

**OPTIMALISASI DESAIN SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA HYBRID DIESEL GENERATOR – PHOTOVOLTAIC ARRAY
MENGUNAKAN HOMER
(STUDI KASUS : DESA SIRILOGUI, KABUPATEN KEPULAUAN MENTAWAI)**

Dewi Purnama Sari¹, Refdinal Nazir²

¹Mahasiswa Program Studi S2 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Andalas

²Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Andalas

e-mail : dpurnamasari88@yahoo.co.id

Abstrak—Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid merupakan salah satu solusi untuk mengatasi kekurangan pasokan listrik di daerah tertinggal dan terisolir yang tidak terjangkau oleh jaringan listrik PLN, dikarenakan daerah tertinggal pada umumnya memiliki letak geografi dan topografi yang tidak memungkinkan adanya perluasan jaringan listrik PLN. Integrasi dua pembangkit listrik yaitu pembangkit listrik tenaga konvensional (*diesel generator*) yang bersumber dari bahan bakar minyak (BBM) dengan pembangkit listrik yang bersumber dari energi terbarukan (*photovoltaic array*) merupakan suatu solusi yang menguntungkan untuk memenuhi kebutuhan beban listrik harian di daerah terpencil seperti Desa Sirilogui yang terletak di Kecamatan Siberut Utara Kabupaten Kepulauan Mentawai, karena dengan integrasi *diesel generator-photovoltaic array* ini dapat memberikan solusi penerangan 24 jam bagi 310 kepala keluarga (KK) di Desa Sirilogui yang pada mulanya hanya menikmati penerangan selama 4 jam, itupun hanya di malam hari yaitu dari pukul 18.00-22.00 WIB yang bersumber dari 3 unit *diesel generator*. Dengan adanya integrasi dua pembangkit listrik ini, pengoperasian *diesel generator* dapat diminimalisir sehingga menghemat pemakaian BBM dan mengurangi emisi CO₂ yang ditimbulkan akibat pengoperasian *diesel generator*. Penelitian ini memfokuskan pembahasan mengenai Optimalisasi Desain Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Diesel Generator-Photovoltaic Array dengan menggunakan HOMER sebagai alat bantu simulasinya. HOMER merupakan perangkat lunak yang dipergunakan untuk membantu menyederhanakan tugas *modeler* dalam mengevaluasi desain sistem pembangkit listrik tenaga *hybrid* yang memungkinkan dengan mengurutkan berdasarkan pada *total net present cost* (TNPC) terendah untuk mendapatkan sistem yang paling optimal. Pada penelitian ini, hasil desain untuk sistem dengan beban listrik harian sebesar 479,280 kWh yang paling optimal berdasarkan hasil simulasi menggunakan HOMER yaitu *photovoltaic* berkapasitas 65 kW, 3 unit *diesel generator* masing-masing berkapasitas 15 kW, 156 unit *battery* dan *bidirectional converter* berkapasitas 78 kW dengan TNPC sebesar \$ 1.362.474 dan *cost of energy* (COE) sebesar 1,485 \$/kWh. Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Diesel Generator-Photovoltaic Array diusulkan dapat mengurangi emisi CO₂ 0,06% per tahun dibandingkan dengan penggunaan *diesel generator* saja.

Kata Kunci: Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid, Diesel Generator, Photovoltaic Array, HOMER, Optimalisasi, TNPC

Abstract—Hybrid Power Plant is one of the solutions to overcome the shortage of electricity in underdeveloped and isolated areas not covered by PLN electricity network, due to underdeveloped regions generally have the geography and topography that does not allow for expansion of PLN electricity network. Integration of the two power plants is a conventional power plant (*diesel generator*) that comes from fuel oil (BBM) with power plants sourced from renewable energy (*photovoltaic arrays*) is an advantageous solution to meet the needs of daily electricity load in remote areas such as the Village Sirilogui located in the District of North Siberut Mentawai Islands, because the integration of photovoltaic arrays diesel generator can provide 24 hour lighting solution for 310 households (families) in the village Sirilogui which at first only enjoy the lighting for 4 hours, and even then only at night days, from 06.00 to 10.00 pm o'clock sourced from 3 units of diesel generator. With the integration of these two power plants, diesel generator operation can be minimized so it saves fuel consumption and reduce CO₂ emissions caused by the operation of the diesel generator. This study focuses the discussion on Design Optimization of Hybrid Power Plant System Diesel Generator-Photovoltaic Array by using HOMER as a tool for simulation. HOMER software is used to help simplify the task of the *modeler* in evaluating the design of hybrid power plant system that allows to sort based on the total net present cost (TNPC), the lowest for the most optimal system. In this

study, the results of the design for the system with the daily electricity load of 479,280 kWh most optimal based on the simulation results using HOMER ie photovoltaic capacity of 65 kW, 3 units of diesel generators with a capacity of each 15 kW, 156 units of battery and bidirectional converter with a capacity of 78 kW TNPC amounted to \$ 1.362.474 and the cost of energy (COE) of \$ 1,485/kWh. Hybrid Power Plant System Diesel Generator-Photovoltaic Array proposed can reduce CO₂ emissions by 0,06% per year compared with the use of diesel generators only.

Keywords: Hybrid Power Plant, Diesel Generator, Photovoltaic Array, HOMER, Optimization, TNPC

I. PENDAHULUAN

Sirilogui adalah desa yang berada di Kecamatan Siberut Utara, Kepulauan Mentawai, Propinsi Sumatera Barat, Indonesia. Untuk menempuh perjalanan ke Desa Sirilogui ini harus melewati jalur laut dengan menggunakan kapal NADE ke Sikabalu kemudian disambung lagi dengan menggunakan kapal boat. Lamanya perjalanan menuju desa ini yaitu selama 11 jam dengan jarak tempuh 150 km. Desa Sirilogui terdiri dari 3 Dusun yaitu Dusun Muara, Dusun Tugu dan Dusun Sitangaik. Secara geografis, Desa Sirilogui terletak antara 1°13'01,8"LS dan 99°01'11,1"BT dengan luas wilayah desa sekitar 81,87 km²[1],[2].

Untuk melayani kebutuhan akan penerangan listrik, penduduk Desa Sirilogui mengandalkan *diesel generator* berukuran 3 × 15 kVA, masing-masing 15 kVA digunakan untuk tiap-tiap dusun yang ada di desa ini. *Diesel generator* ini merupakan bantuan dari PNPM-MP pada tahun 2011[2]. Karena lokasi Desa Sirilogui ini begitu jauh maka ketersediaan bahan bakar solar pun langka, sehingga harganya menjadi sangat mahal. Harga bahan bakar solar yang begitu mahal menyebabkan pengoperasian *diesel generator* ini hanya digunakan untuk melayani penerangan di malam hari saja yaitu dari pukul 18.00-22.00 WIB dengan beban puncak sebesar 32,125 kW. Apabila *supply* listrik dari *diesel generator* terputus, maka tidak ada listrik sama sekali di desa tersebut.

Dampak dari pengoperasian yang tidak efisien ini menyebabkan biaya untuk operasi dan pemeliharaan *diesel generator* akan menjadi semakin meningkat, terutama biaya bahan bakar minyak (BBM)nya. Oleh karena itu, untuk mengurangi penggunaan BBM pada *diesel generator* tersebut maka perlu dilakukan perubahan pola operasional *diesel generator* dari *diesel generator* tunggal menjadi pembangkit listrik tenaga *hybrid* agar *performance* dari *diesel generator* menjadi optimal.

Karena Desa Sirilogui ini merupakan daerah yang memiliki intensitas cahaya matahari yang cukup tinggi yaitu 4,8 kWh/m²/hari[3] sehingga dengan demikian integrasi yang tepat dengan *diesel generator* untuk dijadikan PLTH adalah *photovoltaic array*. Dengan pola hunian penduduk yang terpusat di desa ini maka desa ini berpotensi untuk dipasangkan *photovoltaic array* komunal (terpusat) sebagai pembangkit listrik tambahan yang bersumber dari energi terbarukan.

Pemodelan desain menggunakan perangkat lunak adalah pilihan yang dapat mempermudah modeler dalam menganalisa sistem yang diinginkan. Penelitian ini menggunakan perangkat lunak HOMER sebagai alat bantu simulasi dan untuk mendesain sistem PLTH serta dapat membantu pemilihan desain sistem yang optimal berdasarkan aspek ekonomi, seperti biaya awal, biaya operasional dan perawatan (O&M) dan biaya bersih sekarang (NPC)[4].

II. TINJAUAN PUSTAKA

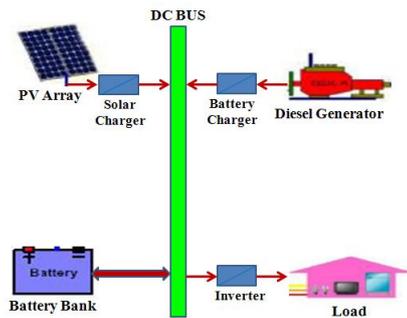
2.1. Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid

Pembangkit listrik tenaga *hybrid* merupakan integrasi dari dua atau lebih pembangkit listrik dengan sumber energi yang berbeda[5]. Dalam penelitian ini integrasi pembangkit listrik yang dipilih adalah pembangkit listrik konvensional yang berbahan bakar fosil dengan pembangkit listrik berbasis energi terbarukan.

2.1.1. Konfigurasi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid

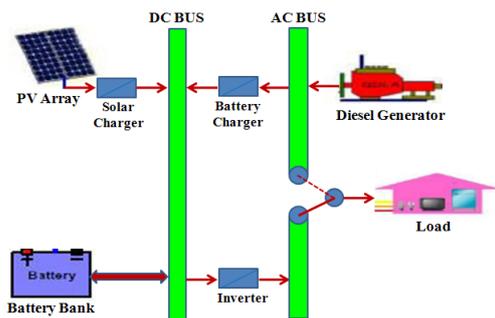
Sistem pembangkit listrik tenaga *hybrid*[6],[7] terbagi atas 3 konfigurasi yaitu:

A. Sistem Hybrid Seri



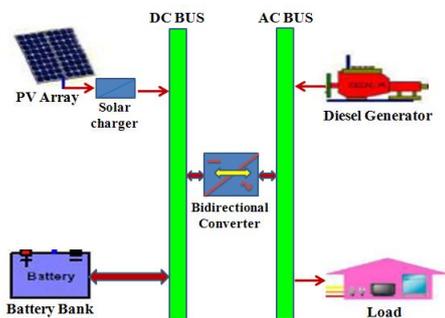
Gambar 1. Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Sistem Seri[6],[7]

B. Sistem Hybrid Switch



Gambar 2. Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Sistem Switch[6],[7]

C. Sistem Hybrid Paralel



Gambar 3. Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Sistem Paralel[6],[7]

Keuntungan menggunakan konfigurasi sistem pembangkit listrik tenaga hybrid adalah[7],[8]:

1. Beban dapat dipenuhi secara optimal
2. Efisiensi *diesel generator* tinggi

3. Ukuran *diesel generator* dan komponen lain dapat diminimalisir sehingga mengurangi biaya investasi
4. Mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar minyak bumi
5. Keandalan dan efisiensi sistem akan meningkat
6. Meningkatkan waktu layanan listrik secara ekonomis
7. Mengurangi emisi dan polusi
8. Meningkatkan umur operasi sistem
9. Biaya operasional dan maintenance relatif murah
10. Biaya produksi energi listrik atau *Cost of Energy* (Rp/kWh) per tahun relatif murah.

2.2. Komponen-komponen Pendukung Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Diesel Generator-Photovoltaic Array

A. Diesel Generator

Diesel generator adalah suatu pembangkit listrik yang terdiri dari kombinasi mesin diesel dengan generator listrik (*alternator*) yang berfungsi untuk menghasilkan energi listrik. *Diesel generator* biasanya digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik dengan pemakaian beban dalam jumlah kecil atau dapat berfungsi sebagai *backup* apabila pembangkit listrik utama tidak mampu melayani *supply* daya ke beban dan sebagai cadangan untuk melayani beban di waktu puncak pemakaian tenaga listrik oleh konsumen.

Diesel generator juga merupakan salah satu pembangkit listrik yang menjadi solusi untuk melayani *supply* daya listrik di daerah tertinggal dan terisolir yang tidak mendapat jangkauan listrik.

B. Photovoltaic Array

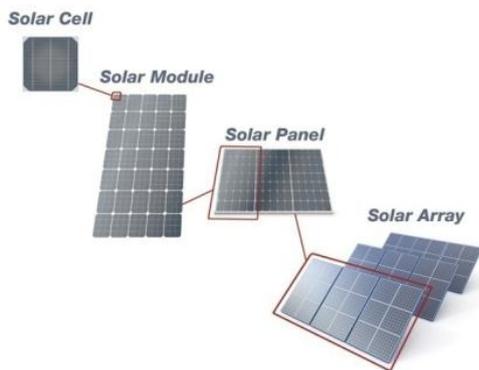
Photovoltaic array merupakan suatu teknologi pembangkit listrik yang mengkonversikan energi foton dari surya menjadi energi listrik[9],[10]. Proses konversi ini terjadi pada modul surya yang terdiri dari sel-sel surya. Berdasarkan teknologi pembuatannya, sel surya dapat dibagi dalam tiga jenis, yaitu[11]:

- a. *Monocrystalline Solar Cell*
- b. *Polycrystalline Solar Cell*
- c. *Thin Film Solar Cell* (TFSC)

Dalam penelitian ini, jenis modul surya yang digunakan adalah *monocrystalline solar cell*.

Monocrystalline solar cell dipilih karena memiliki efisiensi paling tinggi dibandingkan dengan jenis sel surya lainnya, sekitar 15%-20%. Tenaga listrik yang dihasilkan oleh satu sel surya sangat kecil sehingga beberapa sel surya harus digabungkan untuk membentuk suatu modul surya.

Berikut ini merupakan susunan sel surya hingga membentuk suatu array.



Gambar 4. Diagram hubungan sel surya, modul, panel, array[12]

Beberapa faktor yang mempengaruhi pengoperasian maksimum modul surya yaitu[13]:

1. Temperatur
2. Intensitas Cahaya Matahari
3. Orientasi Rangkaian Modul Surya
4. Sudut Orientasi Matahari (*tilt angle*)

Untuk penentuan besar kapasitas terpasang yang dibangkitkan oleh *photovoltaic array* maka digunakan persamaan-persamaan berikut ini:

a. Luas area *photovoltaic array*

$$\text{Area array} = \frac{E_L}{G_{av} \cdot \eta_{PV} \cdot TCF \cdot \eta_{output}} \quad (1)$$

b. Daya yang di bangkitkan *photovoltaic array*

$$P_{\text{Watt peak}} = \text{Area array} \cdot PSI \cdot \eta_{PV} \quad (2)$$

c. Jumlah modul surya yang dibutuhkan

$$\text{Jumlah modul surya} = \frac{P_{\text{Watt peak}}}{P_{MPP}} \quad (3)$$

Dimana:

- E_L = pemakaian energi (kWh/hari)
- G_{av} = insolasi harian rata-rata matahari (kWh/m²/hari)
- η_{PV} = efisiensi modul surya (%)

- TCF = *temperature correction factor*
- η_{output} = efisiensi *output* dari modul surya (%)
- PSI = *peak solar insolation* adalah 1000 W/m²
- $P_{\text{Watt Peak}}$ = daya yang dibangkitkan (Wp)
- P_{MPP} = daya maksimum modul surya (W)

C. Battery Bank

Battery (aki) adalah sebagai penyimpan energi listrik yang diisi oleh aliran DC dari modul *photovoltaic*. Ukuran kapasitas *battery* dinyatakan dengan satuan *Ampere-hours* (Ah)[13]. Pada penelitian ini, jenis *rechargeable battery* yang digunakan adalah *lead acid battery*. *Battery* dalam penggunaannya sebagai sumber pembangkit tenaga listrik biasanya hanya sekitar 20%-30%. Hal ini dikarenakan *battery* merupakan sumber pembangkit tenaga listrik yang tidak bisa dipakai selama 24 jam karena harus mengalami fase *charging* dan *discharging*[13],[14],[15].

Kapasitas (Ah) dari suatu *battery* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

- Jumlah *battery*

$$\text{Jumlah battery} = \frac{V_{\text{sistem}}}{V_{\text{battery}}} \quad (4)$$

- Kapasitas *battery*

$$\text{Ah} = \frac{E_{AC}}{V_{\text{sistem}}} \quad (5)$$

- Kapasitas *battery* yang melibatkan efisiensi kerja inverter

Ah dg. efisiensi kerja inverter

$$= \text{Kap. batt} + [(100\% - \text{Eff. inv}) \cdot \text{Kap. batt}] \quad (6)$$

- Kapasitas minimal *battery* yang dibutuhkan

$$\text{Ah}_{\text{min.}} = \frac{\text{Ah dg. efisiensi kerja inverter} \cdot \text{totonomi}}{\% \text{ DOD}} \quad (7)$$

Dimana:

- E_{AC} = kebutuhan energi listrik konsumen (Wh)
- V_{sistem} = tegangan sistem (V)
- V_{battery} = tegangan nominal *battery* (V)
- Ah = kapasitas *battery* (Ampere hour)

% DOD = persentase tingkat kedalaman *discharge* maksimum yang dapat diberlakukan pada *battery*

t_{otonomi} = suatu kondisi hari dimana jumlah hari yang diasumsikan terjadi hujan/mendung/tidak ada sinar matahari selama 3 hari berturut-turut[15].

D. Bidirectional Converter

Bidirectional converter merupakan suatu alat yang digunakan untuk mengkonversi sumber listrik DC 12, 24, 48 Volt yang dihasilkan dari sumber listrik seperti *photovoltaic module* dan *battery*, menjadi sumber listrik AC (*inverter*) yang dapat dimanfaatkan sesuai spesifikasi peralatan elektrik (120 atau 240 V AC, 50 atau 60 Hz) atau setara dengan listrik PLN dan sebaliknya (*rectifier*)[14].

Dalam pemilihan *bidirectional converter* (*inverter*) sebaiknya kapasitas kerja yang dipilih mendekati kapasitas daya yang dilayani, dengan tujuan agar efisiensi kerja *bidirectional converter* (*inverter*) menjadi maksimal[14]. Adapun ketentuan rating *bidirectional converter* (*inverter*) yang digunakan dalam melayani *supply* daya ke beban dari suatu sistem pembangkit tenaga listrik yaitu adanya penambahan sekitar 20%-25% dari kapasitas daya yang akan dilayani[14].

Pada umumnya efisiensi *bidirectional converter* (*inverter*) adalah berkisar 50%-90% tergantung dari tipe *bidirectional converter* (*inverter*) dan beban *output*nya. Bila beban *output*nya semakin mendekati beban kerja *bidirectional converter* (*inverter*) yang tertera maka efisiensinya semakin besar, demikian pula sebaliknya[15].

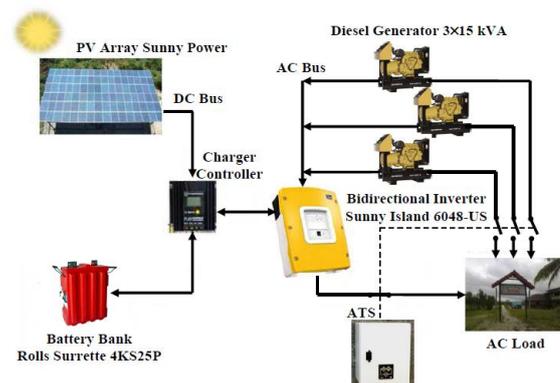
2.3. HOMER

HOMER merupakan sebuah perangkat lunak yang dikembangkan oleh NREL yang digunakan untuk mendesain sistem pembangkit listrik tenaga *hybrid* menggunakan energi terbarukan[16]. HOMER merupakan suatu program simulasi yang mengoptimalkan sistem pembangkit listrik baik *stand alone (off grid)* maupun *grid connected* yang dapat terdiri dari kombinasi pembangkit listrik konvensional dan kombinasi pembangkit sumber energi terbarukan, *battery bank*, *bidirectional converter* serta untuk melayani beban listrik maupun *thermal*[17]. HOMER juga berfungsi untuk

mempermudah *modeler* dalam merancang dan menganalisa berbagai macam aplikasi sistem tenaga listrik, baik yang terhubung ke *grid* maupun tidak. HOMER mengizinkan pengguna untuk membandingkan beberapa rancangan sistem yang berbeda berdasarkan faktor sumber daya alam, ekonomi (biaya) dan komponen peralatan yang digunakan[17].

III. METODOLOGI PENELITIAN

Dalam penelitian ini didesain sebuah sistem Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid Diesel Generator-Photovoltaic Array* dengan model kombinasi sistem *parallel-switch*.



Gambar 5. Sistem *Hybrid Paralel-Switch Diesel Generator-Photovoltaic Array*

Adapun kerja sistem PLTH *Diesel Generator-Photovoltaic Array* adalah sebagai berikut:

- $P_{\text{Beban}} < P_{\text{PV Array}} \rightarrow 100\% \text{ PV Array}$
- $P_{\text{Beban}} > P_{\text{PV Array}} \rightarrow \text{PV Array} + \text{Battery Bank}$
- $P_{\text{Beban}} < P_{\text{PV Array}} \ \& \ P_{\text{Battery Bank}} \rightarrow \text{PV Array} + \text{Battery Bank (full condition)}$
- $P_{\text{Beban}} > 75\% \text{ dari } P_{\text{PV Array}} \ \& \ P_{\text{Battery Bank}} \text{ (Min. SOC Batt. Bank } \leq 40\%) < \text{ dari } P_{\text{Diesel Generator}} \rightarrow \text{Diesel Generator}$
- $P_{\text{Beban Puncak}} < P_{\text{Diesel Generator}} \rightarrow \text{Diesel Generator}$
- $P_{\text{Beban Puncak}} > P_{\text{Diesel Generator}} \rightarrow \text{Diesel Generator} + \text{Battery Bank}$

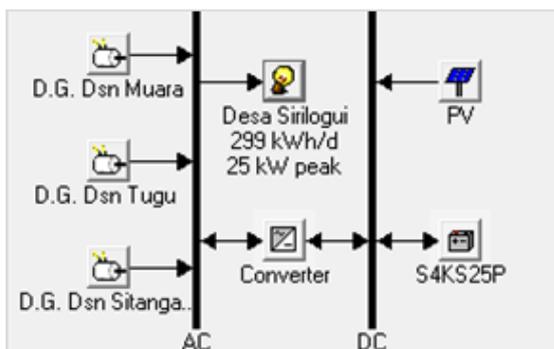
Sistem didesain dengan model pembagian bebannya sebagai berikut dengan model profil beban berikut ini.



Gambar 6. Grafik Estimasi Profil Beban Listrik Desa Sirilogui

Ada 2 skenario desain sistem PLTH Diesel Generator-Photovoltaic Array yang akan dirancang dalam penelitian ini.

I. Desain sistem PLTH 3 unit *diesel generator-photovoltaic array*



Gambar 7. Desain Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid 3 Diesel Generator-Photovoltaic Array

Model sistem pembagian bebannya yaitu:

Kondisi Normal

Kondisi I

- Dari pukul 06.00-18.00 WIB, beban listrik Desa Sirilogui dilayani oleh *photovoltaic array*
- Dari pukul 18.00-21.00 WIB, beban listrik Desa Sirilogui dilayani oleh *diesel generator*
- Dari pukul 21.00-06.00 WIB, beban listrik Desa Sirilogui dilayani oleh *battery bank*.

Kondisi Tidak Normal

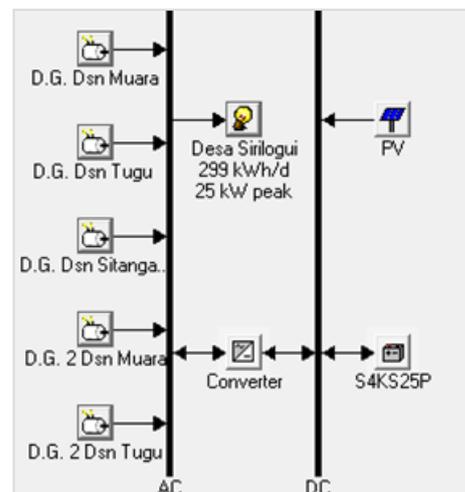
Kondisi II

- Dari pukul 06.00-18.00 WIB, beban listrik Desa Sirilogui dilayani oleh *photovoltaic array* dan *battery bank* dari pukul 06.00-07.00 WIB dan 13.00-16.00 WIB
- Dari pukul 18.00-06.00 WIB, beban listrik Desa Sirilogui dilayani oleh *diesel generator* dan *battery bank* dari pukul 21.00-6.00 WIB.

Kondisi III (Khusus *Weekend*)

- Dari pukul 06.00-18.00 WIB, beban listrik Desa Sirilogui dilayani oleh *photovoltaic array* dan *diesel generator* beroperasi dari pukul 07.00-17.00 WIB
- Dari pukul 18.00-21.00 WIB, beban listrik Desa Sirilogui dilayani oleh *diesel generator*
- Dari pukul 21.00-06.00 WIB, beban listrik Desa Sirilogui dilayani oleh *battery bank*.

II. Desain sistem PLTH 5 unit *diesel generator-photovoltaic array*



Gambar 8. Desain Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid 5 Diesel Generator-Photovoltaic Array

Model sistem pembagian bebannya yaitu:

Kondisi I

- Dari pukul 06.00-18.00 WIB, beban listrik Desa Sirilogui dilayani oleh *photovoltaic array* dan *battery bank*. Pada kondisi ini *battery bank* hanya digunakan pada siang

hari yaitu sebagai backup saat terjadi beban puncak di siang hari.

- Dari pukul 18.00-21.00 WIB, beban listrik Desa Sirilogui dilayani oleh *diesel generator 1*
- Dari pukul 21.00-06.00 WIB, beban listrik Desa Sirilogui dilayani oleh *diesel generator 2*

Kondisi II (Khusus Weekend)

- Dari pukul 06.00-18.00 WIB, beban listrik Desa Sirilogui dilayani oleh *photovoltaic array* dan *battery bank* serta ditambah dengan pengoperasian 3 unit *diesel generator 1* dari pukul 07.00-17.00 WIB
- Dari pukul 18.00-21.00 WIB, beban listrik Desa Sirilogui dilayani oleh 3 unit *diesel generator 1*
- Dari pukul 21.00-06.00 WIB, beban listrik Desa Sirilogui dilayani oleh 2 unit *diesel generator 2*.

Dalam mendesain sistem PLTH *Diesel Generator-PV Array* ini dibutuhkan data-data komponen sebagai berikut:

- Diesel Generator
Diesel generator yang digunakan adalah merk Olympian tipe GEP16SP-2 dengan kapasitas daya sebesar 15 kW[18].
Berikut ini merupakan spesifikasi teknik dari *diesel generator* Olympian tipe GEP16SP-2

Tabel 1. Spesifikasi Teknik *Diesel Generator* Olympian GEP16SP-2[18]

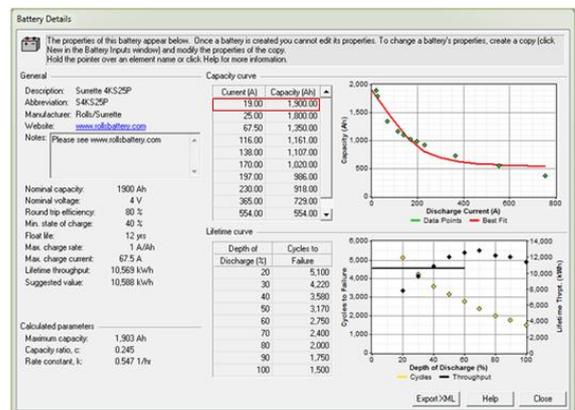
Spesifikasi Teknik	Keterangan
Model	220-240 V
Prime	15 kW
Standby	16,5 kW
Frequency	50 Hz
Fuel Tank Capacity	45 litres
Fuel Consumption, Prime	5,1 litres/hours
Fuel Consumption, Standby	5,8 litres/hours

- Photovoltaic Array
Modul surya yang digunakan adalah jenis *silicon monocrystalline* merk Sunny Power dengan kapasitas 100 Wp[19].
Berikut ini merupakan spesifikasi teknik dari modul surya jenis *silicon monocrystalline* merk Sunny Power.

Tabel 2. Spesifikasi Teknik Modul Surya *Silicon Monocrystalline* Sunny Power[19]

Spesifikasi Teknik	Keterangan
Maximum power (P _m)	100 W
Power measurement tolerance	± 5%
Nominal voltage	12 V DC
Voltage at max power (V _{mp})	17,4 V
Current at max power (I _{mp})	5,75 A
Short circuit current (I _{sc})	6,33 A
Open circuit voltage (V _{oc})	21,6 V
Operating temperature	-40°C to +85°C
Maximum system voltage	1000 V
Maximum series fuse rating	8 A
Number of cells and connections	36 = 4 × 9 pcs
Solar cell (mm)	125 × 125
Dimension of module (mm)	1200 × 540 × 30
Standard Test Condition (STC)	Irradiance 1000 W/m ² , Module temperature 25°C, AM = 1,5
Weight	8,5 kg
NOCT	48°C ± 2°C
Power temperature coefficient	-(0,5 ± 0,05) %/K

- Battery
Jenis *battery* yang digunakan adalah *battery deep cycle* merk Rolls Surrette tipe 4KS25P dengan kapasitas nominal 1.900 Ah (7,6 kWh) dan tegangan nominal 4 V dengan masa usia teknis maksimal 15 tahun[20].
Berikut ini merupakan spesifikasi teknik dari *battery* Rolls Surrette 4KS25P



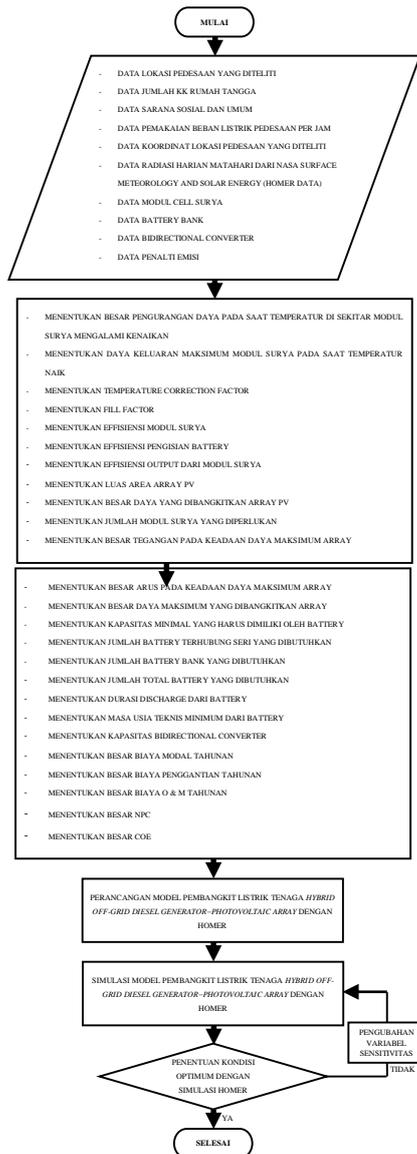
Gambar 9. Karakteristik *Battery* Rolls Surrette 4KS25P

- Bidirectional Converter
Converter yang digunakan adalah *bidirectional converter (inverter-rectifier)* 1 phasa kapasitas 6000 W merk Sunny Island tipe 6048-US produksi SMA America, LLC[21].
Berikut ini merupakan spesifikasi teknik dari *bidirectional converter* Sunny Island 6048-US

Tabel 3. Spesifikasi Teknik *Bidirectional Converter Sunny Island 6048-US*[21]

Technical Data	Keterangan
Maximum DC power	6,7 kW
Maximum DC voltage	120 V
Nominal AC range	105 – 132 V
Frequency adjustable	55 – 65 Hz
Rated current	48 A
Maximum output AC power	6000 W
Power factor	-1 to +1
Maximum efficiency	96 %
Dimension (W / H / D)	467 / 612 / 235 mm
Weight	63 kg

Adapun tahapan-tahapan yang dilakukan dalam pemilihan desain yang optimal dari Sistem PLTH *Diesel Generator-Photovoltaic Array* ini dapat dilihat pada diagram alir penelitian berikut ini.



Gambar 10. Diagram Alir Penelitian

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil simulasi dengan menggunakan perangkat lunak HOMER maka diperoleh *optimization results* dari 2 desain sistem PLTH *diesel generator-photovoltaic array* sebagai berikut.

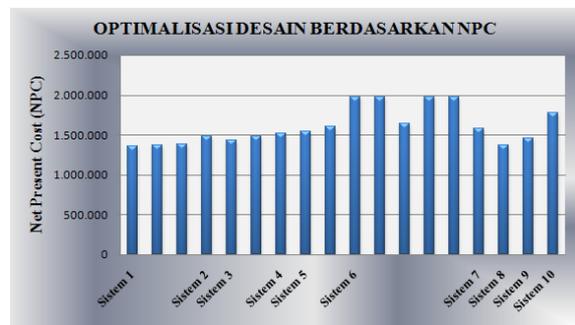
Component	Size	Cost	Capacity
PV	65.0 kW	\$1,744,317	20,337 kWh/yr
Battery	15 kWh	\$2,920	2,920 kWh
Generator	70 LF	\$72,609	2,920 kWh/yr
Converter	156	\$1,362,474	2,920 kWh/yr

Gambar 11. *Optimization Results* dari Desain Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid 3 *Diesel Generator-Photovoltaic Array*

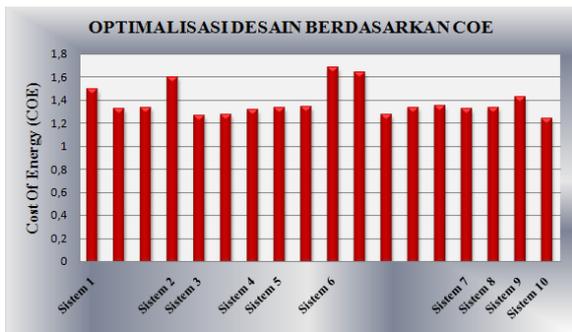
Station	Total NPC	COE	Capacity
Station 1	\$1,744,317	1.485	20,337 kWh/yr
Station 2	\$1,744,067	1.480	21,742 kWh/yr
Station 3	\$1,744,067	1.478	21,919 kWh/yr
Station 4	\$1,744,067	1.478	21,919 kWh/yr
Station 5	\$1,744,067	1.478	21,919 kWh/yr
Station 6	\$1,744,067	1.478	21,919 kWh/yr
Station 7	\$1,744,067	1.478	21,919 kWh/yr
Station 8	\$1,744,067	1.478	21,919 kWh/yr
Station 9	\$1,744,067	1.478	21,919 kWh/yr
Station 10	\$1,744,067	1.478	21,919 kWh/yr

Gambar 12. *Optimization Results* dari Desain Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid 3 *Diesel Generator-Photovoltaic Array*

Hasil optimalisasi dari 2 skenario desain sistem PLTH *diesel generator-photovoltaic array* apabila diurutkan berdasarkan NPC terendah dan COE maka diperoleh beberapa desain sistem yang optimal seperti yang terlihat pada grafik berikut ini.



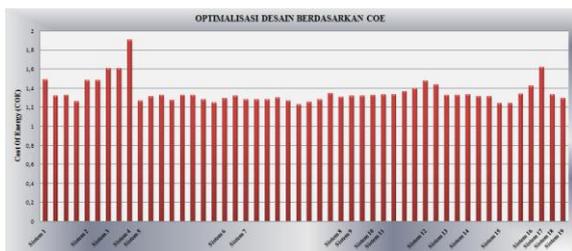
Gambar 13. Grafik Optimalisasi Desain Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid 3 *Diesel Generator-Photovoltaic Array* Berdasarkan NPC



Gambar 14. Grafik Optimalisasi Desain Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid 3 Diesel Generator-Photovoltaic Array Berdasarkan COE



Gambar 15. Grafik Optimalisasi Desain Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid 5 Diesel Generator-Photovoltaic Array Berdasarkan NPC



Gambar 16. Grafik Optimalisasi Desain Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid 5 Diesel Generator-Photovoltaic Array Berdasarkan COE

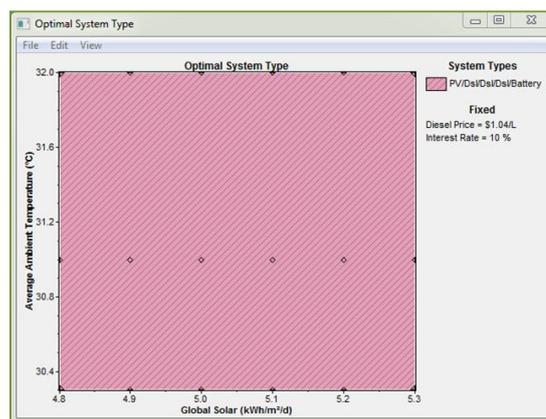
Dari beberapa desain sistem tersebut, berdasarkan hasil simulasi menggunakan HOMER maka dipilih desain sistem yang paling optimal dari beberapa pilihan desain sistem yang optimal yaitu desain sistem dengan *total net present cost* terendah sebesar \$ 1.362.474 dimana desain sistemnya terdiri dari *photovoltaic array* 65 kW, 3 unit *diesel generator* masing-masing berkapasitas 15 kW, *battery* 156 unit dan *bidirectional converter* 78

kW dengan strategi *dispatchnya* yaitu *load following* dimana untuk simulasinya membutuhkan waktu selama 12 menit 35 detik.

Pada desain sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Diesel Generator-Photovoltaic Array ini, HOMER melakukan sebanyak 1728 simulasi dan 360 sensitivitas dari 4 variabel sensitivitas yaitu: *global solar*, *average ambient temperature*, *diesel price* dan *interest rate*.

Berikut ini merupakan penjabaran hasil simulasi desain sistem yang paling optimal dari Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Diesel Generator-Photovoltaic Array dengan menggunakan HOMER.

- Sensitivity results



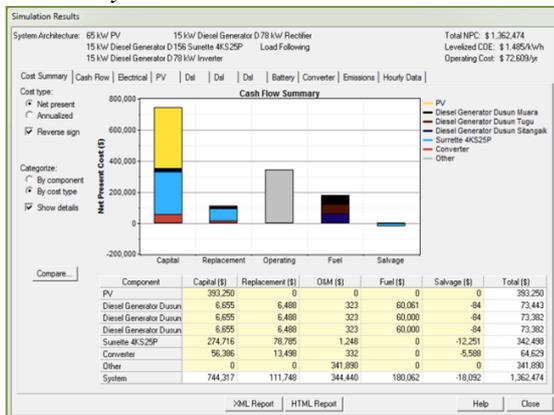
Gambar 17. Sensitivity Results dari Optimal System Type

Pada *sensitivity results*, faktor yang paling berpengaruh adalah *global solar* (kWh/m²/d) dan temperatur *ambient* rata-rata (°C). Berdasarkan grafik tersebut diketahui bahwa tipe sistem yang paling optimal dipilihkan HOMER yaitu:

- Sistem *hybrid photovoltaic array*-3 unit *diesel generator-battery*, dimana sistem ini dipilihkan HOMER sebagai sistem yang paling optimal dengan posisi *global solar* berada di kisaran 4,80 kWh/m²/d- 5,3 kWh/m²/d dengan temperatur *ambient* rata-rata berada di rentang 30,3°C - 32°C
- Warna yang tampil pada grafik menunjukkan pilihan sistem yang paling optimal berdasarkan *total net present cost* terendah yang dipilihkan HOMER. Apabila harga bahan bakar diesel dan tingkat suku bunga dinaikkan hingga mencapai nilai maksimum

yang ditetapkan, tidak akan mempengaruhi sistem *hybrid* tersebut tetapi sebaliknya berpengaruh terhadap perubahan total *net present cost*, *cost of energy* dan *operating cost*.

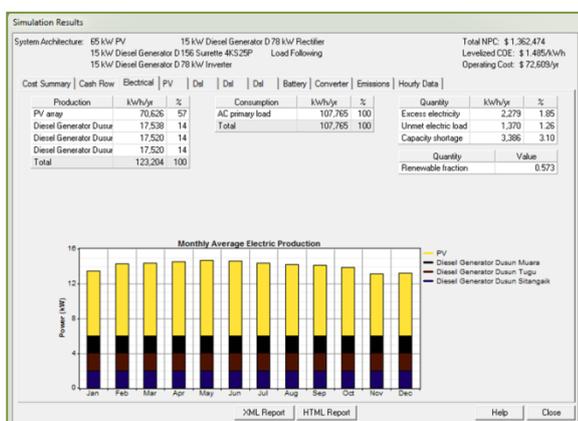
- Hasil simulasi sistem ditinjau dari *cost summary*



Gambar 18. Hasil Simulasi Berdasarkan NPC

Pada gambar terlihat bahwa biaya terbesar yang harus dikeluarkan selama 20 tahun atau selama proyek berlangsung adalah biaya investasi awal yaitu sebesar \$ 744.317 atau 54,63% dari total NPC, kemudian diikuti dengan biaya operasional dan pemeliharaan sebesar \$ 344.440 atau 25,28%, biaya bahan bakar sebesar \$ 180.062 atau 13,22% dan biaya penggantian komponen sebesar \$ 111.748 atau 8,20%.

- Hasil simulasi sistem ditinjau dari *electrical*



Gambar 19. Hasil Simulasi *Electrical*

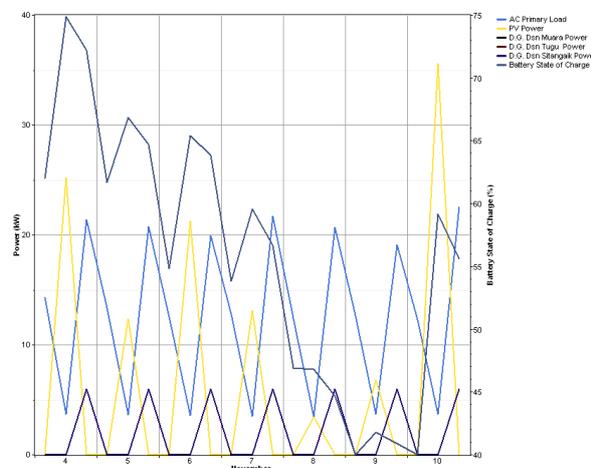
Berdasarkan hasil simulasi terlihat bahwa produksi energi listrik yang dihasilkan oleh sistem Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid Diesel Generator-Photovoltaic Array* per tahunnya sebesar 123.204 kWh dimana produksi energi listrik terbesar berasal dari *photovoltaic array* dengan *renewable fraction* sebesar 0,573 dan kelebihan listrik sebesar 2.279 kWh/tahun. Walaupun sistem *hybrid* ini mampu untuk melayani pemakaian beban listrik secara keseluruhan akan tetapi sistem tersebut masih memiliki *capacity shortage* sebesar 3,10% atau sekitar 3.386 kWh/tahun dimana ini terlihat dengan masih belum terpenuhinya beban listrik sebesar 1.370 kWh/tahun sedangkan konsumsi energi listrik per tahunnya sebesar 107.765 kWh. Pada gambar di atas terlihat bahwa produksi listrik rata-rata per bulan yang tertinggi terjadi di bulan Mei.

- Hasil simulasi ditinjau dari emisi

Tabel 4. Besar Emisi Yang Dihasilkan

Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	52,308
Carbon monoxide	779
Unburned hydrocarbons	86.2
Particulate matter	58.8
Sulfur dioxide	75.3
Nitrogen oxides	6,955

- Output sistem *hybrid diesel generator-photovoltaic array*



Gambar 20. Output Sistem *Hybrid Diesel Generator-Photovoltaic Array*

Gambar di atas menunjukkan hasil simulasi gabungan komponen per jam dalam satu hari selama bulan November. Bulan November dipilih karena intensitas radiasi matahari pada bulan ini adalah yang terendah dari bulan-bulan yang lain. Seperti yang terlihat pada gambar dimana tanggal 8 November intensitas radiasi matahari lebih rendah dari beban listrik AC sehingga beban listrik AC disupply oleh *battery* yang discharge oleh *photovoltaic*.

V. KESIMPULAN

Setelah dilakukan simulasi menggunakan perangkat lunak HOMER 2 versi 2.81 untuk mendapatkan Optimalisasi Desain dan Analisis Ekonomi Teknik Sistem Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid Diesel Generator-Photovoltaic Array*, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Dari penelitian ini diperoleh suatu desain sistem Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid Diesel Generator-Photovoltaic Array* yang paling optimal berdasarkan pada total NPC terendah dimana desain sistem Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid* ini terdiri dari 3 unit *diesel generator* berkapasitas masing-masing 15 kW, *photovoltaic array* berkapasitas 65 kW dengan jumlah modul sebanyak 648 modul (162 *string* dari 4 modul yang terhubung seri), *battery* berjumlah 156 unit (13 bank *battery* terhubung paralel dari 12 unit *battery* yang terhubung seri) dengan kapasitas sebesar 23.678 Ah dan *bidirectional converter* yang berkapasitas 78 kW terdiri dari 13 unit.
2. Ditinjau dari segi ekonomi, apabila semakin besar proporsi energi terbarukan yang digunakan, maka *initial capital* atau biaya awal yang dihasilkan juga akan semakin besar. Namun dengan semakin besarnya kapasitas energi terbarukan yang terpasang, akan menurunkan tingkat penggunaan bahan bakar dan biaya yang dikeluarkan untuk bahan bakar. Dan dengan berkurangnya biaya yang dikeluarkan untuk bahan bakar, semakin berkurang juga total *net present cost* yang dihasilkan mengingat bahan bakar menjadi salah satu aspek terbesar dalam hal pengeluaran biaya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] PT. PLN (Persero) Wilayah Sumatera Barat. (2013, September 7). Road Map Lisdes Wilayah Sumatera Barat 2012-2017. [Online]. Available: <http://www.pln.co.id/sumbar>
- [2] (2009, Oktober 24). Mari Ke Siberut Utara. [Online]. Available: <http://www.puailiggoubat.com>
- [3] NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data. (2013, Agustus 11). Monthly Averaged Insolation Incident On A Horizontal Surface. [Online]. Available: <http://www.data.nasa.gov/surface-meteorology-and-solar-energy>
- [4] The HOMER 2 Software. (2013, April 8). HOMER 2 Version 2.81 [Online]. Available: <http://www.homerenergy.com>
- [5] Rosyid, O. A., "Pembangkit Listrik Tenaga Surya Hibrida Untuk Listrik Pedesaan di Indonesia", *Jurnal Material dan Energi Indonesia*, vol. 1, no. 1, hal. 31-38, 2011.
- [6] Kunaifi, "Program HOMER Untuk Studi Kelayakan Pembangkit Listrik Hibrida Di Propinsi Riau", *Seminar Nasional Informatika*, FTI UPN "Veteran" Yogyakarta, 2010, hal. 18-27.
- [7] Nayar, C. V. dkk., "Novel Wind/Diesel/Battery Hybrid Energy System", *Solar Energy*, vol. 51, no.1, hal. 65-78, 1993.
- [8] Sopian, K. dan Othman, M. Y., "Performance of a Photovoltaic Diesel Hybrid System in Malaysia", *Iseco Science and Technology Vision*, vol.1, hal. 37-39, May 2005.
- [9] Quaschnig, Volker, "Photovoltaics", *Understanding Renewable Energy Systems*, London, Sterling, VA: Earthscan, 2005, chapter 4, hal. 115-172.
- [10] Sitompul, Rislina, Manual Pelatihan Teknologi Energi Terbarukan yang Tepat Untuk Aplikasi di Masyarakat Pedesaan. Jakarta: PNPM Support Facility (PSF), 2011, hal.45-75.
- [11] *Handbook for Solar Photovoltaic (PV) Systems*, Grenzone Pte Ltd, Phoenix Solar Pte Ltd, Singapore Polytechnic, Solar Energy, Research Institute of Singapore (SERIS), SP PowerGrid, Urban Redevelopment Authority, Singapore, ISBN: 978-981-08-4462-2, hal. 4-15.

- [12] Strong, Steven J., *The Solar Electric House, A Design Manual for Home-Scale Photovoltaic Power Systems*, Pennsylvania : Rodale Press, 1987.
- [13] Foster, Robert, *dkk.*, *Solar Energy : Renewable Energy and The Environment*. Boca Raton, FL : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010.
- [14] (2013, Maret 15). [Online]. Available: <http://www.cmacpower.co.za>
- [15] (2013, Maret 15). [Online]. Available: <http://www.solarsuryaindonesia.com>
- [16] Lambert, Tom, *dkk.*, "Micropower System Modeling with HOMER", *Integration of Alternative Sources of Energy*, United States of America : John Wiley & Sons Inc., April 2006, chapter 15, pp. 379-418.
- [17] National Renewable Energy Laboratory, USA. (2012, November 28). Homer Energy Modelling Software for Hybrid Renewable Energy System [Online]. Available: <http://www.homerenergy.com>
- [18] Diesel Generator Set Caterpillar. (2013, Januari 20). Olympian™ GEP16SP-2 220-240 V 50 Hz 15 kW. [Online]. Available: <http://www.CAT-ElectricPower.com>
- [19] Sunny International Power Corp. (2013, Maret 11). Monocrystalline Solar Panel Sunny Power 100 WP. [Online]. Available: <http://www.sunnypowersolar.com>
- [20] Surrette Battery Company Limited, Canada. (2013, Maret 12). Rolls Surrette Battery 4 Volt 1900 AH 4KS25PS. [Online]. Available: <http://www.rollsbattery.com>
- [21] SMA America, LLC. 2010. (2013, Maret 15). Bidirectional Inverter Sunny Island 6048-US. [Online]. Available: <http://www.SMA-America.com>

Biodata Penulis

Dewi Purnama Sari, lahir di Padang tanggal 5 Oktober. Pendidikan S1 di Jurusan Teknik Elektro Universitas Bung Hatta Padang pada tahun 1999. Pendidikan S2 di Jurusan Teknik Elektro Universitas Andalas Padang dengan Program Studi Teknik Energi Elektrik pada tahun 2011.