

Optimasi Kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida Menggunakan Homer Di Pulau Tunda

Muhamad Otong¹, Alimuddin¹, Ibnu Mas'ud¹

¹Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon, Banten.

Informasi Artikel

Naskah Diterima : 16 Maret 2017

Direvisi : 14 April 2017

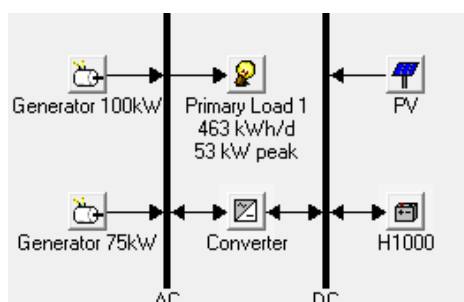
Disetujui : 15 Juni 2017

*Korespondensi Penulis :

muhamadotonguntirta@yahoo.co

m

Graphical abstract



Abstract

Electric energy in the Tunda Island from early 2016 is provided by diesel and solar power with operating time of 12 hours. This island has an average wind speeds over 6m/s, so the potential using of wind power plant is sufficient for the need of the electrical load. The purpose of this research is to design hybrid power plant using HOMER software, in order to obtain optimal system between diesel, solar power and wind turbine configuration. This thorough integration of hybrid power plant is a multi variable system so it needs help or method using software, in this case HOMER version 2.68, This software optimizes based on the smallest cost aspect. The results showed that the design of optimal hybrid power plant is scenario 3 with capacity at each plant is: 117kWp at solar power, 60kW at wind turbine and 75kW at diesel generator. The conclusions obtained contribution from solar-wind-diesel is 43%, 56% and 1%. Optimization in scenario 3 has the smallest cost aspect with the present net value (NPC) of \$544703, the cost of electrical energy (COE) of \$0.349/kWh. This system can reduce exhaust emissions by 4584kg/yr if paid for exhaust gas emission penalty of about \$1018/year.

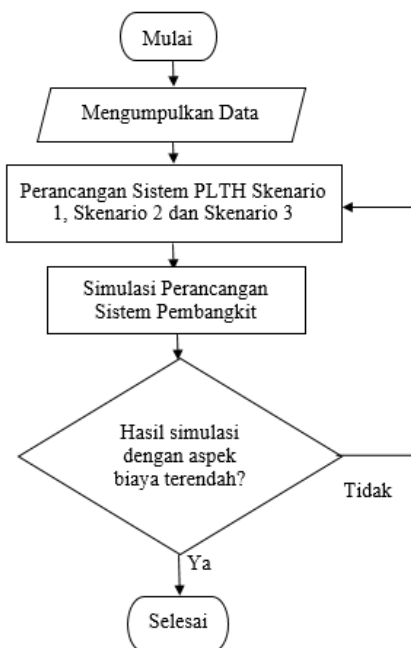
Keywords: PLTH, NPC, COE

Abstrak

Energi listrik di Pulau Tunda dari awal tahun 2016 disediakan oleh PLTD dan PLTS dengan waktu operasi 12 jam. Pulau ini memiliki rata-rata kecepatan angin diatas 6m/s sehingga berpotensi menggunakan PLTB untuk mencukupi kebutuhan beban listriknya. Tujuan dari penelitian ini untuk merancang sistem PLTH menggunakan software HOMER, agar diperoleh sistem yang optimal antara konfigurasi PLTD, PLTS dan PLTB. Secara menyeluruh integrasi pada PLTH ini merupakan sistem multi variabel sehingga dibutuhkan bantuan atau metode menggunakan perangkat lunak, dalam hal ini HOMER versi 2.68, perangkat lunak ini mengoptimasi berdasarkan aspek biaya terkecil. Hasil penelitian menunjukkan perancangan sistem PLTH yang optimal adalah skenario 3 dengan kapasitas pada masing-masing pembangkit adalah: 117kWp pada PLTS, 60kW pada PLTB dan 75kW pada PLTD. Kesimpulan yang diperoleh dari kontribusi PLTS-PLTB-PLTD sebesar 43%, 56% dan 1%. Optimasi pada skenario 3 ini memiliki aspek biaya yang paling kecil dengan nilai bersih sekarang (NPC) sebesar \$544703, biaya energi listrik (COE) sebesar \$0.349/kWh. Sistem ini dapat mengurangi emisi gas buang sebesar 4584kg/tahun jika dibayarkan untuk penalti emisi gas buang sekitar \$1018/tahun.

Kata kunci: PLTH, NPC, COE

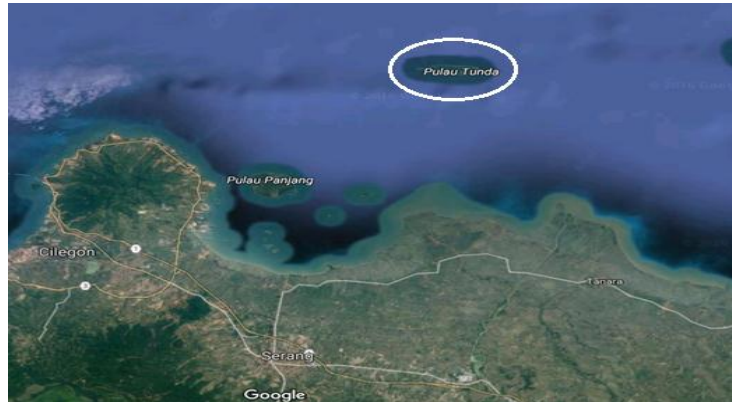
© 2017 Penerbit Jurusan Teknik Elektro UNTIRTA Press. All rights reserved



1. PENDAHULUAN

Pulau Tunda merupakan salah satu gugusan pulau dari 17 pulau yang berada di Kabupaten Serang, Provinsi Banten. Secara administratif termasuk ke dalam Kecamatan Tirtayasa, Kabupaten Serang, Provinsi Banten. Secara geografis terletak di koordinat 5°48'18" s/d 5°49'20" LS dan 106°15'14" s/d 106°17'27"BT. Pada Pulau ini terdapat satu kelurahan atau desa yakni Kelurahan

Wargasara yang terdiri dari dua Kampung, yaitu: Kampung Barat dan Kampung Timur. Berdasarkan data kelurahan Wargasara tahun 2015 total luas Pulau Tunda adalah ± 260 ha yang ditempati oleh 436 KK dengan jumlah penduduk mencapai 1502 orang penduduk yang pekerjaannya bertumpu pada hasil kelautan yaitu bermata pencaharian sebagai nelayan, dengan sebagian kecil bekerja sebagai pedagang dan pertukangan. Pada awal tahun 2015 pemerintah kabupaten serang telah menetapkan pulau tunda sebagai salah satu daerah tujuan pariwisata (BPS, 2015). Letak Pulau Tunda dapat dilihat pada



Gambar 1.

Gambar 1. Peta Lokasi Pulau Tunda

Saat ini energi listrik di Pulau Tunda berasal dari PLTD dan PLTS. Pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) terdiri dari 2 unit generator mesin diesel yang masing-masing memiliki kapasitas terpasang 100kW dan 75kW. PLTD hanya beroperasi selama 6 jam perhari yaitu mulai dari jam 18.00 wib sampai jam 00.00 wib. Sedangkan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) terdiri dari 120 unit solar panel dengan kapasitas terpasang 25kWp yang diberikan pemerintah provinsi Banten hanya beroperasi selama 6 jam perhari yang akan mengalirkan energi listriknya saat malam hari saja yaitu mulai dari jam 00.00 wib sampai 06.00 wib.

Mengingat pulau Tunda merupakan daerah wisata, maka infrastruktur kelistrikannya perlu diperbaiki karena sistem kerja pembangkit yang sudah terpasang belum mencukupi kebutuhan beban listrik di Pulau Tunda. Sesuai program pemerintah dalam upaya penghematan energi, maka PLTD yang menghasilkan emisi gas buang dan memerlukan bahan bakar minyak (BBM) dalam membangkitkan energi listrik agar dikurangi jam pengoperasiannya dan menambah pembangkit energi listrik yang memanfaatkan sumber-sumber energi terbarukan di Pulau Tunda[1]. Potensi penambahan pembangkit listrik tenaga bayu/angin (PLTB) sangat menjanjikan dilihat dari letak geografis pulau yang berada di tengah laut Jawa. Pulau Tunda memiliki potensi angin dengan intensitas kecepatan angin rata-rata 6m/s (BMKG, 2016).

Dari dasar pemikiran tersebut, maka penulis pada penelitian ini mengambil judul "Optimasi Kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida Menggunakan HOMER di Pulau Tunda". Diharapkan dari optimasi kapasitas pembangkit listrik tenaga hibrida ini mampu merancang sistem dan kapasitas optimal serta mensimulasikan model sistem PLTH menggunakan *software* HOMER yang bisa memenuhi konsumsi energi listrik dengan mengutamakan pemanfaatan sumber energi terbarukan dan mengetahui besar biaya pembangkitan energi listrik dan penalti emisi gas buang dari konfigurasi PLTH yang dirancang di Pulau Tunda.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Metode Penelitian

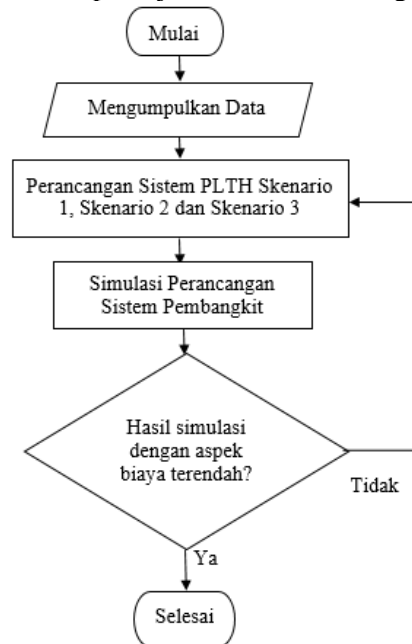
Proses penelitian terbagi menjadi beberapa tahap yang dilakukan berdasarkan urutan dalam melakukan penelitian:

- a) Identifikasi masalah yaitu dengan merumuskan latar belakang hingga tujuan dalam penelitian ini.
- b) Studi literatur, yaitu mengumpulkan data-data dari buku referensi dan jurnal-jurnal sesuai dengan topik penelitian yang dilakukan yaitu tentang pembangkit listrik tenaga hibrida.
- c) Observasi, yaitu mengumpulkan data dengan mengadakan pengamatan secara langsung pada Pulau Tunda mengenai konsumsi energi listrik, data sumber daya alam untuk

- pembangkit listrik yang menggunakan energi baru terbarukan dan Stasiun Meteorologi Kelas I mengenai validasi data yang diperoleh dari sumber daya alam Pulau Tunda.
- d) Perancangan dan pengujian, yaitu dengan merancang model sistem PLTH (surya-angin-diesel) serta menguji dan mensimulasikan menggunakan perangkat lunak HOMER, untuk mengetahui optimal kapasitas sistem PLTH terhadap hasil yang diinginkan dan teori yang ada.

2.2 Diagram Alir Penelitian

Secara sederhana proses penelitian optimalisasi kapasitas pembangkit listrik tenaga hibrida pada Pulau Tunda menggunakan HOMER dapat dijelaskan melalui diagram alir pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

2.3 Perancangan Penelitian

Perancangan sistem PLTH yang dibuat pada penelitian digunakan untuk optimasi kapasitas pembangkit listrik tenaga hibrida di Pulau Tunda. Penelitian ini akan memodelkan konfigurasi dari setiap komponen PLTH baik itu dari pembangkit listrik tenaga surya, pembangkit listrik tenaga bayu dan pembangkit listrik tenaga diesel. Dari konfigurasi PLTS, PLTB dan PLTD akan diperoleh sistem hibrida yang optimal untuk konsumsi energi listrik di Pulau Tunda.

Pada subbab ini menjelaskan perhitungan untuk merancang sistem PLTH yang dipakai untuk mengoptimalkan kapasitas PLTS dan PLTB pada skenario 2 dan 3. Berikut perhitungannya:

2.3.1 Perancangan Dan Pengoptimalan Kapasitas PLTS

- a. Menghitung kapasitas pembangkitan dan jumlah panel surya

Daya yang dibangkitkan PLTS (W_p) disesuaikan dengan kebutuhan beban yang akan disuplai serta dipengaruhi oleh faktor pembangkitan panel surya (PGF).

Faktor pembangkitan panel surya (PGF) dari hasil perhitungan dengan nilai referensi CE (*Collection Efficiency*) panel surya pada perangkat lunak HOMER sebesar 80% dan nilai rata-rata intensitas matahari di Pulau Tunda tahun 2016 adalah sebesar 5,00kWh/hari. Apabila nilai CE dan rata-rata intensitas matahari di Pulau Tunda disubstitusikan diperoleh nilai PGF sebesar:

$$PGF = 0,80 \times 5\text{Wh/hari} = 4\text{kWh/hari}$$

Berdasarkan nilai PGF sebesar 4kWh/hari dan pemakaian energi listrik (E_L) selama 24 jam sebesar 467,48kWh/hari maka kapasitas pembangkitan panel surya (W_p) sebesar:

$$P_{24}(W_p) = 467,48 \div 4 = 116,87\text{kWp}$$

Pada skenario pertama panel surya sudah terpasang sebesar 25kWp, maka kapasitas yang akan dioptimalkan diubah menjadi 116,87kWp dengan menambahkan kapasitas pembangkit sebesar 91,87kWp.

Jumlah panel surya yang diperlukan untuk dapat membangkitkan 91,87kWp adalah sebanyak:

$$\text{Jumlah panel surya} = 91,87\text{kW} \div 200\text{W} = 459,35 \sim 460 \text{ panel surya}$$

Panel surya pada skenario pertama sebanyak 120 buah panel, agar optimal ditambahkan lagi sebanyak 460 buah panel surya. Jadi dibutuhkan 580 panel surya dengan kapasitas 200Wp.

b. Menghitung kapasitas dan jumlah baterai

Kapasitas baterai dihitung berdasarkan acuan total beban yang akan disuplai. Diketahui pemakaian energi listrik (E_L) 24 jam di Pulau Tunda sebesar 467,48kWh/hari. Saat siang hari, sebagian beban tidak perlu lama disimpan dalam baterai karena besarnya energi yang dihasilkan PLTS pada siang hari akan mencapai nilai maksimum sehingga energi dari panel surya dapat langsung disalurkan ke beban, proses penyaluran energi ini dapat memperpanjang masa hidup baterai, berdasarkan pertimbangan tersebut maka kapasitas baterai akan dihitung untuk kebutuhan energi pada malam hari saja yaitu sebesar 247,52kWh/hari.

Pada skenario pertama baterai yang dipakai adalah baterai NS OPzV 2-1000 yang termasuk jenis baterai *lead acid deep-cycle*, baterai jenis ini mempunyai kemampuan *Depth Of Discharge* sebesar 80%. Parameter lain yang mempengaruhi kapasitas baterai adalah TCF. TCF merupakan faktor koreksi temperatur yang mempengaruhi besarnya energi yang dihasilkan karena setiap kenaikan temperatur 1°C (dari temperatur standarnya) pada panel surya, maka hal tersebut akan mengakibatkan daya yang dihasilkan oleh panel akan berkurang sekitar 0,5% sehingga kapasitas baterai yang dibutuhkan akan meningkat. Temperatur udara maksimum untuk wilayah Pulau Tunda adalah sebesar 30°C, dari data temperatur ini ada perbedaan suhu sebesar 5°C dari suhu standar 25°C dan akan mengurangi daya keluaran maksimum panel surya (P_{MPP}). Besarnya daya yang berkurang pada selisih suhu 5°C dari temperatur standarnya dapat sebagai berikut:

$$P_{\text{saat naik } t \text{ } 5^\circ\text{C}} = [(0,5\% \text{ } ^\circ\text{C}) \times 200\text{W} \times 5^\circ\text{C}] = 5\text{W}$$

Daya keluaran maksimum panel surya (P_{MPP}) pada saat temperaturnya 30°C dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} P_{MPP \text{ saat selisih } t \text{ } 5^\circ\text{C}} &= 200\text{W} - 5\text{W} \\ &= 195\text{W} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan daya keluaran maksimum panel surya (P_{MPP}) pada saat terjadi selisih suhu 5°C, maka nilai TCF dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{TCF} &= 195\text{W} \div 200\text{W} \\ &= 0,975\text{W} \end{aligned}$$

Parameter lain yang mempengaruhi perhitungan kapasitas baterai yang dibutuhkan adalah penentuan AD (*Autonomy Days*) yaitu keadaan baterai dapat menyuplai beban secara menyeluruh ketika tidak ada energi yang masuk dari panel surya. Penentuan AD pada penelitian ini adalah sebesar 3 hari. AD ditentukan berdasarkan tingkat curah hujan di Pulau Tunda. Rata-rata tingkat curah hujan pada musim hujan mencapai 15 hari/bulan sehingga dalam 1 minggu diasumsikan dapat terjadi hujan 3 sampai 4 hari. Penentuan nilai AD bertujuan agar pada saat insolasi harian matahari berada pada nilai yang paling rendah, maka baterai akan tetap menjaga kestabilan daya yang dibangkitkan.

Mencari nilai kapasitas baterai, saat nilai E_L malam hari adalah sebesar:

$$I = \frac{247,52\text{kWh/hari}}{0,8 \times 0,975 \times 400} \times 3 = 2380\text{Ah}$$

Pada skenario pertama baterai yang sudah terpasang berkapasitas 1000Ah dengan tegangan nominal baterai 2V. Adapun rangkaian baterai yang dipasang secara seri dan parallel, agar dapat

memenuhi kebutuhan 2380Ah/ hari dan sesuai tegangan *rating* pada system 400V maka jumlah baterai yang dipasang seri dan paralel sebanyak:

$$\text{Jumlah baterai dipasang seri} = 400 \div 2 = 200 \text{ unit}$$

$$\text{Jumlah baterai dipasang paralel} = 2380\text{Ah} \div 1000\text{Ah} = 2,38 \sim 3 \text{ rangkaian}$$

Baterai yang sudah terpasang ada 120 unit dalam 5 rangkaian yang masing-masing rangkaiannya terdiri dari 24 buah baterai. Untuk penambahan baterai agar sesuai *rating* tegangan maka perlu ditambah 80 buah baterai lalu dipasang di 3 rangkaian yang masing-masing rangkaian memiliki 26 buah baterai. Jadi untuk pengoptimalan kapasitas baterai ini membutuhkan 200 buah baterai berkapasitas 1000Ah dengan tegangan nominal 2V yang dipasang pada 8 rangkaian dengan masing-masing rangkaian memiliki 25 buah baterai.

c. Menghitung kapasitas *inverter*

Perhitungan kapasitas *inverter* berdasarkan beban puncak yang harus disuplai serta dihitung dengan menambahkan faktor *future margin*, *error margin* dan *capacity factor*. *Future margin* merupakan persentasi beban tambahan, margin ini ditambahkan sebagai antisipasi peningkatan beban puncak sedangkan *error margin* adalah faktor *error* perhitungan yang ditambahkan dan *capacity factor* adalah nilai efisiensi kerja *inverter*. Diasumsikan *future margin* dan *error margin* yang digunakan pada penelitian ini adalah sebesar 10% sedangkan *capacity factor* sebesar 90%. Pada beban harian yang dirancang di Pulau Tunda, didapatkan beban puncak bernilai 29,93kW, maka untuk dapat memenuhi kebutuhan beban puncak, kapasitas minimum *inverter* yang digunakan dapat dihitung sebagai berikut:

$$P = \frac{29,93 \times 1,1 \times 1,1}{0,9} = 40 \text{ kW}$$

Pada skenario pertama *inverter* yang dipasang berkapasitas 25kW, sehingga dibutuhkan 15kW untuk menutupi kekurangan yang ada agar mencapai kapasitas *inverter* yang optimum yaitu 40kW.

2.3.2 Perancangan Dan Pengoptimalan Kapasitas PLTB

Penambahan unit PLTB perlu dilakukan perhitungan kapasitas turbin angin, turbin angin yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) Fuhrlander (FL)* 30kW karena tubin ini dinilai merupakan turbin yang cocok dikembangkan di Pulau Tunda selain daya pembangkit yang besar turbin ini juga dapat menghemat tempat jika dibandingkan dengan turbin angin yang berkapasitas kecil namun akan memakai tempat pemasangan yang cukup luas dalam mencapai kapasitas optimal dalam menyumbang energi pembangkitan daya listrik pada PLTH. Spesifikasi teknis turbin angin fuhrlander sebagai berikut: Daya nominal= 30 kW, Kecepatan Awal (*Vcut-in*)= 2,5 m/s, Kecepatan Nominal (*Vnom*)= 12 m/s, Kecepatan Akhir (*Vcut-off*)= 25 m/s, Tinggi menara= 24 m, Luas Area= 133 m².

Perhitungan potensi pemasangan turbin angin dilakukan dengan menggunakan distribusi kecepatan angin tahunan yang dapat didekati dengan suatu pola distribusi, dalam penelitian ini memakai distribusi weibull. Melihat penelitian yang dilakukan rosdiansyah yang dilakukan di Pulau Panjang yang berdekatan dengan Pulau Tunda maka diasumsikan bahwa distribusi weibull pada Pulau Tunda memiliki nilai *c*=6,1m/detik, *k*= 1,7 diperoleh daya keluaran turbin angin untuk ketinggian 24 sebesar:

$$P_{TB} = 30000 \left\{ \frac{\exp \left[-\left(\frac{2,5}{6,1} \right)^{1,77} \right] - \exp \left[-\left(\frac{12}{6,1} \right)^{1,77} \right]}{\left(\frac{12}{6,1} \right)^{1,77} - \left(\frac{2,5}{6,1} \right)^{1,77}} - \exp \left[-\left(\frac{25}{6,1} \right)^{1,77} \right] \right\}$$

$$= 7508 \text{ watt}$$

Jumlah turbin angin yang diperlukan dapat dihitung sebagai berikut:

$$N_{TB} = \frac{467480}{(7508 \times 24)} = 2,59 \sim 3 \text{ buah}$$

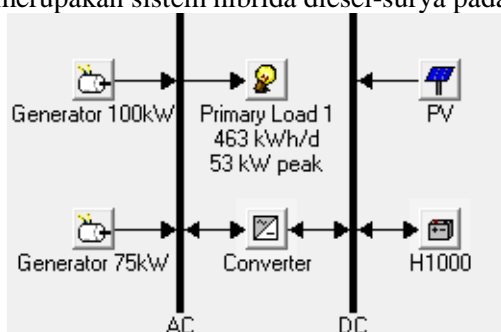
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Simulasi

Pada hasil simulasi yang dibuat terdapat tiga skenario, dimana pada skenario pertama ini pembangkit yang dirancang belum dioptimalkan kapasitas dayanya terdiri dari PLTS dan PLTD. Pada skenario kedua, pembangkit yang dirancang sudah dioptimalkan kapasitas dayanya terdiri dari PLTS dan PLTD dengan penambahan PLTB dengan sumber daya alam rata-rata. Skenario ketiga dioptimalkan kapasitas daya dari PLTS dan PLTD dengan penambahan PLTB dengan sumber daya alam diatas rata-rata.

3.1.1 Skenario Pertama

Pada Skenario pertama, pembangkit yang dirancang adalah pembangkit listrik tenaga diesel-surya ini sebagai pembandingan untuk skenario selanjutnya, dimana pada skenario ini adalah kondisi aktual pada Pulau Tunda yang sudah terpasang pembangkit listrik yang terdiri dari 2 unit mesin generator diesel dengan kapasitas 100KW dan 75KW, panel surya berkapasitas 25KW, *bi-directional inverter* 25KW, baterai dengan kapasitas 1000Ah untuk memenuhi beban rata perhari sebesar 463kWh. Gambar 3, berikut merupakan sistem hibrida diesel-surya pada *software* HOMER.



Gambar 3. Sistem Hibrida Diesel-Surya

Pemilihan komponen pembangkit yang dipakai juga memerlukan biaya untuk pengadaannya sampai biaya operasinya. Berikut merupakan harga masukan dari skenario pertama yang ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Harga Komponen Pembangkit Listrik Hibrida Diesel-Surya

| Komponen | Kapasitas | Harga Perkomponen (\$) | Jumlah Komponen | Total Biaya (\$) | Umur Komponen |
|-------------|-----------|------------------------|-----------------|------------------|---------------|
| PV | 25KW | 395 | 120 panel | 47400 | 20 Tahun |
| Generator 1 | 100KW | 7800 | 1 mesin | 7800 | 15000 Jam |
| Generator 2 | 75KW | 7200 | 1 mesin | 7200 | 15000 Jam |
| Baterai | 1000Ah | 577 | 120 baterai | 69240 | 4 Tahun |
| Konverter | 25KW | 103 @5 KW | 5 konverter | 515 | 15 Tahun |

Simulasi HOMER ini, menghasilkan keluaran berbagai macam nilai NPC yang paling tinggi hingga yang paling rendah. Namun untuk keluaran optimal dari aplikasi HOMER adalah hasil keluaran NPC yang paling kecil. Nilai bersih sekarang (NPC) adalah biaya siklus hidup merupakan biaya yang dikeluarkan selama proyek dilaksanakan yaitu 15 tahun. HOMER akan mengurutkan data hasil keluaran simulasi dan optimasi berdasarkan nilai NPC terendah, seperti terlihat pada Gambar 4.

| Sensitivity Results | | Optimization Results | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------|----------------------|------------|-------|------------|-----------------|------------------------|--------------|--------------|------------|------------|-------------|-------------|----------------|---|
| Double click on a system below for simulation | | | | | | | | | | | | | | | <input checked="" type="radio"/> Categorize <input type="radio"/> Overall |
| | PV (kW) | Label (kW) | Label (kW) | H1000 | Conv. (kW) | Initial Capital | Operating Cost (\$/yr) | Total NPC | COE (\$/kWh) | Ren. Frac. | Diesel (L) | Label (hrs) | Label (hrs) | Batt. Lf. (yr) | |
| | 25 | 75 | 120 | 25 | \$ 132,818 | 74,744 | \$ 823,143 | 0.527 | 0.19 | 62,289 | | 3,772 | | 6.7 | |
| | 25 | 100 | 75 | 120 | 25 | \$ 141,618 | 74,433 | \$ 829,071 | 0.531 | 0.19 | 62,289 | 0 | 3,772 | 6.7 | |
| | 25 | 100 | | 120 | 25 | \$ 133,418 | 82,730 | \$ 897,499 | 0.575 | 0.19 | 69,827 | 3,688 | | 6.6 | |
| | | 75 | 120 | 25 | \$ 77,955 | 91,417 | \$ 922,266 | 0.591 | 0.00 | 75,485 | | 4,167 | | 5.4 | |
| | | 100 | 75 | 120 | 25 | \$ 86,755 | 91,106 | \$ 928,194 | 0.595 | 0.00 | 75,485 | 0 | 4,167 | 5.4 | |
| | | 100 | | 120 | 25 | \$ 78,555 | 100,333 | \$ 1,005,211 | 0.644 | 0.00 | 83,849 | 4,166 | | 5.4 | |
| | 25 | 75 | | 25 | \$ 63,578 | 116,361 | \$ 1,138,274 | 0.729 | 0.15 | 100,510 | | 8,285 | | | |
| | 25 | 100 | 75 | 25 | \$ 72,378 | 116,051 | \$ 1,144,202 | 0.733 | 0.15 | 100,510 | 0 | 8,285 | | | |
| | | 75 | | | \$ 8,200 | 124,201 | \$ 1,155,297 | 0.740 | 0.00 | 107,018 | | 8,759 | | | |
| | | 100 | 75 | | \$ 17,000 | 123,890 | \$ 1,161,225 | 0.744 | 0.00 | 107,018 | 0 | 8,759 | | | |
| | 25 | 100 | | 25 | \$ 64,178 | 146,423 | \$ 1,416,518 | 0.908 | 0.13 | 129,550 | | 8,285 | | | |
| | | 100 | | | \$ 8,800 | 155,328 | \$ 1,443,380 | 0.925 | 0.00 | 137,057 | | 8,759 | | | |

Gambar 4. Hasil Keluaran Simulasi HOMER Skenario Pertama

Total NPC dapat dihitung namun sebelumnya mencari keluaran dari faktor penutupan modal terlebih dahulu, untuk suku bunga yang dipakai adalah 6,78% per tahun 2016 yang didapatkan dari Bank Indonesia.

$$CRF(i, R_{proj}) = \frac{0,0678(1+0,0678)^{15}}{(1+0,0678)^{15}-1} = 0.108$$

Nilai dolar yang dipakai adalah nilai rata-rata pembelian dolar pada tahun 2016 dengan nilai dolar Amerika, \$1 adalah Rp 13.400,00.

$$C_{NPC} = \frac{88899}{0.108} = \$823143 \text{ atau Rp } 11.030.116.200,00$$

Selain mengeluarkan NPC, aplikasi HOMER juga mengeluarkan hasil COE. COE (*Cost Of Energy*) atau biaya energi merupakan perbandingan antara biaya total per tahun dari sistem dengan energi yang dihasilkannya selama periode yang sama. Berdasarkan nilai ekonomi, biaya pembangkit dari energi terbarukan lebih hemat dari biaya pembangkit dari energi konvensional. COE bisa dihitung sebesar:

$$COE = \frac{88899}{168995} = \$0.527 \text{ atau Rp } 7.061,80/\text{kWh}$$

Emisi Gas Buang Pada pembangkit listrik hibrida ini masih menghasilkan emisi gas buang yang cukup besar karena penggunaan PLTD yang membangkitkan energi listrik sebesar 81% dengan operasi pembangkitannya mencapai 24 jam untuk memenuhi kebutuhan listrik di Pulau Tunda. Pada Tabel 2, merupakan emisi gas buang yang dihasilkan oleh PLTD selama setahun.

Tabel 2. Hasil Emisi Gas Buang Pembangkit Hibrida Diesel-Surya

| Nama Polusi | Jumlah (Kg/Tahun) |
|------------------------------------|-------------------|
| Karbon Dioksida (CO ₂) | 164,027 |
| Karbon Monoksida (CO) | 405 |
| Unburned hydrocarbons (UHC) | 44,8 |
| Particulate matter (PM) | 30,5 |
| Oksida Belerang (SO _x) | 329 |
| Nitrogen Oksida (NO _x) | 3.613 |

Berdasarkan hasil penelitian Devianti (2015), untuk negara Indonesia belum ada peraturan yang mengatur penalti/biaya yang harus dikeluarkan untuk pembuangan gas buang yang dihasilkan mesin diesel namun untuk peraturan pembatasan keluaran emisi gas buang sudah ada. Maka pada penelitian ini memakai nilai penalti yang harus dibayar oleh pembangkit listrik hibrida diambil dari riset yang dilakukan di Kanada dengan mengadopsi nilai dari mata uang dolar Amerika, berikut beberapa biaya polutannya:

1. Karbon Monoksida (CO) = \$205/ton

2. Partikulat (PM) = \$3,17/ton
3. Karbon Dioksida (CO₂) = \$205/ton
4. Belerang Dioksida (SO₂) = \$1000/ton
5. Nitrogen Oksida (NO_x) = \$934/ton
6. Hidrokarbon (HC) = \$44/ton

Nilai kerugian diatas dapat untuk mencari harga penalti dari emisi gas buang yang dihasilkan pembangkit tenaga listrik hibrida sebesar:.

$$C_{emisi} = \frac{[(205 \times 164027) + (205 \times 405) + (44 \times 44,8) + (3,17 \times 30,5) + (1000 \times 329) + (934 \times 3613)]}{1000}$$

$$= \$37414 \text{ atau Rp } 501.347.600,00/\text{tahun}$$

Biaya emisi, nilai pembagian 1000 dipakai untuk menyamakan biaya penalti per-ton dengan nilai emisi yang diperoleh dari aplikasi HOMER per-kg.

3.1.2 Skenario Kedua

Pada skenario ini PLTS yang sudah terpasang akan dioptimalkan kapasitas daya pembangkitan energi listriknya supaya waktu pengoperasian dari PLTD dapat dikurangi serta ditambahkan PLTB yang memungkinkan untuk membantu kinerja PLTS dalam memenuhi kebutuhan beban listrik Pulau Tunda. Perhitungan pengoptimalan kapasitas PLTS dan PLTB telah dijelaskan perhitungan sebelumnya pada subbab 3.4.1.

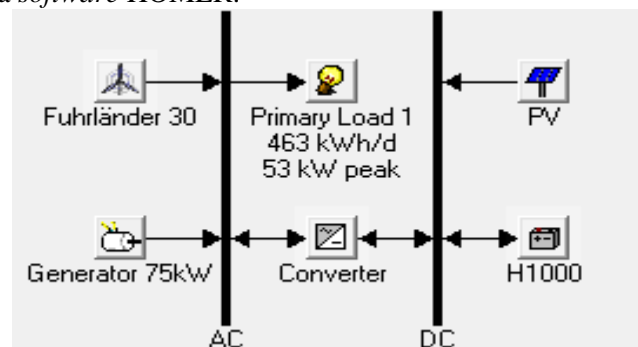
Pada skenario ini, jumlah turbin angin *Fuhrlander* 30kW yang diperlukan adalah 3 unit, 1 turbin membutuhkan lahan untuk berdiri seluas 133m². Sehingga luas lahan yang dibutuhkan untuk memasang 3 buah turbin angin adalah 399m², namun pemasangan turbin perlu diperhatikan 'effect wind park' yang menyebabkan turbin angin tidak dapat berputar maksimal akibat terhalangnya energi angin oleh turbin angin yang lainnya. Karena Pulau Tunda berbentuk memanjang sebagaimana telah diilustrasikan sebelumnya (Gambar 1) maka pemasangan turbin angin dilakukan mengikuti garis pantai dan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \text{Jarak pemasangan} &= 5 \times \text{diameter baling-baling turbin} \\ &= 5 \times 13 \\ &= 65\text{m}^2 \end{aligned}$$

Maka luas lahan yang dibutuhkan untuk dapat memasang 3 buah turbin:

$$\begin{aligned} L &= 399 + (65 \times 3) \\ &= 594\text{m}^2 \end{aligned}$$

PLTD yang akan dioperasikan adalah 1 buah mesin diesel generator dengan kapasitas 75kW. Karena, dalam pembangkitan energi listrik mesin diesel yang mempunyai kapasitas kecil lebih sedikit menggunakan bahan bakar daripada mesin diesel yang berkapasitas besar seperti 100kW pada skenario pertama yang sudah terpasang. Jam operasi PLTD ini dikurangi sebesar 12 jam, dari pukul 06.00-18.00 sehingga PLTD pada skenario ini hanya berfungsi saat melayani beban puncak yang tidak dapat terpenuhi oleh PLTB dan PLTS. Sedangkan untuk beban yang akan disuplai energi listrik masih tetap sama dengan kondisi awal sebesar 463,48 kW/hari. Gambar 5, merupakan sistem hibrida diesel-surya-angin pada *software* HOMER.



Gambar 5. Sistem Hibrida Diesel-Surya-Angin

Pada skenario kedua ini ditambahkan parameter sensitivitas, parameter sensitivitas ini dilakukan untuk memperoleh hasil kinerja pembangkit listrik yang berasal dari energi terbarukan saat

membangkitkan energi listrik namun energi yang diperlukan untuk membangkitkan listrik tersebut adalah energi rata-rata pada Pulau Tunda. Parameter sensitivitas pada PLTS yang dipakai adalah radiasi matahari sebesar 5,08kWh/m²/hari dan parameter sensitivitas pada PLTB yang dipakai adalah kecepatan angin sebesar 5,86m/detik.

Tabel 3. Harga Komponen Pembangkit Listrik Hibrida Diesel-Surya-Angin

| Komponen | Kapasitas | Harga Perkomponen (\$) | Jumlah Komponen | Total Biaya (\$) | Umur Komponen |
|--------------|-----------|------------------------|-----------------|------------------|---------------|
| PV | 116KW | 395 | 580 panel | 229100 | 20 Tahun |
| Turbin Angin | 30KW | 75000 | 3 turbin | 225000 | 15 Tahun |
| Generator 2 | 75KW | 7200 | 1 mesin | 7200 | 15000 Jam |
| Baterai | 1000Ah | 577 | 200 baterai | 115400 | 4 Tahun |
| Konverter | 40KW | 103 @5 KW | 8 konverter | 824 | 15 Tahun |

Sensitivity Results Optimization Results

Sensitivity variables

Global Solar (kWh/m²/d) 5.08 Wind Speed (m/s) 5.86

Double click on a system below for simulation

| | PV (kW) | FL30 | Label (kW) | H1000 | Conv. (kW) | Initial Capital | Operating Cost (\$/yr) | Total NPC | COE (\$/kWh) | Ren. Frac. | Diesel (L) | Label (hrs) | Batt. Lf. (yr) |
|--|---------|------|------------|-------|------------|-----------------|------------------------|------------|--------------|------------|------------|-------------|----------------|
| | 116... | 3 | 75 | 200 | 40 | \$ 631,180 | 568 | \$ 636,430 | 0.408 | 0.99 | 2,384 | 145 | 14.7 |

Gambar 6. Hasil Keluaran Simulasi HOMER Skenario Kedua

Nilai NPC dapat berkurang dengan selisih \$186,713 dari skenario pertama. Perolehan nilai NPC dapat dihitung sebagai berikut:

$$CRF(i, R_{proj}) = \frac{0,0678(1 + 0,0678)^{15}}{(1 + 0,0678)^{15} - 1}$$

$$= 0.108$$

$$C_{NPC} = \frac{68734}{0.108}$$

$$= \$636430 \text{ atau Rp } 8.528.162.000,00$$

Nilai COE juga bisa berkurang dengan selisih \$0,119 pada skenario pertama. Perolehan nilai COE dapat dihitung sebagai berikut:

$$COE = \frac{68734}{168987}$$

$$= \$0.408 \text{ atau Rp } 5.467,20/\text{kWh}$$

Emisi gas buang pada skenario pembanding ini sudah berkurang. Hal ini disebabkan oleh penggunaan PLTD sebagai energi cadangan, sedangkan pada skenario awal PLTD bekerja sebagai penyuplai utama energi listrik untuk memenuhi kebutuhan beban. Pada Tabel 4, merupakan emisi gas buang yang dihasilkan oleh PLTD selama setahun.

Tabel 4. Hasil Emisi Gas Buang Pembangkit Hibrida Diesel-Surya-Angin

| Nama Polusi | Jumlah (Kg/Tahun) |
|------------------------------------|-------------------|
| Karbon Dioksida (CO ₂) | 6277 |
| Karbon Monoksida (CO) | 15,5 |
| Unburned Hydrocarbons (UHC) | 1,72 |
| Particulate Matter (PM) | 1,17 |
| Oksida Belerang (SO ₂) | 12,6 |
| Nitrogen Oksida (NO _x) | 138 |

Untuk biaya penalti yang dikeluarkan untuk emisi gas buang ini dapat dihitung sebagai berikut:

$$C_{emisi} = \frac{[(205 \times 62770 + (205 \times 15,5) + (44 \times 1,72) + (3,17 \times 1,17) + (1000 \times 12,6) + (934 \times 138)]}{1000}$$

= \$1431 atau Rp 19.175.400,00/tahun

3.1.3 Skenario Ketiga

Pada skenario kedua ini ditambahkan parameter sensitivitas, parameter sensitivitas ini dilakukan untuk memperoleh hasil kinerja pembangkit listrik yang berasal dari energi terbarukan saat membangkitkan energi listrik namun energi yang diperlukan untuk membangkitkan listrik tersebut adalah energi diatas rata-rata pada Pulau Tunda. Parameter sensitivitas pada PLTS yang dipakai adalah radiasi matahari sebesar 5,8kWh/m²/hari dan parameter sensitivitas pada PLTB yang dipakai adalah kecepatan angin sebesar 6,9m/detik. Pada hasil skenario ini, hasil kapasitas optimal untuk kapasitas PLTB adalah 60kW dengan memakai 2 unit turbin angin. Berbeda dengan skenario 2 yang membutuhkan 3 unit turbin akibat sumber daya alam yang kurang maksimal.

Pulau Tunda memiliki bentuk panjang sehingga pemasangan turbin angin dilakukan sejajar dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \text{Jarak pemasangan} &= 5 \times \text{diameter baling-baling turbin} \\ &= 5 \times 13 \\ &= 65\text{m}^2 \end{aligned}$$

Maka luas lahan yang dibutuhkan untuk dapat memasang 3 buah turbin:

$$\begin{aligned} L &= 266 + (65 \times 2) \\ &= 396 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Tabel 5. Harga Komponen Pembangkit Listrik Hibrida Diesel-Surya.

| Komponen | Kapasitas | Harga Perkomponen (\$) | Jumlah Komponen | Total Biaya (\$) | Umur Komponen |
|--------------|-----------|------------------------|-----------------|------------------|---------------|
| PV | 116KW | 395 | 580 panel | 229100 | 20 Tahun |
| Turbin Angin | 30KW | 75000 | 2 turbin | 150000 | 15 Tahun |
| Generator 2 | 75KW | 7200 | 1 mesin | 7200 | 15000 Jam |
| Baterai | 1000Ah | 577 | 200 baterai | 115400 | 4 Tahun |
| Konverter | 40KW | 103 @5 KW | 8 konverter | 824 | 15 Tahun |

Sensitivity Results Optimization Results

Sensitivity variables

Global Solar (kWh/m²/d) 5.8 Wind Speed (m/s) 6.9

Double click on a system below for simulation

| | PV (kW) | FL30 | Label (kW) | H1000 | Conv. (kW) | Initial Capital | Operating Cost (\$/yr) | Total NPC | COE (\$/kWh) | Ren. Frac. | Diesel (L) | Label (hrs) | Batt. Lf. (yr) |
|--|---------|------|------------|-------|------------|-----------------|------------------------|------------|--------------|------------|------------|-------------|----------------|
| | 116... | 2 | 75 | 200 | 40 | \$ 551,180 | -701 | \$ 544,703 | 0.349 | 0.99 | 1,695 | 109 | 15.9 |
| | 116... | 3 | 75 | 200 | 40 | \$ 631,180 | -2,133 | \$ 611,476 | 0.392 | 1.00 | 964 | 67 | 19.0 |

Gambar 7. Hasil Keluaran Simulasi HOMER Skenario Ketiga

Nilai NPC dapat berkurang dengan selisih \$278,440 dari skenario pertama. Perolehan nilai NPC dapat dihitung sebagai berikut:

$$CRF(i, R_{proj}) = \frac{0,0678(1+0,0678)^{15}}{(1+0,0678)^{15}-1} = 0.108$$

$$C_{NPC} = \frac{58827}{0.108} = \$544703 \text{ atau Rp } 7.299.020.200,00$$

Nilai COE juga bisa berkurang dengan selisih \$0,178 pada skenario pertama. Perolehan nilai COE dapat dihitung sebagai berikut:

$$COE = \frac{58827}{168995} = \$0.349 \text{ atau Rp } 4.676,60/\text{kWh}$$

Emisi gas buang pada skenario ketiga ini dapat berkurang dibanding dengan kedua skenario sebelumnya. Hal ini disebabkan oleh penggunaan PLTD sebagai energi cadangan, sedangkan pada skenario awal PLTD bekerja sebagai penyuplai utama energi listrik untuk memenuhi kebutuhan beban. Pada Tabel 6, merupakan emisi gas buang yang dihasilkan oleh PLTD selama setahun.

Tabel 6. Hasil Emisi Gas Buang Pembangkit Hibrida Diesel-Surya-Angin

| Nama Polusi | Jumlah (Kg/Tahun) |
|------------------------------------|-------------------|
| Karbon Dioksida (CO ₂) | 4464 |
| Karbon Monoksida (CO) | 11 |
| Unburned Hydrocarbons (UHC) | 1,22 |
| Particulate Matter (PM) | 0,831 |
| Oksida Belerang (SO ₂) | 8,97 |
| Nitrogen Oksida (NO _x) | 98,3 |

Biaya penalti yang dikeluarkan untuk emisi gas buang ini dapat dihitung sebagai berikut:

$$C_{emisi} = \frac{[(205 \times 4464) + (205 \times 11) + (44 \times 1,22) + (3,17 \times 0,831) + (1000 \times 8,97) + (934 \times 98,3)]}{1000}$$

$$= \$1018 \text{ atau Rp } 13.641.200,00/\text{tahun}$$

Pada skenario ketiga yaitu pembangkit listrik hibrida diesel-surya-angin adalah pembangkit hibrida yang paling optimal dalam memenuhi kebutuhan listrik Pulau Tunda. Dilihat dari biaya energi yang dikeluarkan relatif kecil dari pada skenario pertama dan kedua, namun pada skenario ketiga ini memiliki biaya investasi awal yang lebih sedikit dibanding skenario pertama dengan selisih sebesar \$278,440. Untuk skenario ketiga ini memakai parameter sensitivitas radiasi matahari dan kecepatan angin tertinggi sehingga bisa menghemat pemakaian dari jumlah PLTB yang dimanfaatkan, yaitu 2 buah.

Biaya energi yang kecil diperoleh dari biaya yang dikeluarkan selama proyek berlangsung kecil juga dikarenakan biaya pengoperasian pada skenario ketiga sudah mengurangi jam kerja PLTD yang akan memakan biaya dalam pengoperasian untuk konsumsi bahan bakar dan pergantian mesin yang dilakukan selama 15000 jam kerja. Untuk biaya investasi yang besar disebabkan oleh pengadaan turbin angin namun untuk pengoperasiannya cukup murah karena tidak menggunakan bahan bakar.

Pada skenario pembangkit ketiga ini memiliki kelebihan energi listrik yang lebih besar dibanding skenario pertama dengan selisih sebesar 274,051 kWh/tahun dan lebih sedikit dalam menghasilkan kelebihan energi dibanding skenario kedua dengan selisih besarnya mencapai 22,248 kWh/tahun. Skenario ketiga ini sangat tepat dipilih untuk membangkitkan listrik di Pulau Tunda selama, karena lebih murah dibandingkan dengan skenario pertama dan kedua.

Pengupayaan dan usaha untuk melestarikan lingkungan mengingat Pulau Tunda sudah dijadikan tempat wisata oleh pemerintah setempat, sebaiknya memakai pembangkit listrik hibrida diesel-surya-angin, karena pada pembangkit ini emisi gas buang yang dihasilkan cukup kecil dibanding skenario pertama dengan konfigurasi PLTD dan PLTS yang mengandalkan generator mesin diesel sebagai pembangkit listrik utamanya. Selain itu adanya turbin angin pada Pulau Tunda merupakan daya tarik tersendiri dalam menarik pengunjung untuk mengabadikan momen bersama turbin angin yang akan dipasang.

4. KESIMPULAN

4.1 Kesimpulan

Hasil simulasi dari optimalisasi energi pembangkit hibrida di Pulau Tunda menghasilkan beberapa kesimpulan, yaitu:

- Sistem PLTH yang optimal menggunakan software HOMER adalah skenario 3 dengan kapasitas pada masing-masing pembangkit adalah: 75kW pada PLTD, 117kWp pada PLTS dan 60kW pada PLTB.

- b) Hasil pengujian menggunakan *software* HOMER, sistem PLTH skenario 3 diperoleh nilai kontribusi PLTS sebesar 43% atau 198280kWh/tahun, PLTB sebesar 56% atau 256106kWh/tahun dan PLTD sebesar 1% atau 4165kWh/tahun.
- c) Sistem PLTH ini menghasilkan nilai NPC sebesar \$544703 dan biaya energi listrik (COE) sebesar \$0.349/kWh. Emisi gas buang berkurang sebesar 4584kg/tahun jika dibayarkan untuk penalti emisi gas buang sekitar \$1018/tahun.

4.2 Saran

Dalam penelitian ini masih banyak sekali kekurangan dan ketidaksempurnaan. Untuk itu, perlu dilakukan pengembangan agar ke depannya menjadi sempurna ataupun lebih baik lagi sehingga memiliki beberapa saran, diantaranya:

- a) Perlu dilakukan studi lebih lanjut mengenai potensi pembangkit terbarukan lainnya yang dapat dimanfaatkan di wilayah Pulau Tunda.
- b) Perlu dilakukan studi lebih lanjut mengenai penalti emisi gas buang yang berlaku di Indonesia.

REFERENSI

- [1] Herlina, R. Thayib., E. Lazuardy., P. D. Muthia. *Analisis Biaya Pembangkitan Energi Listrik Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida Untuk Daerah Terisolasi*. 2013. Jurnal Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.
- [2] Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Kelas 1 Serang. *Data Energi Terbarukan Pulau Tunda*. 2016. Kota Serang Provinsi Banten.
- [3] Herlina. *Analisis Dampak Lingkungan Dan Biaya Pembangkitan Listrik Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida Di Pulau Sebesi Lampung Selatan*. 2009. Tesis Teknik Elektro Universitas Indonesia.
- [4] Rosyid, O. A. *Pembangkit Listrik Tenaga Surya Hibrida Untuk Listrik Pedesaan Di Indonesia*. 2010. Jurnal Material dan Energi Indonesia Vol. 1 No. 1 Desember: 31-38.
- [5] Marsuadi, D. *Pembangkitan Energi Listrik*. 2005. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- [6] Mintorogo, D. *Strategi Aplikasi Sel Surya (Photovoltaic Cells) Pada Perumahan Dan Bangunan Komersial*. 2000. Jurnal Arsitektur Fakultas Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya.
- [7] Santiari, I Dewa A. S. *Studi Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Sebagai Catu Daya Tambahan Pada Industri Perhotelan Di Nusa Lamongan Bali*. 2011. Tesis Jurusan Teknik Elektro Universitas Udayana.
- [8] Wind Turbin Fuhrlander. 2016. Tersedia dari: <http://www.fuhrlander.de/en/> [URL dikunjungi pada 20 September 2016]
- [9] Hasugian, Juanda A. M. *Optimasi Pembangkit Listrik Hibrid (Diesel-Surya-Angin) Di Desa Si Onom Hudon 7 Kecamatan Parlilitan Kabupaten Humbang Hasundutan Provinsi Sumatera Utara*. 2016. Tugas Akhir Departemen Teknik Elektro Universitas Sumatera Utara.
- [10] Nurhalim. *Studi Analisis Pemanfaatan Energi Angin Sebagai Pembangkit Hibrida*. 2007. Jurnal Sains dan Teknologi 6 (2) September: 34-38.
- [11] Irawati, Rina., Zuhaidi. *Analisa Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida Untuk Pemenuhan Kebutuhan Energi Listrik Di Pulau Pramuka*. 2012. Jurnal Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan Vol. 11 No. 2 Desember: 81-92.
- [12] Rostyono, Didik. *Optimasi Pembangkit Hibrida (Fotovoltaik-Angin-Diesel) Dengan Algoritma Genetika*. 1999. Tesis Teknik Elektro Universitas Indonesia.
- [13] Astuti. *Optimasi Pembangkitan Energi Listrik Hibrida Surya-Angin-Diesel di Desa Pulo Panjang Banten Menggunakan Algoritma Genetik*. 2010. Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
- [14] Gilman, P., Lilienthal, P. *Micropower System With Homer Chapter 15*. 2006. National Renewable Energy Laboratory. Jhon Wiley & Sons Inc Publication.
- [15] National Aeronautics and Space Administration (NASA). *Surface Meteorology and Solar Energy*. 2016. Tersedia dari: <https://eosweb.larc.nasa.gov> [URL dikunjungi pada 20 Desember 2016]

- [16] Rosdiansyah. *Optimasi Energi Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida Di Pulau Panjang*. 2013. Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
- [17] Bank Indonesia. *Nilai Tukar Mata Uang Rupiah dan Suku Bunga Tahun 2016*. Tersedia dari: <http://www.bi.go.id/id> [URL dikunjungi pada 20 Desember 2016]
- [18] Muziansyah, Devianti., S. Rahayu., S. Syukur. *Model Emisi Gas Buangan Kendaraan Bermotor Akibat Aktivitas Transportasi (Studi Kasus: Terminal Pasar Bawah Ramayana Kota Bandar Lampung*. 2015. JRSDD, Edisi Maret Vol. 3 No. 1 Hal: 57-70.
- [19] Huang, R., et al. *Optimal Design Of Hybrid Energy System With PV/Wind Turbine/Storage: A Case Study*. 2011. Journal Computing Mathematical Sciences, California Institute of Technology, USA.
- [20] Google Earth. *Pulau Tunda*. 2016. Tersedia dari: <https://www.google.co.id/earth/place/Pulau+Tunda> [URL dikunjungi pada 20 September 2016]
- [21] Thaib, R dan Hamdani. *Studi Pemanfaatan Pembangkit Listrik Hibrid (Energi Angin-Surya-Diesel) di Kepulauan Simeulue Aceh*. 2014. Proceedings Seminar Nasional Teknik Mesin Universitas Trisakti.