

PEMODELAN SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK HIBRIDA DIESEL DAN ENERGI TERBARUKAN DI PULAU ENGGANO, BENGKULU UTARA MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK HOMER

Guspan Hidi Susilo^{*)}, Hermawan, and Bambang Winardi

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)} E-mail: agoldenkey@yahoo.com

Abstrak

Sistem Pembangkit Listrik Hibrida (PLH) adalah integrasi sistem pembangkit listrik berbasis energi fosil (tak terbarukan) dan pembangkit listrik terbarukan. Tujuan utamanya untuk menghemat pemakaian bahan bakar dan mengurangi emisi terutama CO₂. Secara menyeluruh, integrasi pada sistem PLH ini merupakan sistem yang multi variabel sehingga digunakan bantuan perangkat lunak, dalam hal ini HOMER versi 2.81. Perangkat lunak ini mengoptimasi berdasarkan nilai NPC terendah. Tulisan ini menyajikan desain dari sistem pembangkit listrik hibrida, dengan memanfaatkan energi terbarukan yang dikombinasikan dengan generator diesel sebagai tenaga cadangan untuk layanan listrik perdesaan (rural area) di Pulau Enggano, dimana daerah tersebut kaya akan sinar matahari dengan rata-rata pertahun 4,91 kWh/m²/hari, dan juga terdapat sungai dengan debit yang cukup tinggi, yaitu pada Sungai Kuala Besar dengan debit rata-rata pertahun sebesar 12,13 m³/dt. Hasil dari simulasi dan optimasi HOMER menunjukkan bahwa secara keseluruhan sistem yang optimum untuk diterapkan di area studi di atas dalam jangka waktu proyek 25 tahun adalah integrasi PLTMH, PLTS dan generator diesel. Pada kondisi yang optimum ini, kontribusi PLTMH 78%, PLTS 12%, dan generator diesel 10% dengan nilai bersih sekarang (net present cost, NPC) sebesar \$ 904.835, biaya pembangkitan listrik (cost of energy, COE) sebesar \$ 0,164 per kWh, pemakaian BBM sebesar 19.885 L/thn, emisi CO₂ sebesar 52.364 kg/thn dan kelebihan energinya pertahun sebesar 12.332 kWh.

Kata kunci: pembangkit listrik hibrida, simulasi, optimasi, NPC

Abstract

Hybrid power system is the integration of power system based on fossil fuel energy and renewable energy. The main purpose of the system is to save the fossil fuel and reduce the environmental effect, especially CO₂ emission. The hybrid system is a multi-variable system. A HOMER version 2.81, a micropower optimization modeling software is used to analyze data for both stream flow and solar radiation, simulating hybrid system configurations at once and ranks them according to its lowest net present cost. This paper gives the design of hybrid power system based on renewable energy and diesel generator as a backup power supply for rural electricity services in Enggano Island, whereas in that area has global solar radiation 4.19 kWh/m²/day, and the average flow rate of the Kuala Besar river is 12,13 m³/dt. The optimum hybrid system from the simulation and optimization result is consist of mycro-hydro, solar cell, and diesel generator for 25 years project lifetime. Contribution of mycro-hydro turbine is 78%, solar cell is 12%, and the contribution of diesel generator is 10 %. The optimum hybrid system has \$ 904.835 of the total Net Present Cost (NPC), Cost of Electricity is \$ 0,164/kWh, fuel consumption in a yearly is 19.885 litre, CO₂ emission is 52.364 kg/year, and excess electricity is 12.332 kWh/year.

Keywords: hybrid power system, simulation, optimization, NPC

1. Pendahuluan

Enggano adalah sebuah pulau dengan luas ± 40.060 Ha yang terletak di perairan Samudera Hindia, yang merupakan bagian dari wilayah Kabupaten Bengkulu Utara, Provinsi Bengkulu. Secara geografis, Pulau Enggano terletak pada posisi 102,05° hingga 102,25° BT

dan 5,17° sampai 5,31° LS [11]. Sebuah kecamatan, Pulau Enggano terdiri dari 6 desa yaitu desa Malakoni, Apoho, Meok, Banjarsari, Kaana dan Kahyapu dengan jumlah total penduduk sekitar 3000 jiwa.[11] Pada saat ini sumber energi listrik menjadi permasalahan mendasar di Pulau Enggano. Sebagian besar masyarakat Enggano masih menggunakan penerangan lampu teplok untuk

penerangan pada malam hari, itupun dengan tidak ada jaminan tersedia bahan bakar minyak yang cukup. Beberapa rumah tangga yang bermata pencaharian sebagai PNS, sudah menggunakan generator set untuk penerangan rumahnya, itupun hanya sebatas malam hari sekitar 6-8 jam per malam. Berdasarkan data badan antariksa Amerika Serikat (NASA), daerah di Pulau Enggano kaya akan sinar matahari dengan rata-rata radiasi pertahun sebesar 4,91 kWh/m²/day[13] dan juga terdapat sungai dengan debit yang cukup tinggi, yaitu pada Sungai Kuala Besar dengan debit rata-rata pertahun sebesar 12,13 m³/dt [8]. Alternatif untuk menyuplai listrik pada daerah tersebut adalah dengan memanfaatkan turbin mikrohidro dan panel surya yang dibantu dengan generator diesel sebagai tenaga cadangan, dengan membentuk sistem hibrida mikrohidro/PV/Diesel. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan rancangan sistem tenaga listrik yang efektif dari sisi keekonomian dengan memanfaatkan sumber daya alam yang ada, namun tetap menggunakan generator diesel sebagai tenaga cadangan. Studi sejenis yang pernah dilakukan adalah, Kumar Deepak, dkk, melakukan studi kelayakan sistem tenaga hibrida di area pedesaan Sundargarh, India dengan menggunakan tenaga mikrohidro, surya, angin, dan diesel generator sebagai tenaga cadangan.[4] Dan penelitian Anayochukwu, vincent dalam optimasi sebuah sistem tenaga hibrida surya, mikrohidro dan diesel di Ikwerre, Nigeria.[5]

2. Metode

2.1. Pembangkit Listrik Hibrida (PLH)

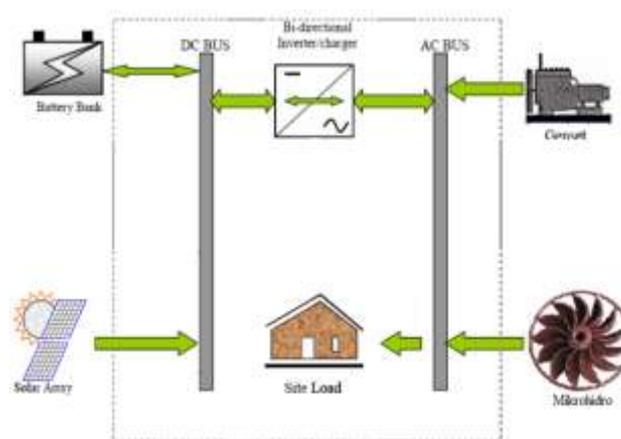
Sistem Pembangkit listrik hibrida (PLH) atau *Hybrid Power System* adalah integrasi sistem pembangkit listrik berbasis energi fosil (tak terbarukan) dan pembangkit listrik terbarukan. Tujuan utamanya untuk menghemat pemakaian bahan bakar dan mengurangi emisi terutama CO₂. Pada sebuah sistem tenaga hibrida, energi terbarukan yang digunakan dapat berasal dari energi matahari, angin,

mikrohidro dan lain-lain yang dikombinasikan dengan generator diesel sehingga menjadi suatu pembangkit yang lebih efisien, efektif dan handal untuk dapat mensuplai kebutuhan energi listrik di suatu daerah. **Gambar 1** menunjukkan skema sistem hibrida Mikrohidro / PV / Diesel / Baterai.

Konfigurasi Pembangkit listrik hibrida (PLH) seperti terlihat di atas yang meliputi beberapa komponen utama yaitu :

- PV Array*, adalah gabungan dari beberapa solar panel yang dirangkai secara seri dan parallel sehingga menghasilkan nilai tegangan tertentu dengan besar daya yang diinginkan. Total energy yang dihasilkan dari PV Array ini tergantung dari:
 - Jumlah Solar Panel yang dipasang atau total watt peak module

- Intensitas matahari ($kW/m^2/day$) di tempat yang akan dipasang
- Hydro turbine*, berperan untuk mengubah energi potensial air menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros. Putaran poros turbin dihubungkan dengan generator yang mengubah energi mekanis (gerak) menjadi energi listrik. Besarnya energi yang dihasilkan pada turbin hidro ditentukan oleh besar debit air, dimana ketinggian jatuh air juga sangat berpengaruh.
 - Diesel Generator*, diperlukan sebagai kombinasi energi untuk dapat menyuplai daya pada pelayanan beban, terutama pada saat beban puncak atau jika kondisi energi yang disimpan di baterai sudah pada level bawah.
 - Battery Bank* atau rangkaian baterai adalah bagian dari PLH yang fungsinya untuk menyimpan energi yang diperoleh dari solar panel dan turbin mikrohidro.
 - Bi-Directional inverter*, merupakan pengubah dua arah yaitu merubah tegangan DC dari batere menjadi tegangan AC atau sebaliknya dari AC ke sistem DC untuk pengisian energi ke baterai (*charge battery*).



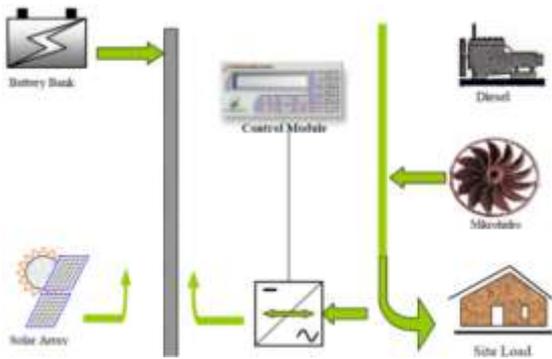
Gambar 1. Skema Pembangkit Listrik Hibrida

2.2. Sistem Kerja PLH

Cara kerja Pembangkit Listrik Hibrida energi terbarukan dan Diesel sangat tergantung dari bentuk beban atau fluktuasi pemakaian energi (*load profile*) yang mana selama 24 jam distribusi beban tidak merata untuk setiap waktunya. Pada umumnya PLH Mikrohidro / PV / Diesel / Baterai bekerja dalam tiga tahap kategori yang sesuai urutan sebagai berikut :

- **Pada kondisi beban rendah** (<50% beban puncak)

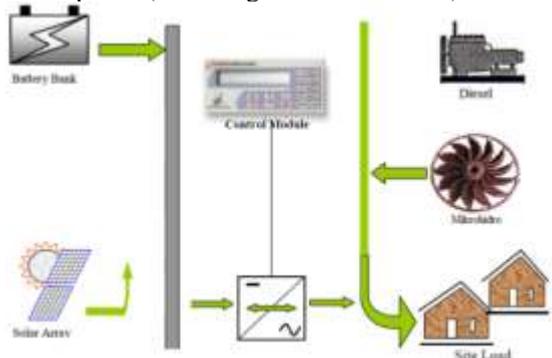
Pada kondisi ini beban disuplai 100% oleh PLTMH, dan sistem kontrol melakukan pengisian baterai dari kelebihan kapasitas generator mikrohidro dan panel surya. (ilustrasi gambar 2 di bawah)



Gambar 2. Aliran daya pada beban rendah

- Pada kondisi beban menengah (>50% beban puncaknya)

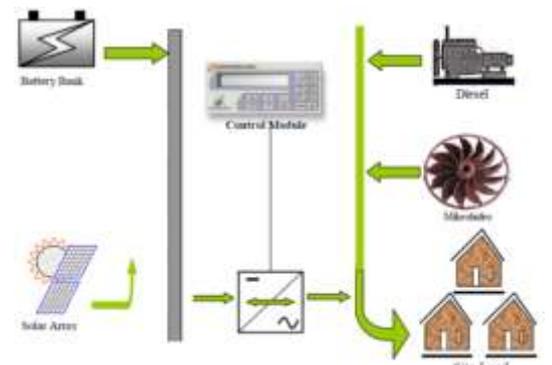
Pada kondisi ini Inverter yang ada akan bekerja sebagai charger (merubah sistem DC ke sistem AC) untuk membantu generator mikrohidro dalam menyuplai beban, selama kondisi baterai masih penuh sehingga diesel tidak perlu beroperasi (ilustrasi gambar 3 di bawah)



Gambar 3. Aliran daya pada beban menengah

- Pada kondisi beban puncak

Pada kondisi ini baik diesel maupun inverter akan beroperasi dua-duanya untuk menuju paralel sistem dalam membantu generator mikrohidro menyuplai beban puncak. (ilustrasi gambar 4 di bawah)



Gambar 4. Aliran Daya Pada Beban Puncak

2.3. Perangkat Lunak HOMER

HOMER adalah suatu model sistem pembangkit skala kecil (*micropower*) untuk mempermudah dalam mengevaluasi desain dari jaringan tunggal (*off-grid*) maupun jaringan yang terkoneksi dengan sistem (*grid-connected*). Perangkat lunak ini melakukan perhitungan keseimbangan energi untuk setiap 8.760 jam dalam setahun. Kemudian menentukan konfigurasi yang layak, apakah dapat memenuhi kebutuhan listrik di bawah kondisi yang ditentukan, perkiraan biaya instalasi dan sistem operasi selama masa proyek.

2.4. Perhitungan Daya Listrik

2.4.1 Daya output PLTMH

Daya output turbin mikrohidro dihitung berdasarkan persamaan:

$$P_{mh} = Q \times h \times 9,8 \times \eta \quad (1)$$

P_{mh} : daya yang dihasilkan (Watt)

h : ketinggian jatuh air (meter)

η : efisiensi turbin (%)

Q : debit air (m³/s)

2.4.2 Daya output PLTS

Daya output panel surya dihitung berdasarkan persamaan:

$$P_{PV} = f_{PV} \cdot Y_{PV} \cdot \frac{G_T}{G_{T,STC}} \quad (2)$$

P_{PV} : daya yang dihasilkan PV (kW)

Y_{PV} : daya output pada pengujian dengan kondisi standar (kW)

f_{PV} : PV derating factor (%)

G_T : radiasi sesaat pada permukaan PV array (kW/m²)

$G_{T,STC}$: Radiasi sesaat menurut kondisi standar pengujian (1 kW/m²)

2.4.3 Daya output Generator Diesel

Daya output generator diesel dihitung berdasarkan persamaan :

$$P_{gen} = F \cdot F_0 \cdot \frac{Y_{gen}}{F_1} \quad (3)$$

P_{gen} : daya output generator diesel (kW)

F : tingkat konsumsi bahan bakar (L/jam)

F_0 : kurva koefisien intercept bahan bakar (L/jam/kWrated)

F_1 : slope kurva bahan bakar (L/jam/kW)

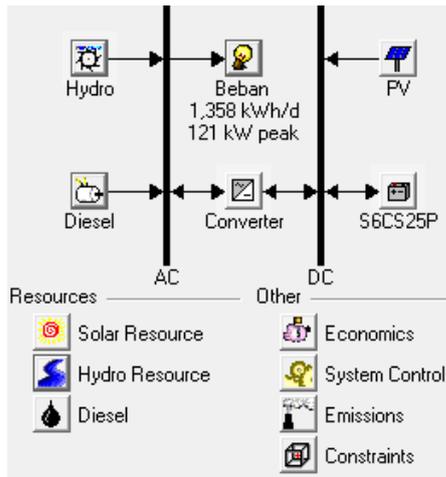
Y_{gen} : kapasitas generator diesel (kW)

2.5 Perancangan Sistem Tenaga Listrik

Pada sistem hibrida di sini menggunakan tiga sumber energi yaitu :

- a. Sumber energi matahari dengan melalui Panel Surya
- b. Sumber energi hidrologi dengan melalui Turbin Mikrohidro
- c. Sumber energi minyak dengan menggunakan Generator Diesel

Gambar 5 di bawah ini adalah model sistem tenaga hibrida yang akan disimulasi dan dioptimasi oleh HOMER.



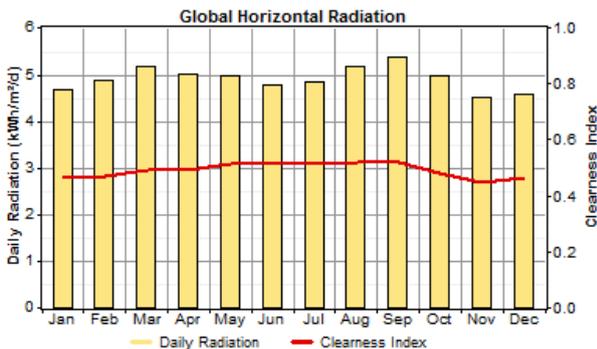
Gambar 5. Model dan Komponen

2.5.1 Input Data Penelitian

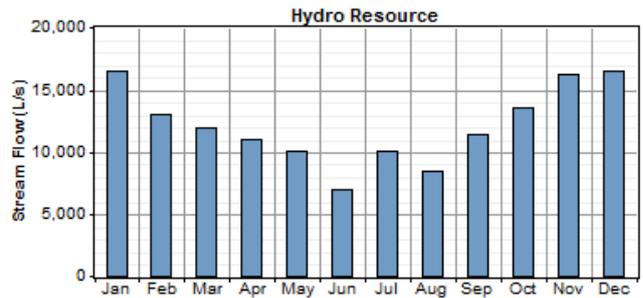
Dalam penelitian ini data-data yang diperlukan didapatkan dari :

1. Data radiasi matahari diperoleh dari database situs resmi NASA (National Aeronautics and Space Administration) dengan koordinat lintang selatan 5,17° dan bujur timur 102,05°.
2. Data debit sungai dari “Laporan Studi Daya Dukung Pemanfaatan dan Pengembangan Kepulauan Enggano tahun 2006” oleh Bapedalda Provinsi Bengkulu.

Tampilan rata-rata radiasi matahari dan rata-rata debit sungai Kuala Besar dalam setahun ditunjukkan Gambar 6 dan Gambar 7.



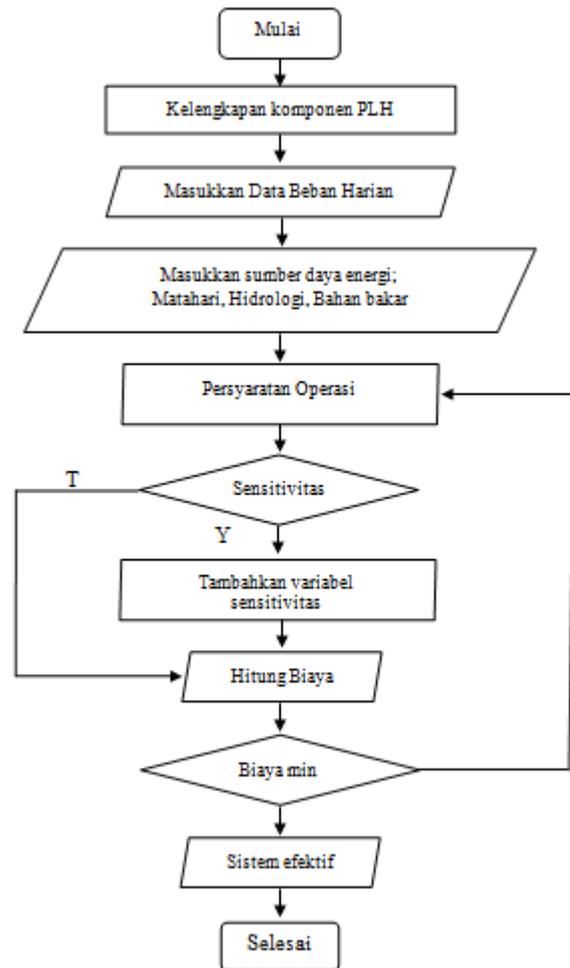
Gambar 6. Rata-rata radiasi matahari dalam setahun [13]



Gambar 7. Debit rata-rata Sungai Kuala Besar selama setahun[8]

2.5.2 Flowchart

Algoritma simulasi dan optimalisasi biaya sistem pembangkit hibrida, sebagai berikut :

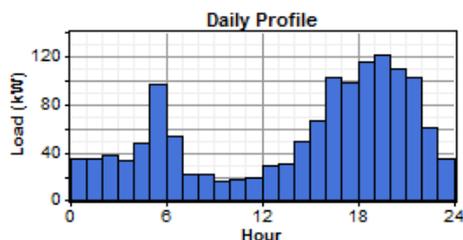


Gambar 8. Diagram alir perancangan sistem tenaga hibrida

2.5.3 Prakiraan Beban

Perancangan sistem tenaga hibrida ini akan disimulasikan untuk memenuhi kebutuhan listrik 851 pelanggan di

Kecamatan Enggano dengan konsumsi beban harian rata-rata per rumah tangga sebesar 1,6 kWh[1]. **Gambar 9** berikut menunjukkan estimasi beban harian untuk kebutuhan listrik di Kecamatan Enggano.



Gambar 9. Estimasi Beban Kecamatan Enggano

Energi harian (kWh/hari) : 1.358
 Beban puncak (kW) : 121
 Beban rata-rata (kW) : 56,5
 Faktor beban : 0,46

2.5.4 Komponen Utama Sistem PLH

Komponen utama sistem pembangkit hibrida terdiri panel *photovoltaic*, turbin mikrohidro, generator diesel, baterai bank dan konverter.

➤ Modul Surya (*Photovoltaic*)

Modul surya yang digunakan adalah tipe SP100-12M dengan rating daya maksimum 100 watt. Modul SP100-12M memiliki *derating factor* 90% dan masa garansi selama 20 tahun.

Tabel 1. Parameter masukan panel surya

Tipe	Modul Surya SP100-12M
Maximum power	100 watt
lifetime	20 tahun
derating factor	90%
Tracking system	No
Slope (degrees)	5,2°

➤ Mikrohidro

Parameter masukan pada turbin mikrohidro adalah ketinggian jatuh air, debit desain, rasio debit maksimum dan minimum, dan efisiensi turbin.

Tabel 2. Parameter masukan turbin mikrohidro

Turbin Mikrohidro	
Daya Nominal (kW)	50
Umur proyek	30 tahun
Ketinggian jatuh air	5 m
Debit desain	1700 L/s
Minimum flow ratio	25%
Maksimum flow ratio	100%
Efisiensi turbin	60%

➤ Generator Diesel

Generator Diesel yang digunakan adalah Caterpillar Generator dengan kapasitas 75 kW.

Tabel 3. Parameter masukan generator diesel

Tipe	Caterpillar Generator 75 kW AC
Kapasitas	75 kW
Jumlah	1 unit
Lifetime	15.000 hours
Minimum load ratio	75%
Bahan bakar	Solar diesel
Fuel curve intercept	0,08 L/hours/kW
Fuel curve slope	0,25 L/hours/kW
Harga	\$0,65/L
Lower heating value	43,2 MJ/kg

➤ Inverter

Inverter yang digunakan adalah *Bidirectional Inverter (Inverter – Rectifier)* tipe Apollo MTP-4110F.

Tabel 4. Parameter masukan inverter

Inverter	Apollo MTP-4110F
Rating Daya	75 kW
Efisiensi	95%
lifetime	10 tahun

➤ Baterai

Baterai yang digunakan adalah baterai kering *deep cycle* Surrette 6CS25P dengan kapasitas 1.156 Ah.

Tabel 5. Parameter masukan baterai

Baterai	Surrette 6CS25P
Kapasitas	1.156 Ah
Tegangan	6 Volt
Efisiensi	80%
Min.State of charge	40%
Lifetime	12 tahun

➤ Batasan-Batasan Pengoperasian :

a. Batasan ekonomi yang digunakan untuk semua perhitungan ketika sistem disimulasikan adalah *annual real interest rate* 7.5%[14], umur/masa manfaat proyek selama 25 tahun.

b. *Dispatch strategi* yang digunakan adalah *Cycle charging* dan *maximum annual capacity shortage* sebesar 0%.

c. Denda emisi adalah denda yang dikenakan terhadap perusahaan, untuk membatasi emisi-emisi yang dihasilkan sistem apabila melebihi batas yang ditetapkan. Berdasarkan data Energy Information Administration (EIA), dilakukan pinalti emisi CO₂ sebesar \$100/ton, NO₂ sebesar \$5000/t dan SO₂ sebesar \$2000/t.[15]

2.5.5 Biaya Komponen Sistem

Biaya komponen sistem hibrida mikrohidro/PV/diesel ditunjukkan pada tabel 3.6 Setiap komponen (mikrohidro, modul surya, generator, baterai dan konverter) terdiri dari biaya modal, biaya pengganti dan biaya operasional dan pemeliharaan (O&M). Biaya pengganti turbin mikrohidro

dianggap tidak ada karena usia turbin mikrohidro pada umumnya mencapai 30 tahun, sedangkan usia proyek diasumsikan 25 tahun.

Tabel 6. Parameter masukan biaya ekonomi

Komponen	Modal	Biaya pengganti	O&M
Photovoltaic	\$2520/kW[12]	\$2520/kW	\$25/thn
75kW Diesel	\$11.500[17]	\$11.500	\$1,125/jam
Mikrohidro	\$105.000[2]	0	\$2600/thn
Konverter	\$23.000[18]	\$23.000	\$450/thn
Baterai	\$1.295[19]	\$1.295	\$10/thn

Setelah melalui langkah – langkah diatas, HOMER akan mensimulasi dan mengoptimasi model PLH yang telah ditentukan.

3. Hasil dan Analisa

3.1 Hasil optimasi HOMER

Simulasi dan optimasi dengan menggunakan HOMER menghasilkan beberapa konfigurasi yang berbeda sesuai dengan batasan minimum kontribusi energi terbarukannya. Tabel 7 berikut menunjukkan variabel masukan untuk setiap komponen PLH.

Tabel 7. Variabel sensitivitas komponen sistem

No	PV Array (kW)	Diesel (kW)	S6CS25P	Converter
1	0	0	0	0
2	20	75	40	60
3	30	100	80	75
4	40	150	120	90
5	50	200	160	100

Hasil konfigurasi sistem yang paling optimal ditentukan oleh besarnya NPC (*Net Present Cost*) terkecil, karena NPC adalah biaya keseluruhan sistem selama jangka waktu tertentu. Hasil konfigurasi sistem PLH yang paling optimal berdasarkan analisis Homer sebagai berikut :

Component	Cost (\$)	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Fac.	Class	Dist. Fee
PV Array	447,750	41,000	904,835	0.164	0.00	19,000	0.00
Hydro	2,238,700	99,889	904,835	0.164	0.35	39,052	1,347
Diesel	9,621,700	35,242	904,835	0.164	1.80	117,189	4,380
S6CS25P	117,300	154,439	904,835	0.164	0.34	117,189	4,380
Converter	23,000	140,472	904,835	0.164	0.37	117,189	4,380
Battery	8,621,480	178,385	904,835	0.164	0.27	123,189	2,705
Generator	3,342,480	257,746	904,835	0.164	0.90	169,438	4,057
Other	8,945,250	338,897	904,835	0.164	0.80	254,130	6,096
Unlabeled	113,000	454,946	904,835	0.164	0.80	262,637	8,760

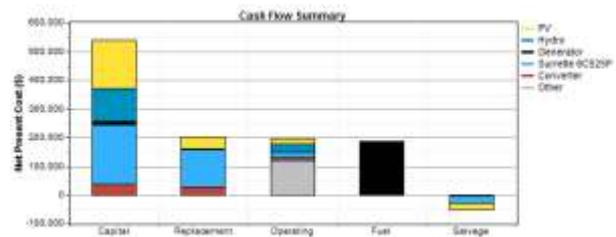
Gambar 10. Hasil optimasi Homer

Konfigurasi pembangkit listrik hibrida yang paling optimum terdiri dari PLTS 40 kW, PLTMH 50 kW, Generator diesel 75 kW, 160 unit baterai 1.156 Ah dan inverter 75 kW dengan sistem pengisian baterai *cycle charging*. Konfigurasi ini dipilih pada baris pertama dengan total *Net Present Cost* sebesar \$904.835, biaya pembangkitan listrik (*Cost of energy*) sebesar \$ 0,164/kWh, pemakaian BBM sebesar 19.885 L/thn, emisi CO₂ sebesar 54.364 kg/thn dan kelebihan energinya

pertahun sebesar 12.332 kWh atau sebesar 2,27 % dari total produksi energi pada sistem PLH selama setahun.

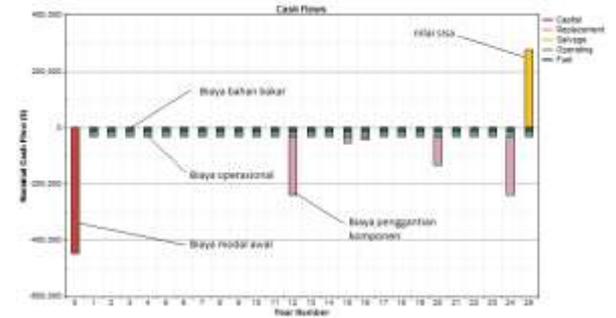
3.2 Ringkasan Biaya

Net Present Cost (NPC) merupakan biaya keseluruhan sistem selama jangka waktu tertentu. Total NPC mencakup semua biaya yang dikeluarkan selama proyek berlangsung, terdiri dari biaya komponen, biaya pengganti, biaya pemeliharaan, biaya bahan bakar, biaya penalti emisi, dan biaya suku bunga. Gambar 11. menunjukkan ringkasan biaya NPC sistem.



Gambar 11. Ringkasan biaya NPC sistem

Biaya terbesar yang harus dikeluarkan selama 25 tahun adalah biaya investasi awal yaitu sebesar \$ 447.750 atau 48% dari total NPC, diikuti biaya penggantian komponen 18%, biaya bahan bakar 17% dan biaya operasional dan pemeliharaan 17%. Sedangkan biaya komponen terbesar terdapat pada baterai, hal ini disebabkan karena *harga baterai* yang cukup lumayan *mahal*. Kemudian Homer juga menghitung nilai sisa untuk baterai, dan modul surya, sebagai nilai sisa pada komponen sistem hingga batas akhir proyek berlangsung.

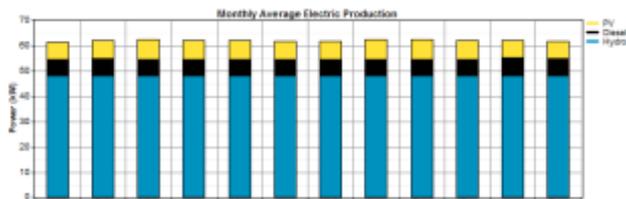


Gambar 12. Aliran biaya sistem PLH selama 25 tahun

Gambar 12 menunjukkan aliran biaya sistem PLH selama 25 tahun, dimana pengeluaran terbesar adalah pada awal proyek untuk membeli komponen-komponen sistem, kemudian pengeluaran rutin per- tahun adalah biaya operasional dan bahan bakar. Sesuai data sheet modul surya, pada tahun ke-20 terdapat pengeluaran untuk mengganti modul surya, penggantian baterai dilakukan setiap 12 tahun, penggantian konverter setiap 10 tahun, dan penggantian generator setiap melewati 15.000 jam operasi.

3.3 Produksi Listrik

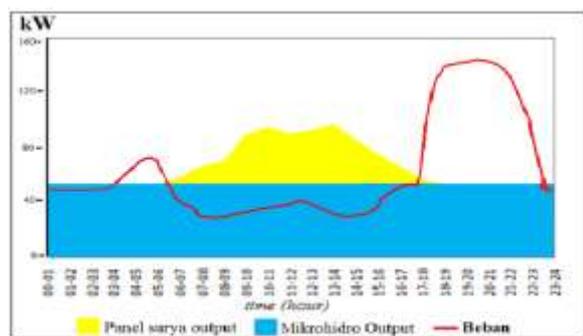
Hasil produksi listrik masing-masing komponen dijelaskan secara rinci di bawah ini.



Gambar 13. Rata-rata produksi energi selama setahun

Gambar 13 di atas menunjukkan rata-rata produksi energi listrik masing-masing komponen selama setahun. Parameter keluaran yang terdapat pada grafik di atas adalah biru (mikrohidro), sel surya (kuning), dan generator diesel (hitam). Total produksi listrik yang dihasilkan oleh sistem mikrohidro, panel surya dan generator diesel rata-rata pertahun sebesar 543.772 kWh. Kontribusi mikrohidro sebesar 422.465 kWh/tahun (78%), Panel surya sebesar 64.495 kWh/tahun (12%), dan Generator Diesel sebesar 56.813 kWh/tahun (10%). *Excess electricity* atau kelebihan listrik yang terdapat pada sistem ini adalah sebesar 12.332 kWh pertahun atau 2,27 %. Kelebihan listrik ini adalah selisih total produksi energi listrik selama satu tahun yang dihasilkan oleh sistem dan total beban yang disuplai. *Renewable Fraction* pada sistem sebesar 89 %. *Renewable Fraction* adalah persentase jumlah energi terbarukan pada sistem.

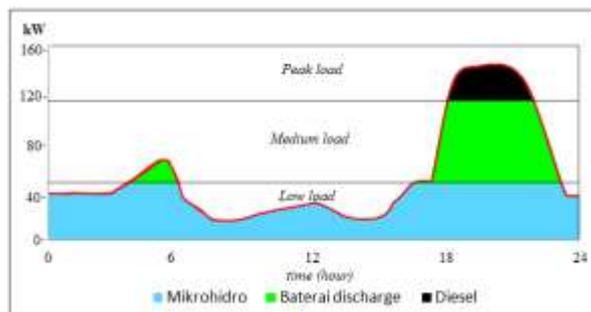
3.4 Grafik Simulasi Harian



Gambar 14. Kurva Dasar Pembangkit (tanggal 3 April 2014)

Gambar 14 di atas adalah produksi listrik pada tanggal 3 April 2014, dapat dilihat turbin mikrohidro (biru) beroperasi sepanjang hari dengan daya yang konstan sebesar 48,2 kW, sedangkan panel surya (kuning) menghasilkan energi pada siang hari, antara pukul 06.00-18.00 dengan daya keluaran maksimal sebesar 34 kW. Total energi yang dibangkitkan oleh mikrohidro dan panel surya pada tanggal 3 April 2014 sebesar 1489 kWh. Pada jam 00.00-03.00 dan jam 07.00-17.00 terdapat kelebihan

listrik. Kelebihan listrik ini terjadi karena produksi daya total mikrohidro dan panel surya melebihi permintaan beban pada interval waktu tersebut, sehingga energi listrik yang kelebihan kemudian disimpan di dalam baterai yang sewaktu waktu dapat dipergunakan sesuai permintaan beban.



Gambar 15. Kurva pembagian beban

Gambar 15. menunjukkan kurva pembagian beban (*load sharing*) agar pemakaian bahan bakar generator menjadi efisien.

- Pada kondisi beban rendah, genset tidak kerja, beban disuplai 100% oleh turbin mikrohidro dan kelebihan daya baik dari mikrohidro dan panel surya digunakan untuk mengisi baterai.
- Pada kondisi beban menengah, Inverter akan mensuplai beban dari bank baterai untuk membantu generator mikrohidro, dan selama kondisi baterai masih penuh sehingga diesel tidak perlu beroperasi.
- Pada kondisi beban puncak, baik diesel maupun inverter akan beroperasi dua-duanya untuk menuju paralel sistem dalam membantu generator mikrohidro menyuplai beban puncak.

4. Kesimpulan

Secara keseluruhan dalam studi kasus ini, sistem PLH yang optimal adalah kombinasi dari PLTMH, PLTS, dan Generator Diesel. Hasil simulasi Homer mendapatkan konfigurasi sistem yang optimal berupa 50 kW turbin mikrohidro, 40 kW panel surya, 75 kW generator diesel, 160 unit baterai sebesar 1.156 Ah, 75 kW konverter, dengan total NPC sebesar \$ 904.835 dan biaya keekonomian (COE) sebesar \$ 0,164.

Referensi

Journal:

- [1]. Febriansyah, Arif Juwito., *Optimalisasi Energi Terbarukan pada Pembangkit Tenaga Listrik dalam Menghadapi Desa Mandiri Energi di Margajaya*. Jurnal Ilmiah Semesta Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2012.
- [2]. Haryanto, Agus., Fauzan M Inu., Lanya, Budianto., *Kinerja Teknis dan Biaya Pembangkit Listrik Mikrohidro (Technical and Cost Performance of Microhidro Power Plant)*. Universitas Lampung, Lampung, 2013.

- [3]. Asidik, Nur., *Studi Evaluasi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Cokro Tulung di Desa Daleman Kecamatan Tulung Kabupaten Klaten*. UGM, Yogyakarta, 2011.
- [4]. Kumar L, Deepak., Bhusan D, Bibhuti., Akella, A.K., *Optimization of PV/Wind/Micro-Hydro/Diesel Hybrid Power System in Homer for the study Area*, International Journal on Electrical Engineering and Informatics, India, 2011
- [5]. Anayochukwu, vincent., *Potentials of Optimized Hybrid System in Powering Off-Grid Macro Base Transmitter Station Site*, University of Nigeria, 2013.

Textbooks:

Chapter in a book:

- [6]. Sulasno, *Teknik dan Sistem Distribusi Tenaga Listrik*, Badan Penerbit Universitas Diponegoro, Semarang, 2001..

Thesis/Disertation:

- [7]. Herlina, *Analisis Dampak Lingkungan dan Biaya Listrik Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida di Pulau Sebesi Lampung Selatan*. Thesis, Universitas Indonesia, Depok, 2009.

Reports

- [8]. *Laporan Studi Daya Dukung Pemanfaatan dan Pengembangan Kepulauan Enggano*, Badan Pengendalian Dampak Lingkungan Daerah Provinsi Bengkulu, 2006.
- [9]. *Getting Started Guide for Homer Legacy Version 2.68*, National Renewable Energy Laboratory of US, 2011.
- [10]. Gilman, Paul., Lilienthal Peter., *Micro power System Modeling with Homer*. Mistaya Engineering Inc, National Renewable Energy Laboratory of US, 2006.

Internet:

- [11]. Badan Pusat Statistik Kabupaten Bengkulu Utara; www.bengkuluutarakab.bps.go.id
- [12]. Asosiasi Pabrikan Modul Surya Indonesia. www.apamsi.org
- [13]. NASA Surface Meteorology and Solar Energy, www.eosweb.larc.nasa.gov
- [14]. Bank Indonesia. www.BI.go.id
- [15]. U.S Energy Information Administration. www.eia.doe.gov (2014)
- [16]. Kaplan Hydro Turbine : http://hecong.en.alibaba.com/product/1032829348218709989/50KW_Kaplan_hydro_turbine.html
- [17]. Depco Power System : www.depco.com/product
- [18]. Three-phase Bidirectional Dual Mode Hybrid Inverter for Mini-gridSystem: http://www.leonics.com/product/renewable/inverter/inverter_apollo_mtp-410_en.php
- [19]. Rolls Battery : www.rollsbattery.com/products