

Studi Pemanfaatan Energi Matahari di Pulau Panjang Sebagai Pembangkit Listrik Alternatif

Romi Wiryadinata¹, Ali Imron S², Ri Munarto³

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa Cilegon, Indonesia

¹romi@wiryadinata.web.id, ²ali.imrons@yahoo.com, ³ri_munarto@yahoo.com

Abstrak – Pembangkit tenaga listrik di Pulau Panjang dipasok oleh tenaga diesel dengan 12 jam waktu operasi, sehingga dibutuhkan tambahan pasokan energi terbarukan untuk meningkatkan keandalan sistem kelistrikan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sebuah sistem surya sebagai pembangkit listrik alternatif pada pembangkit listrik tenaga hybrid PLTS-PLTD. Sistem PLTS digunakan untuk mengurangi batas waktu diesel bekerja agar diperoleh kinerja yang optimal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem surya dapat menghasilkan energi dari 153,89 kWp, 164684kWh/tahun pasokan energi, kualitas energi 94,73%, keandalan sistem 79,79%, dan kerugian sistem 33,66%. Dalam skema PLTH diperoleh kontribusi dari PLTS-PLTD sebesar 33% sampai 67%, BPP PLTH sebesar \$ 0,64/kWh dan dapat mengurangi emisi karbon sebesar 85,93%.

Kata kunci : Energi terbarukan, PLTS, PLTD, PLTH

Abstract – Panjang Island power supply has supplied by diesel power with 12 hours of operating time, so it takes an extra supply of renewable energy to improve the reliability of the electrical system. This research is aimed to design a solar system as an alternative electricity generator at a hybrid power plant of PLTS-PLTD. PLTS system is utilized to reduce the working time limit diesel to obtain optimum working. The results showed that the solar system can generates an energy of 153.89 kWp, 164684kWh/year of energy supply, 94.73% energy quality, 79.79% of the system reliability, and 33.66% of system losses. In the PLTH scheme obtained contributions from PLTS-PLTD by 33% until 67%, BPP PLTH of \$ 0.64/kWh and can reduce carbon emissions by 85.93%.

Keywords : Renewable Energy, PLTS, PLTD, PLTH

I. PENDAHULUAN

Kelistrikan di Pulau Panjang sampai saat ini disuplai oleh PLTD dengan waktu operasi 12 jam, agar keandalan kelistrikan di Pulau Panjang meningkat dan dapat teraliri listrik selama 24 jam maka dibutuhkan suplai pembangkit alternatif terbarukan. Peningkatan keandalan kelistrikan di Pulau Panjang diperlukan untuk menunjang perkembangan ekonomi, sosial dan budaya di Pulau Panjang. Potensi pengembangan PLTS di Indonesia sangat menjanjikan dilihat dari letak geografis Indonesia yang berada pada garis khatulistiwa. Pulau Panjang memiliki potensi energi listrik tenaga surya sebesar 4,61kW/m²/hari (BMKG, 2011). Besarnya potensi ini dapat dimanfaatkan untuk skema pembangkit listrik hibrida PLTS-PLTD di Pulau Panjang. Pembangkit alternatif terbarukan yang cocok dengan keadaan geografis dan potensi Pulau Panjang adalah PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya).

Skema pembangkit listrik hibrida diperlukan untuk meningkatkan keandalan sistem kelistrikan di Pulau Panjang yaitu dengan cara mengurangi waktu operasi PLTD sehingga dapat dapat mengurangi inefisiensi biaya bahan bakar serta merancang sistem PLTS untuk meningkatkan produksi listrik di Pulau Panjang.

II. LANDASAN TEORI

A. Energi Matahari

Matahari memancarkan energi dalam bentuk radiasi elektromagnetik. Radiasi matahari yang sampai ke permukaan bumi disebut *insolation (incoming solar radiation)* yang mengalami penyerapan (*absorpsi*), pemantulan, hamburan, dan pemancaran kembali atau *reradiasi*. Radiasi tersebut hanya sekitar 50% yang dapat diserap oleh bumi [1]. Matahari sebenarnya mempunyai posisi yang tetap dalam sistem tata surya, namun terlihat bergerak melintasi langit ketika diamati dari permukaan bumi. Pergerakan matahari ini terlihat nyata sebagai pengaruh dari rotasi bumi. Sebagai konsekuensi pergerakan ini, sudut sinar matahari jatuh secara langsung ke koordinat pengamat berubah secara kontinu. Posisi matahari dapat diketahui dengan pengetahuan pengamat mengenai garis lintang (*latitude*) dan garis bujur (*longitude*), disamping waktu dan tanggal pengamatan. Perbedaan garis lintang dan bujur suatu daerah akan mempengaruhi potensi energi matahari di daerah tersebut, oleh karena itu untuk mendapatkan energi matahari yang optimal ada dua hal yang harus dipertimbangkan, yaitu sudut elevasi dan sudut *azimuth* [6].

B. PLTS

1. Panel Surya

Sel surya terdiri dari sambungan bahan semi-konduktor bertipe p dan n (p - n junction semiconductor) yang jika terkena sinar matahari maka akan terjadi aliran elektron, aliran elektron inilah yang disebut sebagai aliran arus listrik. Semi-konduktor jenis n merupakan semi-konduktor yang memiliki kelebihan elektron sehingga kelebihan muatan negatif (n = negatif), sedangkan semi-konduktor jenis p memiliki kelebihan *hole* sehingga kelebihan muatan positif (p = positif) [3]. Sejumlah modul umumnya terdiri dari 36 sel surya atau 33 sel dan 72 sel. Modul-modul ini kemudian dirangkai menjadi panel surya dan jika panel surya ini dihubungkan secara baris dan kolom disebut dengan *array*. Pengoperasian maksimum panel surya sangat bergantung pada temperatur, *insolation*, kecepatan angin, keadaan atmosfer dan peletakan panel surya [10].

Kenaikan temperatur lebih tinggi dari temperatur normal pada PV sel akan melemahkan tegangan *open circuit* (V_{oc}). Setiap kenaikan temperatur sel surya 1°C dari 25°C akan berkurang sekitar 0,5% pada total tenaga yang dihasilkan. Besarnya daya yang berkurang pada saat temperatur di sekitar panel surya mengalami kenaikan $^{\circ}\text{C}$ dari temperatur standarnya dapat dihitung menggunakan (Pers. 1) berikut [12]:

Daya keluaran maksimum panel surya pada saat temperaturnya naik menjadi dari temperatur standarnya diperhitungkan dengan (Pers. 2) berikut [12]:

Pemasangan panel surya secara tetap sering dilakukan karena paling mudah dalam pelaksanaan dan biaya sedikit. Sudut kemiringan (*tilt angle*) pada suatu lokasi berdasarkan sudut *altitude* matahari pada suatu lokasi dalam suatu waktu dapat dicari dengan (Pers. 3 dan 4) berikut ini [10]:

Besarnya *fix tilt angle* umumnya terletak diantara *tilt angle* maksimum saat *winter solstice* ($= +23^{\circ}$) dan *summer solstice* ($= -23^{\circ}$). *Fix tilt angle* dapat diperkirakan berdasarkan nilai rata-rata *tilt angle* pada saat *winter solstice* dan *summer solstice*, yaitu (Pers. 5) sebagai berikut [10]:

(5)

Berdasarkan pemaparan faktor-faktor yang mempengaruhi energi yang dibangkitkan panel surya, besarnya kapasitas panel surya yang dibutuhkan dalam suatu perencanaan sistem PLTS dapat dihitung menggunakan (Pers. 6) [12]:

dan nilai diperoleh dari (Pers. 7) :

Selanjutnya berdasarkan besarnya kebutuhan daya panel yang akan dibangkitkan (P_{wp}), maka banyaknya

panel surya yang dibutuhkan dapat dihitung dengan (Pers. 8) [12]:

2. Baterai

Baterai adalah komponen PLTS yang berfungsi menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya pada siang hari, untuk kemudian dipergunakan pada malam hari dan pada saat cuaca mendung. Baterai yang dipergunakan pada PLTS mengalami proses siklus pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*), tergantung ada atau tidaknya sinar matahari. Kapasitas baterai dalam suatu perencanaan PLTS dipengaruhi pula oleh faktor DOD dan TCF. Kapasitas baterai dalam suatu perencanaan PLTS dipengaruhi pula faktor *autonomy*, yaitu keadaan baterai dapat menyuplai beban secara menyeluruh ketika tidak ada energi yang masuk dari panel surya [12]. Besarnya kapasitas total baterai (Ah) yang dibutuhkan dalam suatu sistem PLTS dapat dihitung dengan menggunakan (Pers. 9):

(9)

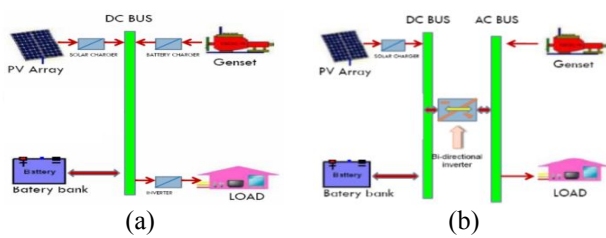
TCF (*Temperature Correction Factor*) adalah perbandingan antara daya keluaran maksimum panel surya pada saat temperatur di sekitar panel surya naik menjadi dari temperatur standarnya dengan daya keluaran maksimum panel surya. Besarnya TCF dapat dihitung menggunakan (Pers. 10):

3. Inverter

Inverter adalah peralatan elektronik yang berfungsi mengubah energi DC menjadi energi AC. Energi yang dihasilkan panel surya adalah arus DC, oleh karena itu pada sistem PLTS dibutuhkan *inverter* untuk mengubah energi dari panel dan baterai tersebut agar dapat menyuplai kebutuhan energi AC. Pemilihan *inverter* yang tepat untuk aplikasi tertentu, tergantung pada kebutuhan beban dan juga apakah *inverter* akan menjadi bagian dari sistem yang menuju jaringan listrik atau sistem yang berdiri sendiri [15]. Perhitungan kapasitas *inverter* disesuaikan dengan beban puncak yang harus disuplai serta dihitung dengan menambahkan faktor *future margin*, *error margin* dan *capacity factor* seperti pada (Pers. 11):

C. PLTH

Hybrid system adalah penggabungan dua atau lebih sumber energi. Salah satu contohnya adalah *solar electric system* dengan sumber energi lain (seperti generator diesel, pembangkit listrik tenaga angin). *Hybrid system* dipilih dalam rangka menyediakan sumber energi yang handal dan tidak bergantung dengan energi fosil [7]. *Hybrid system* terbagi lagi menjadi sistem serial dan paralel seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem PLTH, (a) Serial (b) Paralel

Prinsip kerja dari PLTH sistem serial adalah semua pembangkit daya mensuplai daya DC ke dalam baterai. Setiap komponen harus dilengkapi dengan *charge controller* sendiri untuk menjamin operasi kerja yang handal, selain itu generator dan *inverter* harus didisain agar dapat melayani beban puncak. Pada PLTH yang menggunakan sistem paralel, beban dapat disuplai baik dari genset maupun dari *inverter* secara paralel. BDI (*Bidirectional inverter*) digunakan untuk menjembatani antara baterai dan sumber AC, BDI dapat mengisi baterai dari genset maupun dari sumber energi terbarukan [7].

D. Aspek Biaya

1. Biaya Siklus Hidup (Life Cycle Cost)

Biaya siklus hidup suatu sistem adalah semua biaya yang dikeluarkan oleh suatu sistem, selama kehidupannya. Biaya siklus hidup (LCC) pada sistem PLTS ditentukan oleh nilai sekarang dari biaya total sistem PLTS yang terdiri dari biaya investasi awal, biaya jangka panjang untuk pemeliharaan dan operasional serta biaya penggantian. Biaya siklus hidup (LCC) dapat dihitung menggunakan (Pers.12) [12]:

Nilai sekarang biaya tahunan yang akan dikeluarkan beberapa waktu mendatang (selama umur proyek) dengan jumlah pengeluaran yang tetap, dihitung dengan (Pers. 13)[12]:

2. Faktor Diskonto

Faktor diskonto (*Discount Factor*) adalah faktor yang digunakan untuk mengkonversi penerimaan-penerimaan di masa mendatang menjadi nilai sekarang, sehingga dapat dibandingkan dengan pengeluaran pada masa sekarang, (Pers. 14) faktor diskonto adalah sebagai berikut [12]:

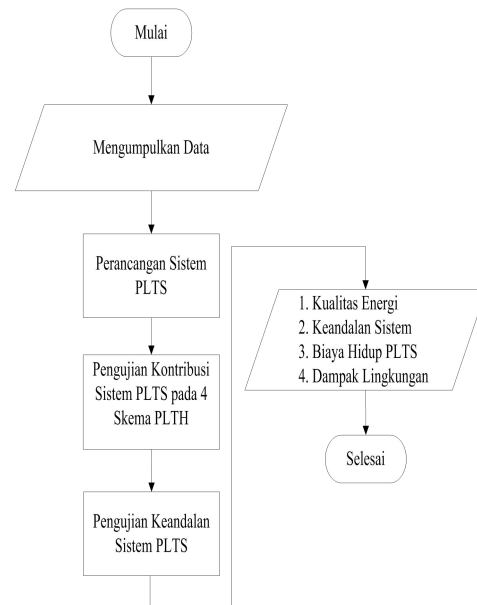
3. Biaya Energi

Biaya energi merupakan perbandingan antara biaya total per tahun dari sistem dengan energi yang dihasilkan selama periode yang sama. Berdasarkan sisi ekonomi, biaya energi PLTS berbeda dari biaya energi untuk pembangkit konvensional. Biaya energi (*Cost Of Energy*) PLTS dapat dihitung menggunakan (Pers. 15)[12]:

Adapun faktor pemulihan modal dapat dihitung menggunakan (Pers. 16)[12]:

III. METODOLOGI PENELITIAN

Perancangan sistem PLTS yang dibuat pada penelitian ini digunakan pada skema sistem pembangkit hibrida sel surya dan disel. Secara sederhana, proses studi kasus pemanfaatan energi matahari sebagai pembangkit listrik alternatif dapat dijelaskan melalui diagram alir pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Perencanaan Penelitian

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perancangan Sistem PLTS

1. Estimasi beban

Perhitungan beban yang akan disuplai PLTS dilakukan dengan cara menambahkan perkiraan pemakaian energi listrik selama 12 jam pada rentang waktu 06.00 sampai 18.00 dengan pemakaian aktual energi listrik di Pulau Panjang. Perkiraan pemakaian energi listrik pada rentang waktu 06.00 sampai 18.00 diperoleh dari rata-rata pemakaian energi listrik aktual 12 jam, dengan total pemakaian aktual 12 jam sebesar 306,74kW maka diperoleh rata-rata pemakaian energi listrik aktual selama 12 jam adalah sebesar 23,60kW. Besarnya beban yang akan disuplai PLTS berdasarkan hasil perhitungan didapat beban selama 24 jam sebesar 566,34kW.

2. Kapasitas inverter

Perhitungan kapasitas *inverter* disesuaikan dengan beban puncak yang harus disuplai serta dihitung dengan menambahkan faktor *future margin*, *error margin* dan *capacity factor*. Berdasarkan beban puncak bernilai 30,16kW, maka untuk dapat memenuhi kebutuhan beban puncak, kapasitas minimum *inverter* yang digunakan dapat dihitung sebagai berikut:

Berdasarkan *rating* minimum *inverter* yang dibutuhkan yaitu 40,55kW serta *rating* terdekat yang tersedia dipasaran, maka dipilih *inverter* 45kW. *Inverter*

45kW ini memiliki *rated voltage input* sebesar 360V, oleh karena itu sistem PLTS yang akan dikembangkan menggunakan *rating* tegangan sistem sebesar 360V.

3. *Kapasitas dan jumlah baterai*

Kapasitas baterai dihitung berdasarkan acuan total beban yang akan disuplai. Diketahui dari hasil perhitungan, pemakaian energi listrik (E_L) 24 jam di Pulau Panjang sebesar 566,34kWh/hari. Saat siang hari, sebagian beban tidak perlu terlalu 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, berdasarkan pertimbangan tersebut maka kapasitas baterai akan dihitung untuk kebutuhan energi pada malam hari saja yaitu sebesar 306,74kWh/hari. Besarnya kapasitas baterai (Pers. 9) yang diperlukan dapat dihitung sebagai berikut:

Berdasarkan kebutuhan *ampere hour* dalam satu hari, dibutuhkan baterai dengan kapasitas baterai yang cukup besar dan tegangan nominal yang besar pula untuk dapat memenuhi kebutuhan energi, maka baterai yang digunakan pada penelitian ini memiliki kapasitas 1156Ah dengan tegangan nominal baterai 6V. Agar dapat memenuhi kebutuhan 3328,34Ah/hari dan sesuai *rating* tegangan pada sistem 360V maka jumlah baterai yang diperlukan PLTS adalah sebanyak 180 baterai. Adapun rangkaian baterai membentuk 3 rangkaian (*string*) yang terhubung paralel dengan 1 rangkaian terdiri dari 60 baterai yang terhubung secara seri.

4. *Kapasitas dan jumlah panel surya*

Daya yang dibangkitkan PLTS (P_{WP}) disesuaikan dengan kebutuhan beban yang akan disuplai serta dipengaruhi oleh faktor pembangkitan panel surya (PGF). Faktor pembangkitan panel surya (PGF) dari hasil perhitungan menggunakan persamaan (7) dengan nilai referensi CE (*Collection Efficiency*) panel surya pada *software* HOMER sebesar 84% dan nilai rata-rata intensitas matahari di Pulau Panjang sebesar 5,079kWh/hari (NASA). Apabila nilai CE dan rata-rata intensitas matahari di Pulau Panjang disubstitusikan (Pers. 7) diperoleh nilai PGF sebesar:

Berdasarkan nilai PGF (Pers. 6) sebesar 4,27kWh/hari dan pemakaian energi listrik (E_L) selama 24 jam sebesar 566,34kWh/hari maka kapasitas pembangkitkan panel surya (P_{WP}) (Pers. 8) sebesar:

976 panel surya tersebut akan dibentuk menjadi rangkaian panel atau *array* yang disesuaikan dengan *rating* tegangan sistem sebesar 360V dan kapasitas pembangkitan. Agar *rating* tegangan sistem sebesar 360V dapat terpenuhi maka pada 1 *string* rangkaian panel surya dibutuhkan panel surya yang dipasang seri sebanyak:

sehingga rangkaian *string* yang terbentuk sebanyak:

Jumlah panel surya yang digunakan berdasarkan hasil perhitungan pada rangkaian seri dan paralel menjadi sebanyak 979 buah, dengan 89 rangkaian (*string*) yang terhubung paralel dengan 1 rangkaian terdiri dari 11 panel yang terhubung secara seri. Banyaknya panel yang dirangkai paralel akan menguatkan arus dan banyaknya panel yang terhubung seri akan menguatkan tegangan sehingga besarnya energi yang dihasilkan oleh rangkaian *array* tersebut menjadi:

5. *Peletakan panel surya*

Penentuan besarnya *tilt angle* pada penelitian ini dilakukan dengan 2 cara, yaitu simulasi dan perhitungan. Hasil simulasi menggunakan SolarCell Module Lucas Nuelle Tech. Training System menunjukkan bahwa posisi sudut *tilt angle* 10° merupakan posisi sudut yang paling optimal.

Secara perhitungan, besarnya *tilt angle* didasarkan pada dua orientasi, yaitu orientasi sudut panel (utara-selatan) dan (timur-barat). Posisi geografis Pulau Panjang terletak pada belahan bumi selatan, maka acuan *solar altitude* pada kutub utara bumi dan *tilt angle* diorientasikan menghadap utara (LU). Tabel 1 memperlihatkan besarnya *declinasi*, *solar altitude* dan *tilt angle* selama berdasarkan penelitian saat periode *solice* dan *equinox*.

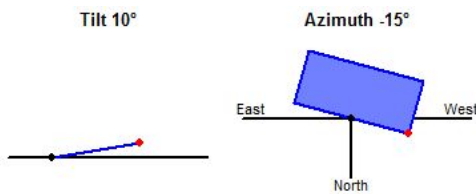
Hasil perhitungan menunjukkan bahwa *solar altitude* tahunan di Pulau Panjang bervariasi secara periodik mulai pada ketinggian 107,5° (acuan utara bumi) pada saat *winter solstice*, lalu bergerak turun sampai 84° saat *vernal equinox*. Pada saat *summer solstice*, *solar altitude* berada pada ketinggian 60,5° dan mulai bergerak naik sampai 84° saat *autumnal equinox* dan proses ini kembali berulang secara periodik. Menggunakan (Pers. 5) diperoleh *fix tilt angle* untuk wilayah Pulau Panjang sebesar:

Tabel 1. *Tilt Angle* di Pulau Panjang Selama Periode *Solice* dan *Equinox*

	<i>Winter Solstice</i>	<i>Equinox</i>	<i>Summer Solstice</i>
<i>Declination (°)</i>			
<i>Solar altitude (°)</i>			
<i>Tilt angle (°)</i>			

Berdasarkan alasan teknis serta hasil simulasi dan perhitungan, maka besar sudut elevasi panel pada perancangan ini adalah 10°LU, sedangkan orientasi sudut *azimuth* panel pada penelitian ini menggunakan hasil penelitian sebelumnya. Berdasarkan hasil penelitian mengenai *solar tracker* didapatkan sudut *azimuth* optimal

untuk studi kasus wilayah Serang dan Cilegon sebesar -15° dari barat. Ilustrasi orientasi panel surya dapat dilihat pada Gambar3 [6].



Gambar 3. Ilustrasi Orientasi Panel Surya

B. Pengujian Kontribusi PLTS

Sistem PLTS yang telah dirancang disimulasikan pada sistem PLTH (Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida) menggunakan *software* HOMER. Simulasi dilakukan dengan 2 skema utama yaitu skema PLTD dan PLTH. Skema PLTH yang digunakan pada penelitian ini adalah PLTS dengan PLTD. Simulasi dilakukan untuk mencari nilai kontribusi PLTS terhadap PLTH.

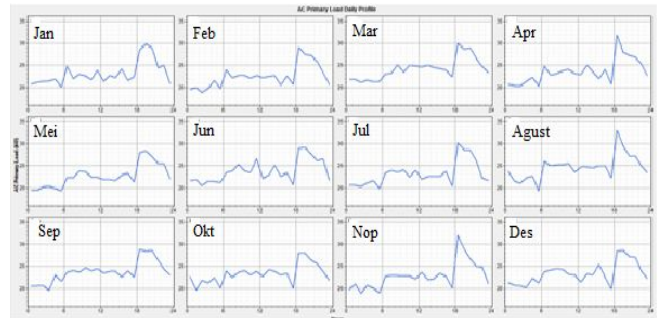
1. Skema PLTD

Skema PLTD merupakan kondisi awal yang dibuat sebagai pembanding untuk skema PLTH. Hal yang dibandingkan adalah penggunaan bahan bakar, kelebihan energi dan emisi yang dihasilkan. Skema ini terdiri dari satu unit PLTD 248kW. Waktu operasi PLTD diatur 24 jam untuk memenuhi kebutuhan energi selama 24 jam. Hasil simulasi skema PLTD dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 2. Hasil Simulasi pada Skema PLTD

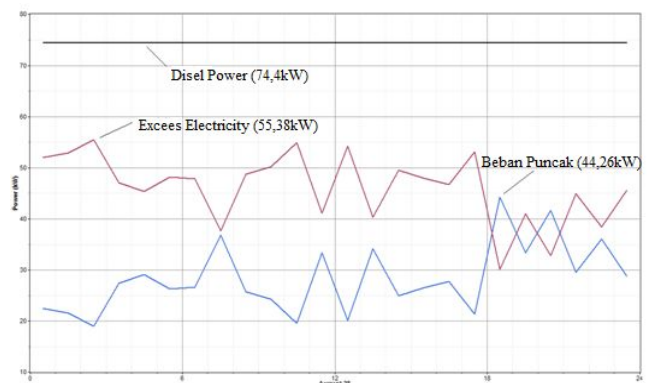
Parameter	Skema PLTD
Kontribusi Energi (%)	
PLTD	100
PLTS	-
Bahan Bakar (L/tahun)	
Diesel 248kW	272.755
Waktu Operasi (jam/tahun)	
PLTD	8.760
PLTS	-
Total Produksi (kWh/tahun)	
PLTD	651.732
PLTS	-
Excess Electricity (kWh/tahun)	446.614

Pada Tabel 2 terlihat bahwa total BBM yang dikonsumsi oleh sistem ini selama 1 tahun adalah 272.755 liter untuk waktu operasi 8.760jam/tahun. Besarnya produksi energi yang dihasilkan dalam satu tahun sebesar 651.732kWh/tahun. Pemakaian energi rata-rata harian untuk tiap bulan dalam satu tahun dapat dilihat pada Gambar4.



Gambar 4. Hasil Pemakaian Energi Listrik dalam Satu Tahun

Pada Gambar 4 diperoleh urutan nilai pemakaian energi tertinggi sampai terendah dalam satu tahun yaitu bulan Agustus, Maret, Juni, September, April, Desember, Oktober, Juli, Januari, Nopember, Mei dan Februari masing-masing sebesar 591,834kWh/hari, 579,45kWh/hari, 570,92kWh/hari, 569,63kWh/hari, 566,40kWh/hari, 561,63kWh/hari, 559,14kWh/hari, 556,24kWh/hari, 555,50kWh/hari, 547,70kWh/hari, 544,27kWh/hari dan 539,30kWh/hari. Besarnya produksi energi dan pemakaian energi listrik akan mempengaruhi kondisi ketersediaan listrik tiap harinya dan untuk mengetahui kemampuan skema PLTD dalam menyuplai kebutuhan listrik, maka diambil sampel hasil simulasi mengenai kondisi ketersediaan listrik pada bulan Agustus. Kondisi ketersediaan listrik pada bulan Agustus dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Kondisi Ketersediaan Listrik PLTD

Pada Gambar 5 terlihat bahwa PLTD beroperasi sepanjang hari dengan keluaran daya 74,4kW sedangkan kebutuhan beban puncak terjadi pada pukul 18.30 yaitu sebesar 44,26kW. Produksi energi yang dihasilkan PLTD sangat berlebih dibandingkan pemakaian energi, sehingga terjadi *excess electricity*. *Excess electricity* adalah selisih total produksi energi listrik selama satu tahun yang dihasilkan pembangkit listrik dan total beban yang disuplai. Pada Gambar5, *excess electricity* terjadi sepanjang hari dengan nilai maksimum hingga mencapai 55,38kW. Berdasarkan Tabel3, *excess electricity* yang terjadi pada skema PLTD sepanjang tahun 2012 adalah sebesar 68,5% atau 446.614kWh/tahun. *Excess electricity* sebesar 68,5% sangatlah besar, sehingga dianggap sebagai pemborosan energi karena kelebihan energi ini tidak dapat dimanfaatkan atau disimpan pada skema PLTD.

2. Skema PLTH

Skema PLTH yang disimulasikan terdiri dari dua pembangkit, yaitu PLTS berkapasitas 153,89kWp dan PLTD dengan kapasitas mesin 248kW. Berdasarkan hasil perhitungan, sistem PLTS terdiri dari 979 panel surya 150W, 180 baterai berkapaitas 1156Ah dan *inverter* dengan kapasitas 45kW. Skema PLTH akan diberi pembebanan 24 jam dengan besarnya kebutuhan energi dalam satu hari. Pada simulasi skema PLTH dibuat lagi 4 kondisi waktu penyalaan generator disel dengan kapasitas PLTS dan PLTD yang tetap sama, hal ini dilakukan untuk meminimalkan operasi kerja PLTD dan mencari kontribusi PLTS yang optimal (50% sampai 70%). Empat kondisi penyalaan generator disel dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Operasi Penyalaan Generator PLTD

Jenis Simulasi	Waktu forced on	Waktu forced off	Waktu optimized
Kondisi 1	24 jam	-	-
Kondisi 2	18.00 s/d 06.00	06.00 s/d 18.00	-
Kondisi 3	18.00 s/d 24.00	24.00 s/d 18.00	-
Kondisi 4	18.00 s/d 20.00	01.00 s/d 18.00	20.00 s/d 01.00

Kondisi 1 adalah kondisi mesin disel beroperasi 24 jam. Kondisi 2 adalah kondisi mesin disel beroperasi 12 jam. Kondisi 3 adalah kondisi mesin disel beroperasi 6 jam dan Kondisi 4 adalah kondisi pengoptimalan waktu mesin disel beroperasi. Pada kondisi 4 mesin disel tidak selamanya beroperasi 8 jam setiap harinya namun menyesuaikan kapasitas energi yang dibutuhkan sesuai periode waktu yang ditentukan. Kondisi optimasi 8 jam ditentukan berdasarkan perhitungan beban minimum yang dibutuhkan serta *try and error* simulasi.

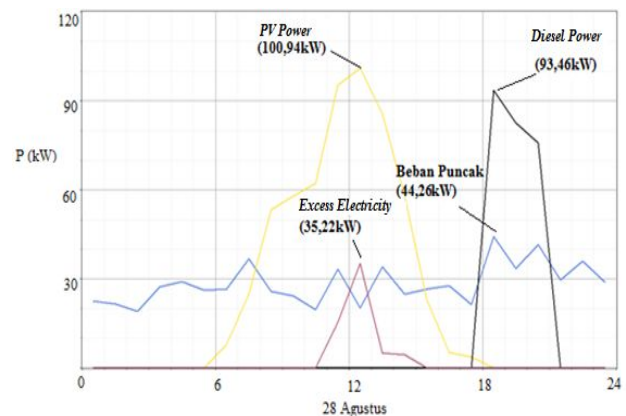
Berdasarkan hasil simulasi pada Tabel 5, diperoleh urutan nilai kontribusi energi PLTS tertinggi adalah kondisi optimasi 8 jam sebesar 67%. Kriteria yang ingin didapatkan dari hasil simulasi skema PLTH adalah kondisi yang memiliki nilai kontribusi PLTS terbesar dan nilai *excess electricity* yang kecil. Peningkatan kontribusi PLTS pada simulasi ini terjadi karena waktu operasi mesin disel dibuat terus berkurang sampai batas minimum energi yang dibutuhkan, dengan berkurangnya waktu operasi mesin disel maka konsumsi BBM juga akan berkurang.

Total produksi listrik yang dihasilkan oleh skema PLTH optimasi 8 jam adalah 285056kWh/tahun dengan kontribusi PLTD sebesar 33% atau 93.514kWh/tahun sedangkan kontribusi PLTS sebesar 67% atau 191.542kWh/tahun. Besarnya produksi energi listrik serta kondisi suplai listrik PLTH dapat dilihat pada Gambar 6.

Tabel 5. Hasil Simulasi PLTH pada 4 Kondisi Operasi Disel

Parameter	Disel 24 jam	Disel 12 jam	Disel 6 jam	Optimasi 8 jam
Kontribusi Energi				

(%)				
PLTD	77	63	46	33
PLTS	23	37	54	67
Bahan Bakar (L/thn)	272.76	136.55	68.83	38.37
Waktu Operasi (jam/thn)				
PLTD	8.76	4.38	2.19	1.20
PLTS	4.38	4.38	4.38	4.38
Total Produksi (kWh/thn)				
PLTD	651.73	326.64	165.54	93.514
PLTS	191.54	191.54	191.54	191.54
Excess Electricity (kWh/thn)	638.16	298.93	120.68	40.01

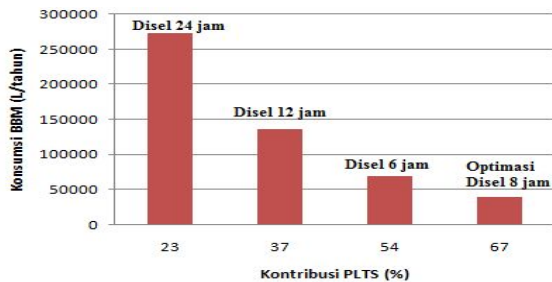


Gambar 6. Kondisi Suplai Listrik PLTH

Gambar 6 adalah kondisi suplai listrik PLTH pada tanggal 28 Agustus 2012. Pada Gambar6, PLTS beroperasi hampir 12 jam setiap hari dengan keluaran daya maksimum sebesar 100,94kW, sedangkan PLTD beroperasi pada jam 18.00 dan 21.00 dengan keluaran daya maksimum 93,46kW. Pada tanggal 28 Agustus 2012, beban puncak terjadi pada pukul 18.30 yaitu sebesar 44,26kW. Kelebihan listrik pada sistem ini hanya terjadi dari pukul 11.00 sampai 15.00 dengan daya maksimum sebesar 35,22kW. Hal ini terjadi karena energi yang dihasilkan PLTS dan ketersediaan energi baterai lebih besar dari energi yang dipakai.

Kelebihan listrik yang tidak terpakai memiliki nilai yang berfluktuasi seiring dengan total produksi listrik pada sistem PLTH. Walaupun total produksi energi dari waktu operasi disel 24 jam sampai optimasi 8 jam semakin berkurang, namun pada kondisi optimasi 8 jam masih terdapat *excess electricity* (energi berlebih) sebesar 40.011kWh/tahun atau sekitar 14%. Nilai *excess electricity* pada kondisi optimasi 8 jam merupakan yang paling kecil dari keempat kondisi simulasi. Berdasarkan pertimbangan nilai kontribusi PLTS terbesar dan nilai *excess electricity* yang kecil, maka pada penelitian ini dipilih rancangan PLTS pada skema PLTH kondisi optimasi 8 jam sebagai pembangkit alternatif di Pulau Panjang.

Hasil lainnya menunjukkan bahwa dengan berkurangnya waktu operasi mesin diesel maka konsumsi BBM juga akan berkurang. Waktu operasi diesel optimal 8 jam dapat menurunkan pemakaian bahan bakar sampai 85,93% atau menjadi 38.372L/tahun seperti yang terlihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Penurunan Konsumsi BBM Diesel 248kW

C. Pengujian Keandalan Sistem PLTS

Setelah sistem PLTS yang telah dirancang disimulasikan pada sistem PLTH (Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida) menggunakan *software* HOMER dan mendapatkan nilai kontribusi PLTS yang optimal, selanjutnya sistem PLTS akan disimulasikan menggunakan *software* PVsyst untuk mengetahui diagram alir energi PLTS dan keandalan sistem yang dirancang. Simulasi yang dilakukan berdasarkan parameter komponen PLTS pada skema PLTH kondisi optimasi 8 jam. Berdasarkan parameter simulasi tersebut, didapat hasil simulasi yang ditunjukkan pada Tabel 6.

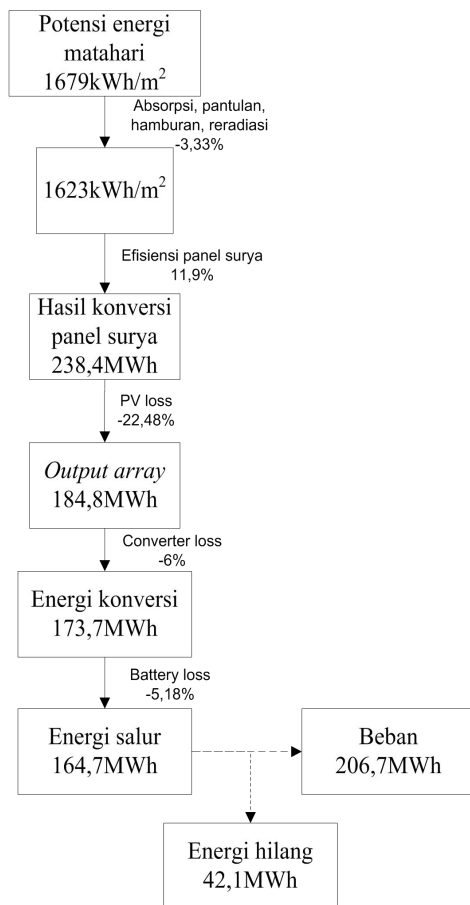
Tabel 6. Hasil Simulasi Sistem PLTS Menggunakan PVsyst

Bulan	Energi Konversi (kWh)	Kekurangan Energi (kWh)	Energi Suplai (kWh)	Beban (kWh)	Solfrac (%)
Jan	12651	5158	12400	17558	70,62
Feb	15061	1830	14029	15859	88
Mar	12340	5872	11686	17558	67
Apr	15208	2317	14675	16992	86,36
Mei	13101	5537	12021	17558	68,46
Jun	14299	3156	13836	16992	81
Jul	16232	2414	15144	17558	86
Agust	13963	4399	13159	17558	75
Sep	15885	1790	15202	16992	89
Okt	12853	5411	12147	17558	69
Nop	15076	2917	14075	16992	83
Des	17158	1248	16310	17558	93
Total	173827	42049	164684	206733	79,79

Pada Tabel 6 terdapat variabel hasil simulasi energi konversi, kekurangan energi, energi suplai, beban dan *solfrac*. Variabel tersebut dianalisa untuk menentukan kualitas dan keandalan sistem PLTS yang dirancang. Energi konversi merupakan energi listrik yang tersedia hasil keluaran panel surya yang dapat diteruskan ke *inverter* dengan besarnya total energi konversi hasil simulasi dalam satu tahun sebesar 173827kWh dan energi

terbesar pada bulan Desember yaitu sebesar 17158kWh. Energi suplai merupakan energi siap salur hasil keluaran inverter dan baterai. Besarnya energi suplai dalam satu tahun sebesar 164684kWh dengan energi suplai terbesar mencapai 16310kWh. Berdasarkan perbandingan antara energi suplai dengan energi konversi diperoleh nilai kualitas energi yang dihasilkan sebesar 94,74%, sedangkan keandalan sistem PLTS yang dirancang sebesar 79,79% yang diperoleh dari perbandingan antara energi suplai dengan beban atau disebut juga *solfrac*. Besarnya energi suplai yang dihasilkan tidak sebesar energi konversi, penurunan energi tersebut sebesar 9143kWh atau 5,25% dari energi hasil konversi panel surya. Adanya penurunan energi tersebut disebabkan karena *losses* pada sistem PLTS. Besarnya *losses* energi pada sistem PLTS yang dirancang dapat dilihat pada Gambar 8.

Gambar 8 merupakan diagram *losses* energi sistem PLTS yang terjadi dalam satu tahun dari mulai besarnya energi matahari yang tersedia sampai menjadi energi siap salur. Berdasarkan Gambar 8, potensi energi matahari di Pulau Panjang dalam satu tahun adalah sebesar 1679kWh/m². Besarnya energi matahari ini masih berupa radiasi energi matahari secara global. Setelah radiasi matahari yang sampai ke permukaan bumi atau *insolation (incoming solar radiation)* mengalami penyerapan (*absorpsi*), pemantulan, hamburan dan pemancaran kembali atau *reradiasi*, besarnya energi matahari yang dapat dikonversi menjadi 1623kWh/m² atau berkurang 3,33%. Potensi energi matahari sebesar 1623kWh/m² kemudian dikonversi menggunakan 979 panel surya 150W dengan efisiensi STC 11,9%. Efisiensi 11,9% diperoleh dari STC (*Standart Test Conditions*), STC dilakukan pada temperatur modul surya 25°C dan intensitas matahari 1000W/m². Energi hasil konversi panel surya sebesar 238,4MWh, namun energi tersebut bukanlah energi bersih keluaran dari *array* karena masih terdapat *losses* energi dari panel surya itu sendiri. *Losses* tersebut adalah *losses* akibat *level* intensitas matahari, temperatur, kualitas panel surya hingga *losses* akibat *wiring*. Berdasarkan Gambar 8 besarnya *losses* pada *array* ini mencapai 22,48% sehingga energi *output* dari *array* menjadi 184,8MWh. *Losses* lainnya yang terjadi adalah *losses* dari konverter dan baterai yang mencapai 11,18%, sehingga besarnya energi yang dihasilkan menjadi 164,7MWh yang kemudian akan disuplai ke beban. Besarnya kebutuhan beban pada Tabel 6 dalam tahun mencapai 206733kWh. Apabila total energi suplai dikurangi dengan kebutuhan beban, maka diperoleh kekurangan energi karena *losses* sebesar 42049kWh atau 20,34% dari total kebutuhan beban dalam satu tahun. Besarnya energi yang belum terpenuhi ini dapat diatasi dengan ketersediaan energi dari PLTD yang ada di Pulau Panjang.



Gambar 8. Diagram *Losses* Sistem PLTS

D. Penurunan Emisi PLTD

Kondisi awal kelistrikan di Pulau Panjang disuplai oleh PLTD dengan jam operasi 12 jam. Sepanjang pengoperasian PLTD tersebut, terdapat emisi yang dihasilkan oleh PLTD. Apabila diasumsikan PLTD beroperasi 24 jam untuk memenuhi kebutuhan listrik, maka tingkat emisi ini akan meningkat pula dan mempengaruhi keadaan lingkungan sekitar menjadi kurang sehat. Berdasarkan simulasi skema PLTD dan PLTH pada *software* HOMER, diperoleh penurunan tingkat emisi PLTD karena meningkatnya kontribusi PLTS. Perbandingan nilai kontribusi PLTS dengan tingkat emisi yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Perbandingan Kontribusi PLTS dengan Emisi PLTD

Kondisi	Kontribusi PLTS	Emisi (kg/tahun)					
		CO ₂	CO	HC	PM	SO _x	NO _x
PLTD	0	718254	1773	196	134	1442	15820
PLTH 1	22	718254	1773	196	134	1442	15820
PLTH 2	36	359584	888	98,3	66,9	722	7920
PLTH 3	53	181243	447	49,6	33,6	364	3992
PLTH 4	69	101046	249	27,6	17,1	203	2226

Berdasarkan Tabel 7, ketika disain PLTD disimulasi dan dioptimasi dengan nilai disain PLTD berbagai macam kondisi, maka didapatkan tingkat emisi CO₂ dan

NO_x semakin menurun seiring dengan menurunnya pemakaian bahan bakar pada PLTD. Seperti terlihat pada Tabel 7, nilai emisi CO₂ tertinggi terjadi ketika kontribusi energi terbarukan 0% dengan nilai emisi CO₂ adalah 718254kg/tahun. Nilai emisi CO₂ menjadi 101046kg/tahun ketika kontribusi energi terbarukan 67% berkurang sebanyak 85,93% atau 617208kg/tahun. Hal yang sama juga terjadi emisi NO_x, ketika kontribusi energi terbarukan 0% nilai emisi NO_x adalah 15820kg/tahun. Nilai emisi NO_x menjadi 2226kg/tahun ketika kontribusi energi terbarukan 67% berkurang sebanyak 85,93% atau 13594kg/tahun.

E. Analisis Biaya Energi PLTS

Biaya investasi awal untuk PLTS yang akan dikembangkan di Pulau Panjang sebesar US\$858809 mencakup seperti biaya untuk komponen PLTS serta biaya instalasi PLTS. Biaya untuk komponen PLTS ini terdiri dari biaya untuk pembelian panel surya, baterai dan *inverter*. Adapun besar biaya pemeliharaan dan operasional (M) per tahun untuk PLTS yang akan dikembangkan adalah sebagai berikut:

Besarnya nilai sekarang (*present value*) untuk biaya pemeliharaan dan operasional (M_{PW}) PLTS selama umur proyek 25 tahun dengan tingkat diskonto 10,5% dihitung dengan (Pers. 11) sebagai berikut:

Berdasarkan biaya investasi awal (C), perhitungan M_{PW} dan biaya penggantian baterai dan *inverter*, maka biaya siklus hidup (LCC) untuk PLTS yang akan dikembangkan selama umur proyek 25 tahun adalah sebagai berikut (Pers 12):

Faktor pemulihan modal untuk mengkonversikan semua arus kas biaya siklus hidup (LCC) menjadi serangkaian biaya tahunan, diperhitungkan dengan (Pers. 16) sebagai berikut:

Berdasarkan hasil perhitungan LCC, CRF dan kWh produksi tahunan maka besar biaya energi (COE) untuk PLTS yang akan dikembangkan di Pulau Panjang adalah sebagai berikut (Pers 15):

Sedangkan besarnya COE untuk sistem PLTH dapat dihitung dengan menambahkan nilai LCC PLTD (M_{PW}, R_{PW} dan biaya bahan bakar disel) pada LCC PLTH, sehingga dengan nilai M_{PW}, R_{PW} dan *Fuel* disel sebesar \$122244, \$20201, \$440570 serta total produksi energi PLTH dalam satu tahun sebesar 285056kWh diperoleh nilai COE PLTH sebesar:

Harga minyak dunia yang cenderung meningkat tentu akan mempengaruhi biaya bahan bakar minyak (biaya variabel) dalam perhitungan BPP energi listrik di Pulau Panjang. Apabila harga bahan bakar solar industri mengalami peningkatan harga, rata-rata sebesar 18,4% per tahun (sesuai dengan rata-rata kenaikan harga minyak dunia), maka akan terjadi kenaikan harga biaya per kWh PLTD tiap tahunnya. Perkiraan biaya per kWh PLTD sampai tahun 2025 ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Biaya per kWh PLTD dengan Acuan Kenaikan Harga BBM 18,4%/tahun

Tahun	Harga Solar (\$)	Biaya per kWh PLTD (\$)
2012	0,95	0,38
2013	1,12	0,44
2014	1,33	0,51
2015	1,58	0,58
2016	1,87	0,68
2017	2,21	0,79
2018	2,62	0,92
2019	3,10	1,07
2020	3,67	1,25
2021	4,34	1,47
2022	5,14	1,73
2023	6,09	2,03
2024	7,21	2,39
2025	8,54	2,81

Berdasarkan Tabel 8, biaya per kWh PLTS pada empat tahun pertama masih di atas biaya per kWh PLTD, namun pada tahun 2016, biaya per kWh PLTS lebih murah dari biaya per kWh PLTD. Apabila harga BPP pada Tabel 8 dibandingkan dengan BPP dari PLTH (berdasarkan penurunan harga panel surya) yang besarnya relatif konstan sebesar \$0,64/kWh, maka dapat dinyatakan bahwa biaya energi PLTS menjadi lebih murah dari BPP energi listrik PLTD di Pulau Panjang dalam lima tahun mendatang. Memiliki biaya energi yang mendekati bahkan lebih murah dari PLTD dan puncak dari krisis energi yang diprediksi terjadi pada tahun 2025 semakin membuat biaya per kWh PLTD jauh di atas biaya per kWh PLTS, tentu akan membuat PLTS yang ketersediaan sumber energinya tak terbatas dan penggunaannya dapat membantu mengurangi polusi lingkungan lebih menguntungkan untuk dimanfaatkan sebagai pembangkit alternatif tambahan di Pulau Panjang.

V. PENUTUP

A. Kesimpulan

Penelitian studi pemanfaatan energi matahari di Pulau Panjang ini menghasilkan beberapa kesimpulan di antaranya:

1. Telah dirancang sistem PLTS pada skema pembangkit hibrida PLTD-PLTS dengan kapasitas inverter 45kW, baterai 3328,34Ah, pembangkitan panel surya sebesar 153,89kWp dan orientasi panel surya pada 10°LU dengan sudut *azimuth* -15°.
2. Hasil pengujian 4 skema waktu penyalaan mesin disel pada PLTH didapatkan nilai kontribusi optimal PLTS sebesar 67% dan kontribusi PLTD 33%.
3. Hasil pengujian menunjukkan besarnya energi suplai yang dihasilkan panel surya adalah sebesar 164684kWh/tahun dengan kualitas energi sebesar 94,73%, keandalan sistem sebesar 79,79% dan *losses* sistem 33,66%. Pada aspek ekonomis, biaya energi per kWh yang dibutuhkan PLTH setelah lima tahun akan lebih murah dari PLTD dengan BPP sebesar \$0,64/kWh dan dari aspek lingkungan pengembangan PLTS membuat emisi karbon menurun 85,93% dari kondisi operasi disel 24 jam. Berdasarkan pertimbangan teknis, ekonomis dan lingkungan pengembangan PLTS di Pulau Panjang tentu akan membuat PLTS lebih menguntungkan untuk dimanfaatkan sebagai pembangkit alternatif tambahan di Pulau Panjang untuk jangka usia hidup PLTS selama 25 tahun.

B. Saran

Masih terdapat kekurangan dalam penelitian ini sehingga perlu pengembangan agar menjadi lebih baik lagi. Terdapat beberapa saran diantaranya:

1. Perlu dilakukan studi lebih lanjut mengenai potensi pembangkit alternatif lainnya yang dapat dimanfaatkan di wilayah Serang dan Cilegon.
2. Sebagai studi lebih lanjut, perlu dilakukan analisa sinkronisasi energi antar pembangkit pada sistem PLTH.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Astu P dan D. Nursuhud. (2008). *Mesin Konversi Energi Edisi II*. Yogyakarta: Penerbit Andi.
- [2] Astuti. (2010). *Optimasi Pembangkitan Energi Listrik Hibrida Surya-Angin-Diesel di Desa Pulo Panjang Banten Menggunakan Algoritma Genetik*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
- [3] Dwistya A, N. (2010). *Aplikasi Sel Surya Sebagai Energi Terbarukan Pembangkit Listrik Pada Solar Home System*. Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Padjadjaran.
- [4] Fischbach, J. (2008). *Interactive Lucas Nuele Labsoft Renewable Energy Sources-Design and Operating of Photovoltaic Systems Course number SO2800-3A Version 1.0*. German : Lucas Nuele GmbH.
- [5] Gilbert, M. Masters. (2004). *Renewable and Efficient Electric Power Systems Chapter 7 and Chapter 9*. Stanford University: A Jhon Wiley & Sons Inc Publication.
- [6] Hardiansyah. (2012). *Perancangan Dual Axis Solar Tracker*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.

-
- [7] Herlina. (2009). *Analisis Dampak Lingkungan dan Biaya Pembangkitan Listrik Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida di Pulau Sebesi Lampung Selatan*. Tesis Teknik Elektro Universitas Indonesia.
- [8] Santhiarsa, I Gusti N. N. dan I Gusti B. W. K. (2008). *Kajian Energi Surya Untuk Pembangkit Tenaga Listrik*. Jurusan Teknik Elektro Universitas Udayana.
- [9] Kunaifi. (2010). *Program Homer Untuk Studi Kelayakan Pembangkit Listrik Hibrida Di Propinsi Riau*. Seminar Nasional Informatika 2010 UPN.
- [10] Mintorogo, D. (2000). *Strategi Aplikasi Sel Surya (Photovoltaic Cells) pada Perumahan dan Bangunan Komersial*. Jurusan Arsitektur Fakultas Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya.
- [11] S. Kumara, N. (2010). *Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Skala Rumah Tangga Urban dan Ketersediaanya di Indonesia*. Jurusan Teknik Elektro Universitas Udayana,.
- [12] Santiari, I Dewa A. S. (2011). *Studi Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Sebagai Catu Daya Tambahan Pada Industri Perhotelan Di Nusa Lembongan Bali*. Tesis Jurusan Teknik Elektro Universitas Udayana.
- [13] Shrestha G.B. dan Goel L. (1998). *A Study On Optimal Sizing Of Stand-Alone Photovoltaic Stations*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 13, No. 4.
- [14] Sulasno, Ir. (1990). *Pusat Pembangkit Tenaga Listrik*. Semarang: Percetakan SW.
- [15] Zamroni, M. (2012). *Kajian Sistem Penyediaan Energi Listrik Hybrid Sel PV –Diesel Di Pulau Sebira Kepulauan Seribu*. Jurnal Sarjana Teknologi Bandung bidang Teknik Elektro dan Informatika Vol. 1, No. 1.