

OPTIMASI SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK HIBRIDA TENAGA SURYA, ANGIN, BIOMASSA, DAN DIESEL DI PULAU NYAMUK KARIMUNJAWA JAWA TENGAH DENGAN MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK HOMER

Lambertus Sinaga^{*)}, Hermawan, and Agung Nugroho

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl.Prof. Soedarto SH, Tembalang, Semarang, Indonesia

^{*)}Email : lambertus.sinaga@gmail.com

Abstrak

Pulau Nyamuk merupakan wilayah Kepulauan Karimunjawa Provinsi Jawa Tengah yang selama ini mengalami krisis listrik. Pulau Nyamuk memiliki potensi energi Matahari yang bersinar selama 12 jam per hari, sumber tenaga angin dengan intensitas kecepatan angin rata-rata 4,74 m/s, serta ketersediaan bahan bakar pembangkit listrik biomassa berupa serbuk kayu yang didapat dari pabrik kayu sebanyak 6 ton per hari. Sistem pembangkit listrik tenaga hibrida berupa energi matahari, energi angin, dan energi biomassa menjadi solusi yang tepat untuk membantu pemenuhan kebutuhan energi masyarakat di Pulau Nyamuk. Integrasi pada sistem PLH ini merupakan sistem yang multivariabel sehingga digunakan bantuan perangkat lunak HOMER versi 2.68. Perangkat lunak tersebut mengoptimasi hasil integrasi sistem PLH ini berdasarkan nilai (Net Present Cost, NPC) terendah. Sistem yang optimum untuk diterapkan di Pulau Nyamuk dalam jangka waktu proyek 15 tahun adalah integrasi PV, turbin angin, gasifikasi biomassa, dan generator diesel dengan nilai bersih sekarang (net present cost, NPC) sebesar \$ 1,856,472, biaya pembangkitan listrik (Cost of Energy, COE) sebesar \$ 0,273 per kWh, dan mengurangi emisi CO₂ sebesar 651.630 kg per tahun atau sebesar 95,5 % per tahun.

Kata kunci : Simulasi, Optimasi, Hibrida, NPC, COE

Abstract

Nyamuk island is a district of Karimunjawa in Central Java province that in a long time has been crisis of electricity. Nyamuk Island has the potential of solar energy shines for 12 hours per day, a source of wind power with the intensity of an average wind speed of 4.74 m/s, the availability of fuel biomass power plants in the form of sawdust obtained from wood mills reach 6 tons per day. Hybrid power plant system is based on renewable energy like solar energy, wind energy, and biomass energy be proper solution to help fulfill the needed of people energy in Nyamuk island. The hybrid system is a multi-variable system. HOMER version 2.68, a micropower optimization modeling software is used to simulating hybrid system configurations at once and ranks them according to its lowest (Net Present Cost, NPC). The results of the simulation and optimization HOMER is the integration of PV, wind turbines, biomass gasification, and a diesel generator with a net present value (net present cost, NPC) amounted to \$ 1,856,472, electricity generation costs (cost of energy, COE) of \$ 0,273 per kWh, and reduce CO₂ emissions by 651.630 kg per year or a total of 95.5%.

Keywords : Evaluation, Optimization, Hybrid, NPC, COE

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara kepulauan yang terbentang dari Sabang sampai Merauke. Indonesia terdiri dari ribuan pulau besar dan kecil yang dihubungkan oleh berbagai selat dan laut. Saat ini pulau yang terdaftar dan berkoordinat berjumlah 13.466 pulau. Wilayah Indonesia yang terbentang dari 6°08' LU hingga 11°15' LS, dan dari 94°45' BT hingga 141°05'BT terletak di posisi

geografis sangat strategis karena menjadi penghubung dua samudera dan dua benua, yaitu Samudera India dengan Samudera Pasifik, dan Benua Asia dengan Benua Australia.

Saat ini, Indonesia memfokuskan pembangunan di daerah-daerah terpencil yang antara lain adalah daerah kepulauan (pulau-pulau kecil). Sebagian besar penduduk di pulau-pulau kecil masih sangat membutuhkan bantuan

pemerintah, baik mengenai kemudahan aksesibilitas antar pulau, sumber energi listrik, sumber air bersih, ataupun telekomunikasi yang merupakan kebutuhan utama. Kebutuhan utama tersebut mempengaruhi langsung kondisi perekonomian, sosial budaya, pengetahuan, dan wawasan masyarakat. Dengan perkembangan kebutuhan listrik yang terus meningkat maka diperlukan sumber energi primer yang lebih besar pula, sedangkan energi primer yang tidak dapat diperbaharui jumlahnya terus menurun. Oleh karena itu, pemakaian energi terbarukan harus ditingkatkan untuk mengimbangi kenaikan kebutuhan akan energi listrik. Energi terbarukan tersebut dapat berupa tenaga air, angin, cahaya Matahari, biomassa, maupun panas Bumi. Sejalan dengan sasaran Pengelolaan Energi Nasional 2005-2025 yang memberikan sasaran peningkatan pencapaian energi baru terbarukan pada tahun 2025 menjadi 5%. [1]

Pembangunan energi baru terbarukan diregulasi berdasarkan Peraturan Presiden No.5/2006. Pada Peraturan Presiden tersebut dijelaskan pada Bab I dan II bahwa sumber energi yang sebagian besar didapat dari alam, termasuk minyak, gas, batubara, angin, air, biothermal, biomassa, biogas, dan ombak laut digunakan untuk konsumsi energi terbarukan nasional. Maka perlu upaya melakukan diversifikasi energi pada pembangkit tenaga listrik dengan memprioritaskan pemanfaatan energi baru terbarukan secara optimal. Kebijakan dalam pemanfaatan energi baru terbarukan sebagai sumber energi listrik harus tetap memperhatikan aspek teknis, ekonomi, dan keselamatan lingkungan hidup. Sehingga sumber energi terbarukan dapat dijadikan sebagai solusi energi alternatif dalam mengatasi krisis energi listrik di Kepulauan Indonesia. [2]

Selama ini, wilayah Kepulauan Karimunjawa mengalami krisis listrik sehingga pemanfaatannya dibatasi 12,5 jam sehari pada pukul 17.30 – 06.00 WIB untuk Pulau Karimunjawa dan Kemujan, sedangkan Pulau Parang, Pulau Nyamuk, dan Pulau Genting hanya 6 jam. Beberapa kebijakan pemerintah yang menjadi dasar adanya pengembangan sumber energi listrik yang menjadi kebutuhan primer untuk masyarakat yang secara langsung mempengaruhi kehidupan masyarakat di Kabupaten Jepara terutama di Kepulauan Karimunjawa, antara lain Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2009 tentang Ketenagalistrikan pasal 6 ayat 2 menyebutkan bahwa pemanfaatan sumberdaya energi harus dilaksanakan dengan mengutamakan sumber energi baru dan terbarukan. [3]

Pulau Nyamuk memiliki potensi energi terbarukan dari sumber energi Matahari pada periode ekuinoks saat Matahari bersinar selama 12 jam per hari, sumber tenaga angin dengan intensitas kecepatan angin rata-rata 4,74 m/s, serta ketersediaan bahan bakar pembangkit listrik biomassa berupa serbuk kayu yang didapat dari pabrik kayu Kendal mencapai 6 ton per hari. Kondisi ini cukup

layak untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi hibrida. Hal ini perlu diimplementasikan melalui pembangunan PLTH di Pulau Nyamuk yang merupakan hasil kerja sama dari pemerintah, pihak swasta, pihak perguruan tinggi dan masyarakat sekitar. Teknologi hibrida ini merupakan percontohan untuk dikembangkan ke daerah lain, terutama daerah terpencil guna memenuhi kebutuhan listrik masyarakat terpencil. Suatu sistem pembangkit listrik tenaga hibrida harus selalu dipantau dan dikontrol agar keberlangsungan pasokan energi listrik terus terjamin. Sistem listrik tenaga hibrida di Pulau Nyamuk menggunakan turbin angin, panel surya, gasifikasi biomassa, dan generator diesel sebagai back-up.

Studi sejenis yang pernah dilakukan, yaitu Anjaneyulu Krothapalli, melakukan studi pemanfaatan sistem pembangkit listrik tenaga hibrida untuk pemurnian air suling di negara bagian Abia, Nigeria. Studi yang dilakukan Anjaneyulu Krothapalli ini memanfaatkan potensi energi surya dan gasifikasi biomassa. [4] Penelitian disertasi Ifegwu Lekwauwa Kalu Eziyi pada daerah-daerah pedesaan di India dan Nigeria. [5] Dan draf laporan P.T. Contained Energi Indonesia yang berisi prakajian kelayakan untuk menentukan kemungkinan potensi tenaga listrik berkelanjutan dari sumber energi terbarukan di Pulau Parang, Pulau Nyamuk, dan Pulau Genting pada tahun 2015.

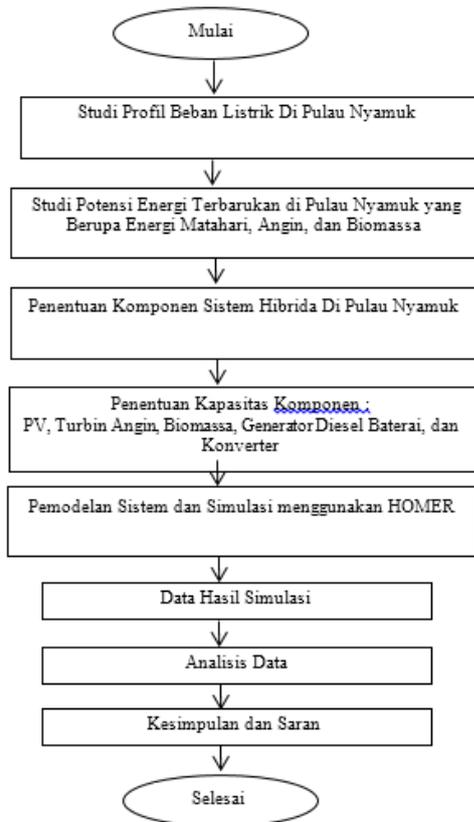
Tujuan pembuatan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui besar potensi energi terbarukan (energi angin, cahaya Matahari, dan biomassa) yang terdapat di Pulau Nyamuk, Karimunjawa, Jawa Tengah.
2. Menganalisis kinerja masing-masing komponen sistem pembangkit listrik hibrida di Pulau Nyamuk pada saat bekerja sendiri dan saat bekerja bersama-sama dengan menggunakan perangkat lunak HOMER untuk kondisi off-grid.
3. Menentukan konfigurasi sistem pembangkit listrik hibrida yang optimal, dilihat dari biaya produksi energi listrik atau NPC (*Net Present Cost*) terendah, emisi, dan ketersediaan sumber energi terbarukan di Pulau Nyamuk menggunakan perangkat lunak HOMER untuk kondisi off-grid.
4. Mengetahui hasil analisis sensitivitas apabila variabel sensitivitas (beban harian, ketersediaan sumber energi hibrida, dan harga bahan bakar) berubah-ubah.

2. Metode

2.1. Perancangan Simulasi PLTH Pulau Nyamuk

Diagram alir perancangan simulasi PLTH di Pulau Nyamuk, Kecamatan Karimunjawa, Provinsi Jawa Tengah adalah sebagai berikut :



Gambar 1. Diagram alir metode perancangan

2.2. Data Sistem

Data sistem perancangan simulasi PLTH ini terdiri dari beberapa bagian penting, yaitu alat elektronik yang terpasang di Pulau Nyamuk, profil beban listrik di Pulau Nyamuk, dan potensi energi terbarukan di Pulau Nyamuk.

2.2.1. Profil Beban

Penelitian ini menggunakan data beban dari Pulau Nyamuk, Kecamatan Karimunjawa, Kabupaten Jepara. Selama ini Pulau Nyamuk dialiri listrik hanya selama 6 jam yang dipasok dari Pembangkit Listrik Tenaga Diesel karena belum ada aliran listrik dari PLN.

Tabel 1. Alat elektronik di Pulau Nyamuk [3]

Alat Elektronik	Singkatan	Jumlah	Watt/Unit
Penerangan Jalan	PJU	32	23
Lampu Rumah	LED	580	20
Kipas Angin	FAN	150	35
Kulkas	REF	21	50
Freezer	FRE	21	140
Setrika	IRO	16	350
Rice Cooker	RCO	170	465
Pompa Air	PMP	117	650
Mesin Cuci	WSH	3	450
TV	TV	46	70
Alat Pertukangan	TOL	8	1200
Komputer	COM	4	250

Tabel 2. Profil beban 24 jam di Pulau Nyamuk [3]

Jam	Daya (W)
00.00 – 01.00	27.233
01.00 – 02.00	27.683
02.00 – 03.00	26.998
03.00 – 04.00	27.648
04.00 – 05.00	26.858
05.00 – 06.00	117.59
06.00 – 07.00	158.195
07.00 – 08.00	155.935
08.00 – 09.00	94.38
09.00 – 10.00	91.69
10.00 – 11.00	70.04
11.00 – 12.00	127.285
12.00 – 13.00	132.705
13.00 – 14.00	79.51
14.00 – 15.00	76.51
15.00 – 16.00	76.23
16.00 – 17.00	75.63
17.00 – 18.00	124.98
18.00 – 19.00	176.526
19.00 – 20.00	174.516
20.00 – 21.00	92.831
21.00 – 22.00	91.446
22.00 – 23.00	33.078
23.00 – 24.00	28.458



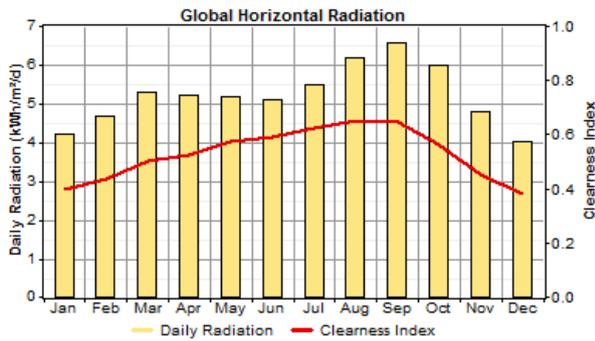
Gambar 2. Profil beban harian Pulau Nyamuk [3]

Dapat dilihat bahwa beban puncak sebesar 177 kW. Sedangkan profil beban harian sebesar 2.114 kW per harinya di Pulau Nyamuk. Berdasarkan data alat listrik, cara penggunaan alat listrik, dan jumlah pelanggan di Pulau Nyamuk, maka dapat dilakukan metode ekstrapolasi kebutuhan listrik.

2.2.2. Potensi Energi Terbarukan

2.2.2.1. Potensi Energi Matahari

Potensi energi Matahari sebagai sumber energi dinyatakan dalam data indeks kecerahan (*Clearnex Incex*) dan radiasi sinar matahari (*Solar Radiation*) yaitu rata-rata global radiasi matahari pada permukaan horizontal, dinyatakan dalam kWh/m², untuk setiap hari dalam satu tahun. Data *surface meteorology and solar energy (SMSE)* dari *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* dan *GAISMA* telah digunakan sebagai sumber informasi radiasi Matahari di Pulau Nyamuk. Berikut ini adalah grafik potensi energi Matahari di Pulau Nyamuk.

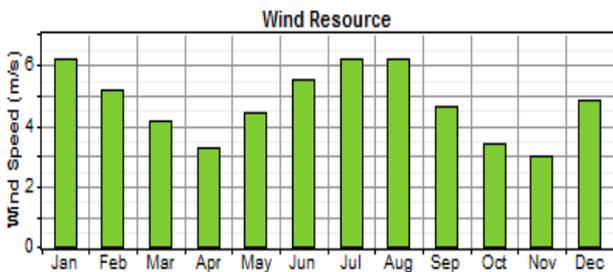


Gambar 3. Potensi energi Matahari di Pulau Nyamuk[10]

Data potensi energi Matahari untuk lokasi PLTH Pulau Nyamuk didapatkan indeks *daily radiation* rata-rata sebesar 5,49 kWh/m²/hari.

2.2.2.2. Potensi Energi Angin

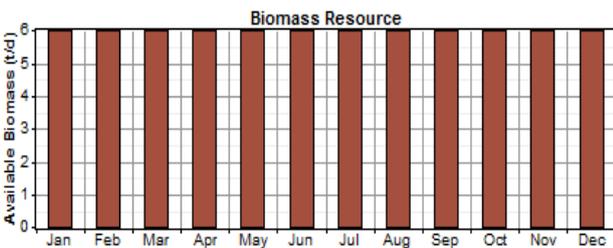
Berdasarkan data potensi energi angin di lokasi Pulau Nyamuk, rata-rata kecepatan diukur dari ketinggian 10 meter dari permukaan tanah dan 24 meter di atas permukaan laut adalah sebesar 4,74 m/s. Berikut ini adalah grafik potensi energi angin di Pulau Nyamuk



Gambar 4. Potensi energi angin di Pulau Nyamuk

2.2.2.3. Potensi Energi Biomassa

Data potensi energi biomassa yang diperoleh dari ketersediaan bahan bakar untuk proses gasifikasi biomassa berupa serbuk kayu yang didapat dari pabrik kayu Kendal mencapai 6 ton per hari.



Gambar 5. Potensi energi biomassa di Pulau Nyamuk

2.2.3. Komponen Utama Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida

Semua harga investasi yang digunakan pada simulasi ini didapat di Pulau Nyamuk yang telah dikonversikan ke dalam mata uang US\$ dengan nilai kurs transaksi Bank Indonesia sesuai Agustus 2015, yaitu kurs jual US\$ 1 sebesar Rp 13.461 [6].

2.2.3.1. Panel Surya (PV)

HOMER memodelkan PV array sebagai peralatan yang memproduksi energi DC. Daya Ppv (DC) yang dibangkitkan oleh modul surya dengan mengabaikan efek temperatur pada PV modul dapat ditentukan menurut persamaan berikut :

$$P_{pv} = fpv \cdot Y_{pv} \frac{G_T}{G_{T,STC}} \quad (2.1)$$

Dimana

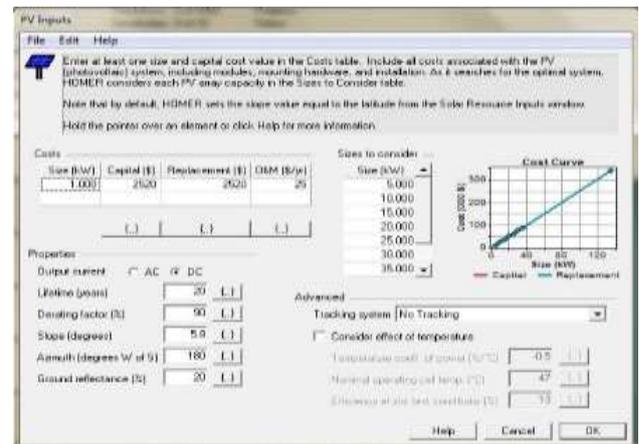
Y_{pv} : Daya output pada pengujian dengan kondisi standar (kW).

fpv : PV derating factor.

G_T : Radiasi sesaat pada permukaan PV modul (kW/m²).

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

Biaya dari PV array ditentukan melalui biaya modal yang dimiliki (\$), biaya pengganti komponen (\$), dan biaya operasi & pemeliharaan (\$/yr). Biaya pengganti adalah biaya untuk mengganti sel surya apabila mengalami kerusakan hingga batas waktu garansi.



Gambar 6. Parameter masukan panel surya

2.2.3.2. Turbin Angin

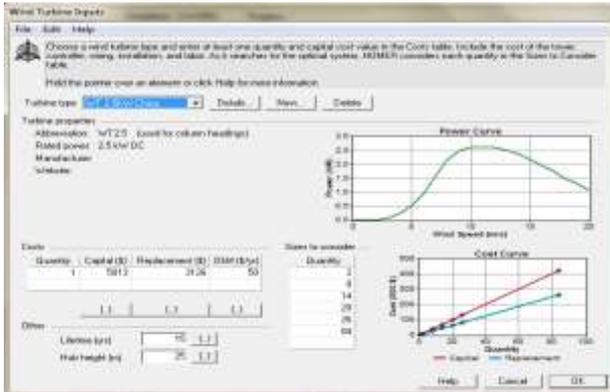
HOMER memodelkan turbin angin dapat menghasilkan energi listrik dari energi kinetik yang diterima saat angin berhembus. Turbin angin secara umum diklasifikasikan berdasarkan daya nominal pada kecepatan angin tertentu yang berhembus memutar turbin angin. Daya (W) yang

dibangkitkan oleh turbin angin ditentukan menurut persamaan berikut:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_{pMax} \quad (2.2)$$

Dimana :

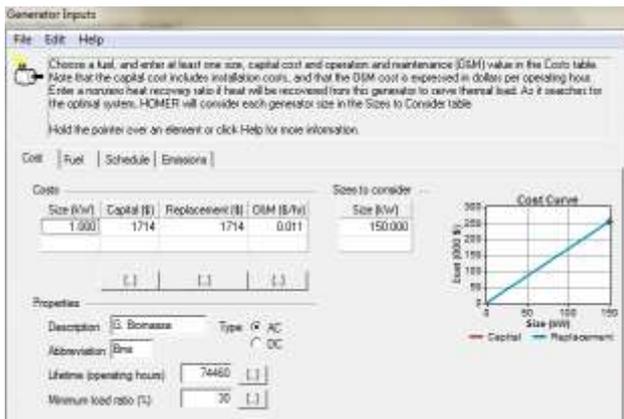
- P : Daya yang dibangkitkan (W)
- ρ : densitas udara (kg/m^3)
- A : Luas area baling-baling (m^2)
- V : Kecepatan angin (m/s)
- C_{pmax} : Koefisien daya teoritis (0,59)



Gambar 7. Parameter masukan panel surya

2.2.3.3. Gasifikasi Biomassa

Gasifikasi biomassa adalah proses konversi termokimia dari biomassa padat menjadi gas bakar. Gas bakar tersebut mengandung karbon monoksida (CO), Hidrogen (H₂), dan sedikit kandungan metan (CH₄). Gas tersebut dipergunakan sebagai bahan bakar motor untuk menggerakkan generator pembangkit listrik.



Gambar 8. Parameter masukan gasifikasi biomassa

2.2.3.4. Generator Diesel

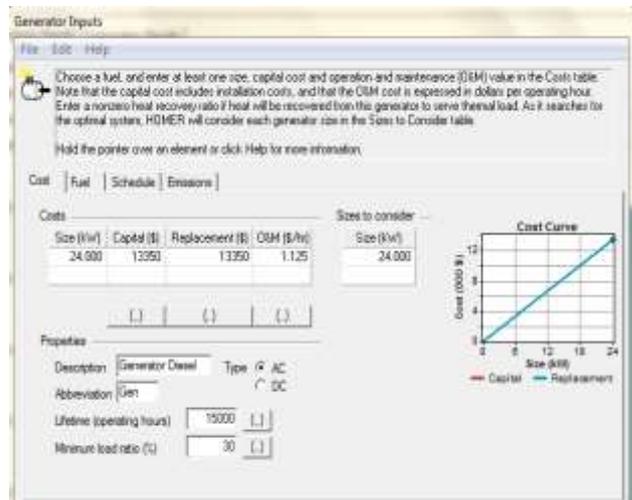
HOMER dapat memodelkan sistem tenaga listrik sebanyak tiga generator, dengan keluaran berupa AC/DC, dan bahan bakar yang berbeda. Kurva bahan bakar menggambarkan jumlah bahan bakar yang dikonsumsi

oleh generator untuk menghasilkan listrik. Persamaan berikut digunakan untuk menghitung bahan bakar yang dikonsumsi oleh generator dalam unit/jam sebagai fungsi keluaran listrik.

$$F = F0. Ygen + F1. Pgen \quad (2.3)$$

dimana:

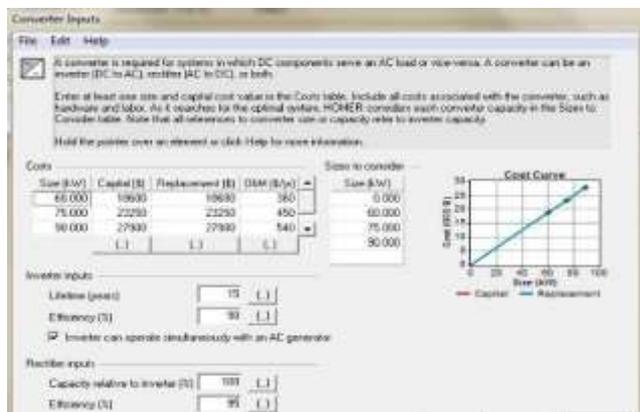
- P_{gen} : daya output generator diesel (kW)
- F : tingkat konsumsi bahan bakar (L/jam)
- F0 : kurva koefisien intercept bahan bakar (L/jam/kW)
- F1 : slope kurva bahan bakar (L/jam/kW)
- Y_{gen} : kapasitas generator diesel (kW)



Gambar 9. Parameter masukan generator diesel

2.2.3.5. Konverter

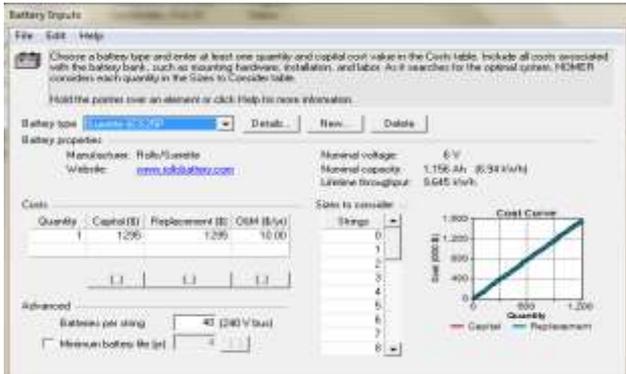
Konverter yang digunakan adalah *bidirectional inverter (inverter - rectifier)* tipe Apollo MTP-4110F. Bidirectional inverter tipe Apollo MTP merupakan jenis inverter yang biasa digunakan pada area *off-grid* untuk sistem pembangkit listrik hibrida.



Gambar 10. Parameter masukan bi-directional inverter

2.2.3.6. Baterai

Baterai yang digunakan adalah baterai kering *deep cycle* Surrette 6CS25P dengan kapasitas 1.156 Ah/6V. Baterai *deep cycle* merupakan baterai yang biasa digunakan untuk fotovoltaik dan *back-up power*. Pada perancangan ini baterai disusun 40 per string (240 V).



Gambar 11. Parameter masukan baterai

2.3. Persyaratan Operasi

Perangkat lunak HOMER dalam penentuan hasil simulasi mempertimbangkan kelayakan kapasitas maksimum tahunan pada sistem pembangkit listrik hibrida (PLH) yang terdiri dari beban harian, komponen sistem, dan baterai. Nilai ekonomi memegang peranan penting dalam proses simulasi HOMER, dimana dalam proses pengoperasiannya akan mencari konfigurasi sistem dengan total biaya bersih sekarang (*Net Present Cost/NPC*) terendah.

HOMER menghitung NPC dengan menggunakan persamaan berikut :

$$C_{NPC} = \frac{C_{ann,tot}}{CRF(i,Rproj)} \quad (2.4)$$

Dimana,

Cann,tot : total biaya tahunan (\$/tahun)

CRF : faktor pemulihan modal

i : tingkat bunga (%)

Rproj : umur/masa manfaat proyek (tahun)

2.4. Sensitivitas

Sensitivitas akan menunjukkan bagaimana hasil konfigurasi sistem yang optimal apabila nilai parameter masukan (*input*) berbeda-beda. Pengguna dapat menunjukkan analisis sensitivitas dengan memasukkan beberapa nilai variabel sensitivitas. HOMER dapat memasukkan rentang nilai untuk nilai variabel tunggal ataupun nilai variabel ganda yang dinamakan variabel sensitivitas. Pada perancangan ini variabel sensitivitas terdiri dari beban harian, harga bahan bakar diesel, dan ketersediaan biomassa. Potensi sumber energi hibrida

berupa biomassa tidak begitu mempengaruhi hasil sensitivitas karena memiliki nilai rata-rata yang sama walaupun tersedia 6 ton/hari atau 7 ton/hari.

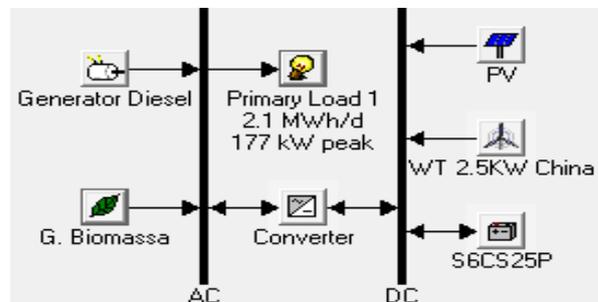
2.5. Batasan- Batasan Pengoperasian

1. Batasan ekonomi yang digunakan untuk semua perhitungan ketika sistem disimulasikan adalah suku bunga 7.5%, yaitu suku bunga yang berlaku pada negara Indonesia hingga 2020. Umur/masa manfaat proyek selama 15 tahun.
2. *Dispatch strategy* yang dipilih adalah *Load Following* dimana output generator mengikuti permintaan beban.
3. 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.

3. Hasil dan Analisa

3.1. Hasil Optimasi HOMER

Proses optimasi dilakukan setelah proses simulasi selesai dilakukan. Proses simulasi awal ini bertujuan untuk menentukan variabel ukuran optimum pada masing-masing komponen utama yang terpasang saat beroperasi sendiri.

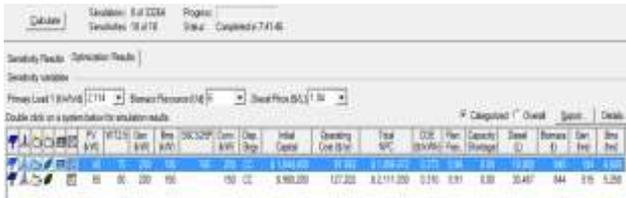


Gambar 12. Konfigurasi sistem pembangkit hibrida saat proses optimasi

HOMER mengurutkan hasil konfigurasi berdasarkan nilai NPC (*Net Present Cost*) yang terendah terhadap 33.264 konfigurasi sistem dengan 18 variabel sensitivitas. Hasil konfigurasi sistem yang optimal ditentukan oleh besarnya NPC (*Net Present Cost*) terkecil karena NPC merupakan biaya keseluruhan sistem selama jangka waktu tertentu. Hasil konfigurasi sistem PLTH yang optimum ditunjukkan pada Gambar 13. berikut.

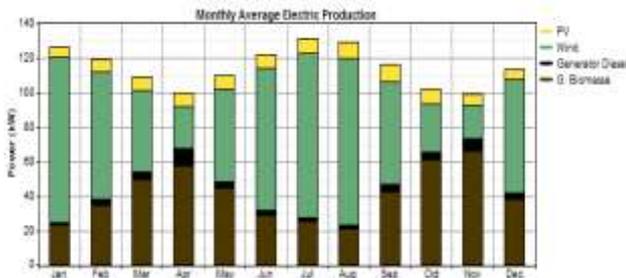
Konfigurasi pembangkit listrik hibrida yang optimum, yaitu terdiri dari panel surya (photovoltaic) 40 kW, turbin angin 70 unit (2,5 kW per unit), gasifikasi biomassa 150 kW, generator diesel 200 kW, 160 unit baterai 1.156 Ah, dan konverter 200 kW. Konfigurasi ini paling optimum

karena memiliki nilai NPC (*Net Present Cost*) yang paling rendah sebesar \$ 1,856,472 dan juga memiliki nilai COE (*Cost of Energy*) yang paling kecil sebesar \$ 0.273 /kWh. Konfigurasi ini optimum saat beban di Pulau Nyamuk 2.114 kWh/hari, biomassa 6 ton, dan harga diesel \$1.04/liter.



Gambar 13. Konfigurasi optimum sistem PLTH hasil optimasi HOMER

3.2. Produksi Listrik



Gambar 14. Produksi energi listrik pada sistem

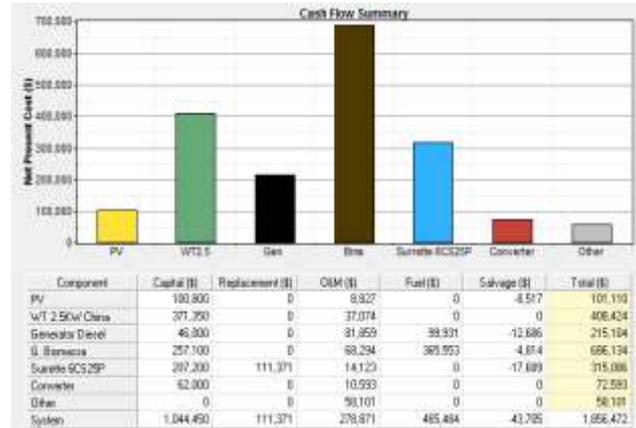
Gambar 14. menunjukkan rata-rata produksi energi listrik masing-masing komponen sistem. Total produksi listrik yang dihasilkan oleh sistem ini rata-rata per tahun sebesar 1.006.398 kWh. *Renewable fraction* pada sistem ini sebesar 94 %. *Renewable fraction* adalah persentase jumlah energi terbarukan pada sistem. *Renewable fraction* pada sistem ini tidak mencapai 100% karena generator diesel beroperasi selama 184 jam per tahun pada sistem. Generator diesel diharapkan beroperasi saat sumber energi hibrida pembangkit terhambat atau tidak tersedia.

3.3. Ringkasan Biaya

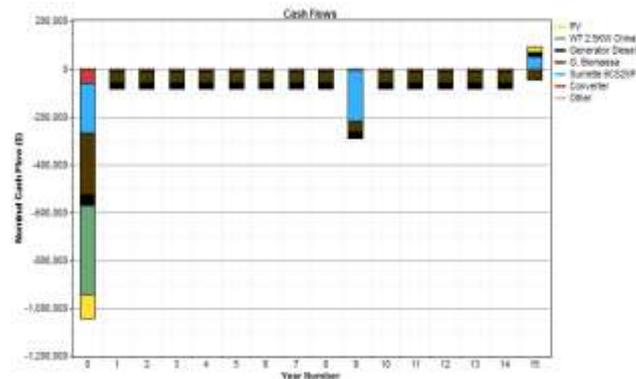
Ringkasan biaya berikut ini merupakan ringkasan biaya komponen sistem selama 15 tahun proyek berjalan. *Net Present Cost* (NPC) merupakan biaya keseluruhan sistem selama jangka waktu tertentu. Total NPC mencakup semua biaya yang dikeluarkan selama proyek berlangsung. Ringkasan biaya (NPC) terdiri dari biaya komponen, biaya penggantian, biaya pemeliharaan, biaya bahan bakar, biaya penalti emisi, dan biaya suku bunga.

Pada Gambar 16. dapat dilihat aliran biaya selama 15 tahun proyek berjalan berdasarkan nilai *capital*, *replacement*, *salvage*, *operating*, *fuel*. Penggantian komponen terjadi pada tahun ke-9 yaitu berupa

penggantian baterai. Sedangkan komponen lain hanya memerlukan nilai biaya operasi dan bahan bakar. Biaya penggantian panel surya, turbin angin, dan konverter tidak ada selama proyek berjalan karena umur pemakaian lebih dari 15 tahun. Pada tahun ke-15 juga terdapat nilai sisa (*salvage*) yang merupakan nilai sisa pada akhir proyek sistem pembangkit hibrida selama 15 tahun berlangsung.



Gambar 15. Ringkasan biaya komponen sistem



Gambar 16. Aliran biaya sistem PLTH berdasarkan nilai ekonomi

3.4. Analisis Hasil Simulasi Sensitivitas

3.4.1. Analisis Sensitivitas Beban Harian

Analisis sensitivitas beban harian dilakukan untuk mengetahui dampak perubahan beban harian terhadap biaya yang harus dikeluarkan. Secara keseluruhan hasil sensitivitas variabel beban harian menunjukkan dampak perubahan kapasitas PV yang digunakan. Saat beban harian 2.114 kWh/hari, maka PV yang digunakan sebaiknya berkapasitas 40 kW dan turbin angin sebanyak 70 unit. Saat beban harian 2.325 kWh/hari, maka PV yang digunakan sebaiknya berkapasitas 10 kW dan turbin angin sebanyak 100 unit. Saat beban harian 2.536 kWh/hari, maka PV yang digunakan sebaiknya berkapasitas 150 kW dan turbin angin sebanyak 70 unit.

3.4.2. Analisis Sensitivitas Harga Bahan Bakar

Analisis sensitivitas harga bahan bakar diesel dilakukan untuk mengetahui dampak perubahan harga bahan bakar terhadap biaya yang harus dikeluarkan. Dapat dilihat bahwa kenaikan harga bahan bakar diesel mengakibatkan penurunan NPC sistem pembangkit hibrida. Hal ini dapat dijelaskan dengan melihat jumlah jam operasi masing-masing komponen akibat kenaikan harga bahan bakar diesel.

Tabel 3. Jumlah jam operasi tiap komponen akibat perubahan harga diesel

Sensitivitas Harga Diesel (\$/L)	Jumlah Jam Operasi (Jam/Tahun)			
	PV	T. Angin	G. Biomassa	G. Diesel
1.04	4.393	7.956	4.689	184
1.14	4.393	7.956	4.816	163
1.28	4.393	7.956	4.842	158

3.5. Analisis Emisi

Hasil simulasi sensitivitas sistem pembangkit listrik hibrida ini menghasilkan emisi karbon dioksida (CO₂) 30,377 kg per tahun. Sistem pembangkit hibrida ini telah berhasil mengurangi emisi CO₂ sebesar 651.630 kg per tahun atau sebesar 95,5% per tahun dari emisi yang dihasilkan saat hanya generator diesel yang bekerja untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat di Pulau Nyamuk.. Sistem pembangkit hibrida layak dibangun karena tidak terlalu menambah jumlah emisi CO₂ yang berlebih di Bumi.

4. Kesimpulan

1. Berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh menggunakan perangkat lunak HOMER, potensi energi terbarukan (energi angin, cahaya Matahari, dan biomassa) yang terdapat di Pulau Nyamuk, Karimunjawa, Jawa Tengah sangat layak dijadikan sistem pembangkit listrik hibrida.
2. Konfigurasi sistem yang optimal ditentukan oleh besarnya Net Present Cost (NPC) yang terendah selama jangka waktu tertentu. Pada hasil simulasi didapatkan konfigurasi pembangkit listrik hibrida yang optimal, yaitu terdiri dari panel surya (photovoltaic) 40 kW, turbin angin 70 unit (2,5 kW per unit), gasifikasi biomassa 150 kW, generator diesel 200 kW, 160 unit baterai 1.156 Ah, dan konverter 200 kW, dengan total NPC sebesar \$ 1,856,472 dan biaya energi listrik (COE) sebesar \$ 0.273/kWh.
3. Selama 15 tahun proyek berjalan hanya terdapat biaya penggantian baterai dan operasional pembangkit listrik hibrida pada tahun ke-9 sebesar \$ 111,371. Komponen utama yang lain tidak memerlukan penggantian selama proyek berjalan karena memiliki lifetime dan

operation hours lebih dari jangka waktu proyek berjalan.

4. Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengantisipasi kemungkinan terjadinya perubahan nilai pada beberapa tahun ke depan. Faktor sensitivitas yang berpengaruh di dalam konfigurasi sistem tenaga hibrida ini adalah konsumsi beban harian dan harga bahan bakar. Sedangkan potensi sumber energi hibrida berupa biomassa tidak begitu mempengaruhi hasil sensitivitas karena memiliki nilai rata-rata yang sama walaupun tersedia 6 ton/hari atau 7 ton/hari.
5. Berdasarkan analisis aliran biaya proyek hasil simulasi disimpulkan bahwa komponen sistem pembangkit listrik hibrida akan memiliki nilai lebih pada akhir proyek.
6. Perancangan simulasi sistem pembangkit listrik hibrida ini mengurangi emisi CO₂ sebesar 651.630 kg per tahun atau sebesar 95,5% per tahun dari emisi yang dihasilkan saat hanya generator diesel yang bekerja untuk memenuhi kebutuhan listrik masyarakat di Pulau Nyamuk.

Referensi

- [1]. ESDM (2007, November). Diakses dari: <http://www.esdm.go.id>.
- [2]. Peraturan Presiden No.5/2006 tentang pembangunan energi baru terbarukan.
- [3]. Draf Laporan. Pra-Kajian Kelayakan Untuk Menentukan Kemungkinan Potensi Tenaga Listrik Berkelanjutan Dari Sumber Energi Terbarukan di Pulau Parang, Pulau Nyamuk, dan Pulau Genting. PT Contained Energi Indonesia. Jakarta Selatan. 2015.
- [4]. Anjaneyulu Krothapalli, "Sustainable Rural Development: Solar/Biomass Hybrid", 2013 ISES Solar World Congress, Florida State University, 2013.
- [5]. Ifegwu Lekwauwa Kalu Eziyi, "Distributed Renewable Energy System for Sustainable Rural Development", Dissertation, Florida State University, 2013.
- [6]. Bank Central Republik Indonesia. 2015. Kurs Transaksi Bank Indonesia Agustus 2015. Diakses dari http://bi.go.id/biweb/Templates/Moneter/Default_Kurs_ID.
- [7]. Bank Central Republik Indonesia. 2015. Suku bunga Pinjaman Investasi yang Diberikan Menurut Kelompok Bank. Diakses dari <http://www.bi.go.id/web/id/moneter/BI+Rate/Data+BI+Rate>.
- [8]. Team SOS. Pemanasan Global Solusi dan Peluang Bisnis. PT Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.2011.
- [9]. Najib M Habibie. Achmad Sasmito, Roni Kurniawan. Kajian Potensi Energi Angin di Wilayah Sulawesi dan Maluku. Puslitbang BMKG. Jakarta. Jurnal Meteorologi dan Geofisika Volume 12 nomor 2- September 2011 :181-187.
- [10]. NASA Surface Meteorology and Solar Energy, diakses dari : www.eosweb.larc.nasa.gov.
- [11]. Rusnoto. Lauidi Shofani. Pengaruh susunan Sudut Turbin Angin Savonius Terhadap Karakteristik Daya Turbin. Jurnal Upstegal. 2009. Diakses dari <http://e-jurnal.upstegal.ac.id/index.php/Cermin/article/View/135/140>.

- [12]. Mohit Singh, "Dynamic Models for Wind Turbines and Wind Power Plants", USA, NREL, The University of Texas, 2011.
- [13]. Aulia Muhaddi, "Evaluasi Kinerja Turbin Angin di Kawasan Pembangkit Listrik tenaga Hibrid Kampung Nelayan Pandansimo Bantul Yogyakarta", Skripsi, Teknik Fisika, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2012.
- [14]. Diakses melalui halaman website resmi : <http://www.freewebs.com/snatalie/turbine-types.gif>
- [15]. Miro Zeman, "Handbook of Solar Cells", Netherland, Delft University Of Technology.
- [16]. Taufik Chemistryadha Wijaya, "Optimasi Potensi Energi Terbarukan untuk Sistem Pembangkit *Hybrid* di Desa Margajaya Bengkulu Utara Menggunakan Perangkat Lunak Homer", Penelitian, Teknik Elektro, Universitas Diponegoro. Semarang. 2014.
- [17]. Anonim, "Guide to Interpreting I-V Curve of Measurement PV Arrays", Solmetric.
- [18]. Diakses secara langsung pada situs : www.wholesolar.com
- [19]. ANAND KUMAR S, K L RATNAKAR, B.S.YOGANANDA, Dr. B. Rajesh Kamath, "Simulation of Photovoltaic Cell and MPPT Controllers and their Analysis" International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT), Volume 4, Issue 3, May 2015
- [20]. Tom Lambert^[1], Paul Gilman, and Peter Lilienthal^[2], "*Micropower System Modeling With Homer*", Mistaya Engineering Inc^[1], National Renewable Energy Laboratory^[2], USA, 2012.
- [21]. Direktori Pulau-Pulau Kecil Indonesia. Diakses secara langsung dari: <http://www.ppk-kp3k.kkp.go.id/direktori-pulau/index.php>.
- [22]. "Getting Started Guide for Homer Legacy Version 2.68", National Renewable Energy Laboratory of US, 2011.