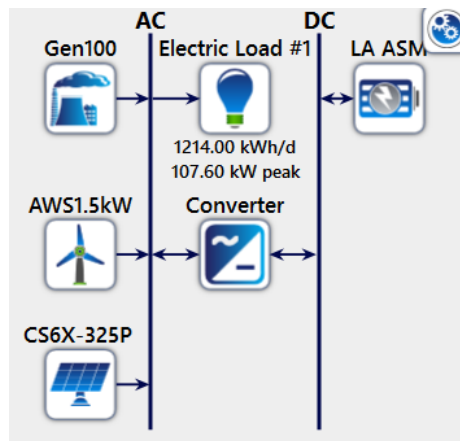
**Gambar 6.** Grafik radiasi matahari di Pulau Pusong

Data Surface Meteorology and Solar Energy (SMSE) dari National Aeronautics and Administration (NASA) digunakan sebagai sumber informasi tentang radiasi matahari, kecepatan angin, dan suhu permukaan di lokasi penelitian. Basis data SMSE NASA berasal dari parameter meteorologi dan energi matahari yang direkam selama 22 tahun oleh lebih dari 200 satelit. Akurasi data berkisar antara 6-12%. Gambar 6 menunjukkan radiasi surya di lokasi tersebut dengan nilai rata-rata sebesar 4,55 kWh/m<sup>2</sup>/hari. Sementara itu grafik kecepatan angin di lokasi tersebut terlihat pada gambar 7 dengan nilai rata-rata sebesar 2,99 m/s.



**Gambar 7.** Grafik kecepatan angin di Pulau Pusong

### 2.3. Desain PLT Hibrid



**Gambar 8.** Diagram blok dari pembangkit PV, Angin, & Mesin diesel di PLT Hibrid

Setelah mengetahui profil beban dan potensi energi terbarukan di Pulau Pusong, selanjutnya menentukan model konfigurasi sistem pembangkit hybrid. Gambar 8 adalah desain skema untuk sistem pembangkit hybrid. Sebotok merupakan area yang tidak terhubung dengan grid, sehingga simulasi tidak memodelkan grid. Sistem ini merupakan kombinasi dari PV/Angin/Diesel, bank baterai, konverter AC/DC, dan inverter DC/AC.

### 2.4. Komponen Sistem

Komponen sistem berasal dari database HOMER. Modul PV yang digunakan adalah tipe CanadianSolar MaxPower CS6X-325P dengan rating kapasitas 530 kWp. Biaya yang dikeluarkan untuk pembelian dan penggantian panel surya ini adalah \$550 per kWp dan biaya operasi dan perbaikannya adalah \$11 per tahun/kWp dengan masa pakai 25 tahun. Turbin angin yang digunakan adalah jenis Australian Wind and Solar (AWS) - HC 1,5 kW. Biaya awal dan penggantian untuk turbin angin ini adalah \$3.600 per unit dan biaya operasi dan pemeliharaan sebesar \$100 per tahun/unit.

Baterai dihubungkan secara seri untuk mendapatkan kapasitas energi yang sesuai dengan kebutuhan Anda. Baterai yang digunakan adalah jenis Lead Acid dengan kapasitas 1,03 kWh dan tegangan 2V. Biaya yang diperlukan untuk membeli dan mengganti baterai ini adalah \$150 per unit dan biaya operasi dan perbaikan \$15 per tahun/unit. Konverter yang digunakan memiliki kapasitas ruang pencarian 5 -15 kW yang dapat beroperasi hingga 10 tahun. Biaya awal dan penggantian yang diperlukan untuk jenis inverter ini adalah \$1.000 per kW dan biaya operasi dan perbaikannya adalah \$10 per tahun/kW. Mesin diesel menggunakan kapasitas 100 kW yang disesuaikan dengan kondisi eksisting. Biaya investasi awal dan biaya penggantian mesin diesel secara berurutan sebesar

US \$4.500 serta biaya operasi dan pemeliharaan US \$0,6/jam operasi. Harga bahan bakar minyak disesuaikan dengan harga di Pulau Pusong yaitu US \$0,65/liter.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah mengetahui kondisi kelistrikan, profil beban, dan potensi energi terbarukan di Pulau Pusong, selanjutnya ditentukan model konfigurasi PLT Hibrid yang optimal. Konfigurasi sistem diurutkan berdasarkan total biaya sekarang bersih (TNPC). Selanjutnya, model akan dioptimasi untuk menentukan nilai optimal untuk setiap kapasitas komponen sistem yang dapat memenuhi tuntutan beban dan batasan yang diberikan. Output dari proses optimasi ini adalah daftar sistem yang layak dengan biaya terendah. Terakhir, HOMER akan melakukan optimasi efek perubahan yang tidak pasti pada variabel input seperti kecepatan angin, radiasi matahari, dan tingkat suku bunga sehingga dapat dihitung hasil optimasinya.

HOMER dapat memodelkan dua strategi pengiriman, yaitu, mengikuti beban (load following/LF) dan pengisian siklus (cycle charging/CC). Dalam penelitian ini, kedua mode tersebut digunakan untuk mendapatkan hasil yang optimal. Strategi LF memungkinkan generator menghasilkan daya untuk memenuhi kebutuhan beban. LF cenderung menjadi strategi yang optimal karena produksi energi terbarukan seringkali melebihi kebutuhan beban. Sedangkan pada CC, jika diperlukan generator maka generator akan beroperasi pada kapasitas penuh dan kelebihan daya akan disalurkan untuk pengisian bank baterai.

#### 3.1. Hasil Optimasi

**Tabel 1.** Model konfigurasi dari pembangkit PV, Angin, & Mesin diesel di PLT Hibrid

No.	Konfigurasi Komponen						
	CS6X-325P	CS6X-325P Inv	AWS 1 kW	Diesel Gen	LA ASM	Converter	Dispatch
	kW	kW	kW	kW	kW	kW	
1	520	500		100	2.712	125	LF
2	520	500	1	100	2.712	125	LF
3				100	2.712	100	CC
4			1	100	2.712	100	CC
5	530	500	337	100	2.760	125	CC

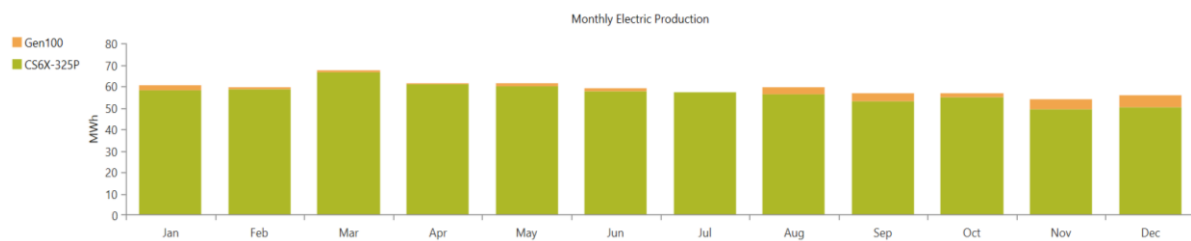
Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak HOMER menghasilkan 5 (lima) model konfigurasi sistem yang mampu memenuhi kebutuhan beban di Pulau Pusong sebesar 85.450 kWh/tahun. Konfigurasinya dapat dilihat pada tabel 1.



**Tabel 2.** Hasil optimasi dari beberapa model konfigurasi PLT Hibrid

No.	NPC	COE	Operating cost	Initial capital	RE Fraction	Total Fuel
	\$	\$	\$	\$	%	lt/tahun
1	973.952	0,125	29.27	459.358	94,00	8.331
2	978.461	0,126	29.32	462.985	94,10	8.208
3	2.01 M	0,256	106.90	135.702	0	134.734
4	2.02 M	0,259	106.85	135.702	0	134.452
5	2.64 M	0,339	68.06	1.44 M	100,00	0

Tabel 2 diatas memperlihatkan hasil optimasi kapasitas dan biaya yang dibutuhkan untuk masing-masing konfigurasi PLT Hibrid untuk memenuhi kebutuhan listrik di Pulau Pusong. Konfigurasi PLTH yang paling optimal yang memiliki nilai COE terendah adalah konfigurasi nomor 1 dengan solar PV, baterai dan diesel (tanpa turbin angin). Konfigurasi ini menghasilkan nilai COE sebesar \$ 0,125/kWh dan total NPC sebesar \$ 973.952. Sedangkan konfigurasi nomor 5 dengan solar PV, baterai, dan turbin angin menghasilkan COE tertinggi dibandingkan seluruh konfigurasi PLTH yaitu sebesar \$ 0,339/kWh dan total NPC sebesar \$ 2.64M dengan kebutuhan solar sebanyak 0 liter/tahun yang artinya konfigurasi ini menggunakan energi EBT 100%.

**Gambar 9.** Produksi listrik rata-rata bulanan

Total produksi listrik tahunan dari hasil sistem optimasi sebesar 709.379 kWh/tahun dengan komposisi produksi listrik yang dihasilkan oleh 96,3% (682.893 kWh/tahun) oleh PV, 3,73% (26.486 kWh/tahun) oleh generator diesel.

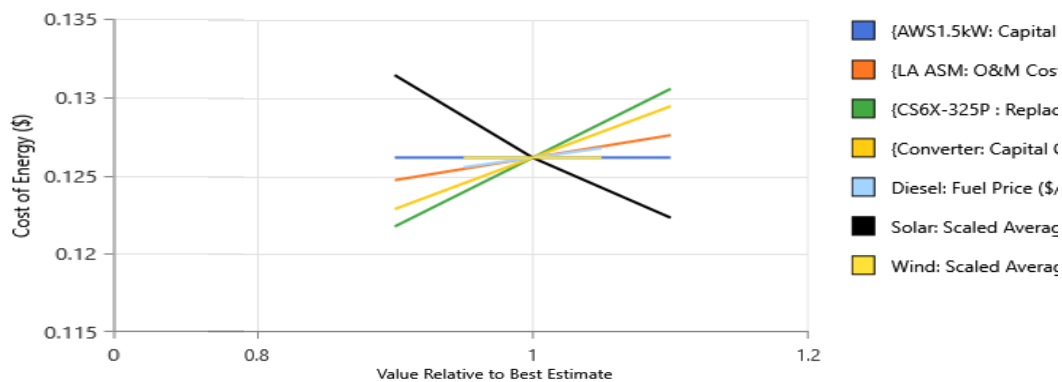
**Tabel 3.** Ringkasan biaya komponen PLT Hibrid

No.	Komponen	Total (\$)	Porsi
1	CanadianSolar MaxPower CS6X-32P	343,709	35.29%
2	CS6X-32P Dedicated Converter	83,165	8.54%
3	Generic 100kW Fixed Capacity Genset	105,448	10.83%
4	Generic 1kWh Lead Acid (ASM)	112,188	11.52%
5	Other	72,751	7.47%
6	System Converter	256,688	26.36%

Tabel di atas menunjukkan bahwa komponen modul PV menyumbang biaya terbesar sekitar 35%. Sedangkan biaya mesin diesel hanya menyumbang sekitar 8,5 % biaya tetapi secara operasi menyumbang biaya yang mahal terkait dengan penggunaan BBM.

### 3.2 Analisis Sensitifitas

Pada simulasi ini terdapat 6 parameter yang divariasikan yaitu harga bahan bakar minyak, radiasi matahari, kecepatan angin, biaya investasi awal, biaya penggantian dan biaya O&M. Pada Grafik spiderplot pada Gambar 10 menggambarkan sebesar apa sensitif COE terhadap enam variabel tersebut. Enam parameter tersebut divariasikan 10% kebawah dan keatas. Radiasi matahari sangat berpengaruh terhadap COE, penurunan tingkat radiasi akan meningkatkan COE secara signifikan (dikompensasikan ke pemakaian BBM di mesin diesel). Sementara itu penurunan biaya investasi awal, biaya penggantian dan biaya O&M akan menurunkan COE, sebaliknya peningkatan biaya tersebut akan meningkatkan COE.



**Gambar 10.** Grafik sensitivitas komponen PLT Hibrid

## 4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan data dan analisis hasil simulasi pemodelan oleh software HOMER, maka dapat disimpulkan bahwa PLT Hibrid menjadi alternatif solusi dalam memenuhi kebutuhan listrik Pulau Pusong dengan konfigurasi paling optimal solar PV, baterai, diesel dan tanpa turbin angin. Konfigurasi ini menghasilkan nilai COE dan total NPC yang paling rendah yaitu \$0,125/kWh dan \$973.952 dengan konfigurasi 520 kW PV, 500 kW PV inverter, 2.712 unit baterai dan 125 kW inverter bi-directional. Konfigurasi ini dapat mengurangi biaya bahan bakar minyak sebesar 93,9% dari konsumsi mesin diesel generator. COE sangat sensitif dengan variabel iradian matahari. □

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini sepenuhnya dibiayai oleh PT. PLN (Persero).

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Handayani, N.A, et all, "Potency of Solar Energy Applications in Indonesia", International Journal of Renewable Energy Development (IJRED). 2012
- [2] PT PLN (Persero), "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2019-2028", 2019.
- [3] Lazarov VD, Notton G, Zarkov Z, and Bochev I, "Hybrid power systems with renewable energy sources types, structures, trends for research and development". In: Proc of International Conference ELMA, 2005, pp. 515–20.
- [4] Polimeni, S., Moretti, L., Manzolini, G., Leva, S., Meraldi, L., and Raboni, P. "Numerical and experimental testing of predictive EMS algorithms for PV-BESS residential microgrid".

- In Proceedings of the 2019 IEEE Milan PowerTech, Milano, Italy, 23–27 June 2019, 2009, pp. 1–6.
- [5] Leva, S.; Zaninelli, D. “Hybrid renewable energy-fuel cell system: Design and performance evaluation”. *Electr. Power Syst. Res.*, 2009, pp. 316–324.
- [6] A R Syarifah, A G Abdullah, D L Hakim, and A B D Nandiyanto, “Design of Hybrid Power System for Remote Area”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 288, 2017.
- [7] Razak, J.A., Sopian, K., Nopiah, Z.M., Zaharim, A., and Ali, Y., “Optimal operational strategy for hybrid renewable energy system using genetic algorithms” , *Applied Mathematics*, 2007, pp. 29–31.
- [8] Agustin, J.L.B., Lopez, R.D., “Simulation dan Optimization of Stand-Alone Hybrid Renewable Energy Systems”, *Renewable dan Sustainable Energy Reviews* , 13, 2009, pp. 2111–2118.
- [9] Kaiser, R., “Sizing photovoltaic systems”. In: *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems: Course book for the seminar: Photovoltaic Systems*, Freiburg, 1995, pp. 403–440.
- [10] Venkateswari, R., and Sreejith, S., “Factors Influencing the Efficiency of Photovoltaic System”. *Renew. Sustain. Energy Rev.* ,2019, pp. 376–394.
- [11] Alex Kalmikov and Katherine Dykes, “Wind Power Fundamentals”, *MIT Wind Energy Group & Renewable Energy Projects in Action*, MIT
- [12] P. Thomas D., “Handbook of Weather, Climate, and Meteorology Aspect”. *John Wiley & Sons, Inc*, 2005.
- [13] Fung, C. C., W. Rattanongphisat and C. Nayar, “A Simulation Study on the Economic Aspects of Hybrid Energy Systems for Remote Islands in Thailand”, *Proceedings of 2002 IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering* 3(3):1966-1969, 2002.
- [14] Georgilakis, P.S., “State-of-the-art Of Decision Support Systems For The Choice Of Renewable Energy Sources For Energy Supply In Isolated Regions”, *International Journal of Distributed Energy Resources*, ISSN. 1614-7138, Vol. 2 Number 2, 2006, pp. 129–150.
- [15] Kanata, S., “Kajian Ekonomis Pembangkit Hybrid Renewable Energi Menuju Desa Mandiri Energi di Kabupaten Bone-Bolango”, *Jurnal Rekayasa Elektrika*, Vol. 11, No.3, 2015, pp. 114–122.
- [16] Mukhtaruddin, R. N. S. R., Rahman, H.A and Hasan, M.Y., “Economic Analysis of Grid-Connected Hybrid Photovoltaic-Wind System in Malaysia”, *Centre of Electrical Energy System, Universiti Teknologi, Malaysia*, ISBN. 978-1-4673-4430-2/13/IEEE. 2013.
- [17] Laksmhi, M.V.S., Babu, C.S. and Prasad, S., “Design of off-grid homes with Renewable energy sources”, *Third International Conference on Sustainable Energy and Intelligent System*, Chennai and Vivekanandha College of Technology for women, Dept. of EEE, Regency Institute of Technology, India, 2012.
- [18] Setiawan, A.A., Zhao, Y., and Nayar, C.V., “Design, Economic Analysis dan Environmental Considerations of Mini-Grid Hybrid Power System with Reverse Osmosis Desalination Plant for Remote Areas”, *Renewable Energy*, 34 , 2009, pp. 374 – 383.
- [19] PT. PLN (Persero) Unit Induk Wilayah Aceh, “Data Operasional 2019”, 2019.