

Desain Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid Turbin Angin Dan Panel Surya Untuk Keperluan Mesin Pembuat Es Batu di PPP Morodemak

Dedi Nugroho¹, Ida Widiastuti

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung, Semarang
Jln. Raya Kaligawe km. 04, Semarang, 50272, Indonesia
email: ¹dedi.nugroho@unissula.ac.id, ²ida_fti@unissula.ac.id

Abstract -- PPP Morodemak is a fishery and marine business center in Purworejo Village Bonang District, Demak Regency. The general need of the fishing community is ice cube which are used to preserve fresh fish. The problem faced by fisherman is that it is difficult to get ice cubes, because there is no electricity available to operate the ice block machine in the village. To meet the electrical energy needs of the ice cube machine, a source of electrical energy is needed. This research aims to design a hybrid power plant sistem for solar panels and wind turbines by utilizing the potential of these two energy sources so that the production cost of making ice cubes becomes cheaper. The results of the research show that the potential for solar energy is quite large, with peak sun hour of 4.22 hours, while wind energy is relatively low because the wind speed is only 3.11 m/s. Therefore, the design of hybrid power plant focuses on solar panels, while wind turbines are used as an additional source of electrical energy. The need for electrical power reaches 10,733 kW, with the need for electrical energy reaching 239,863 kWh/day. Taking into account the potential of solar energy and wind energy, the solar panel design requires 150 PV modules, 50 strings which are grouped into 10 PV arrays with an output voltage of dc 145.89 volts, an output current of 514 A, a max power of 75 kW and wind turbine design is 3000 watts. The test was carried out through sistem modeling with simulink, the simulation results showed that the solar panels produced 499,1 A, 147 volts, 73,36 kW, while the wind turbines were 20.43 A, 147 volts, 3002 watts.

Keywords: solar panel, wind turbine, hybrid power plant

Abstrak -- PPP Morodemak merupakan sentra bisnis perikanan dan kelautan di Desa Purworejo Kecamatan Bonang Kabupaten Demak. Kebutuhan umum masyarakat nelayan adalah es batu yang digunakan untuk mengawetkan ikan segar. Permasalahan yang dihadapi nelayan adalah sulitnya mendapatkan es batu, karena belum tersedianya listrik untuk mengoperasikan mesin es balok di desa tersebut. Untuk memenuhi kebutuhan energi listrik dari mesin es batu diperlukan sumber energi listrik. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem pembangkit listrik hybrid panel surya dan turbin angin dengan memanfaatkan potensi kedua sumber energi tersebut sehingga biaya produksi pembuatan es batu menjadi lebih murah. Hasil penelitian menunjukkan potensi energi matahari cukup besar, dengan jam matahari puncak 4,22 jam, sedangkan energi angin relatif rendah karena kecepatan angin hanya 3,11 m/s. Oleh karena itu, perancangan pembangkit listrik hybrid berfokus pada panel surya, sedangkan turbin angin digunakan sebagai tambahan sumber energi listrik. Kebutuhan daya listrik mencapai 10.733 kW, dengan kebutuhan energi listrik mencapai 239.863 kWh/hari. Dengan mempertimbangkan potensi energi matahari dan energi angin, perancangan panel surya membutuhkan 150 modul PV, 50 string yang dikelompokkan menjadi 10 array PV dengan tegangan keluaran dc 145,89 volt, arus keluaran 514 A, daya maksimum sebesar 75 kW dan desain turbin angin 3000 watt. Pengujian dilakukan melalui pemodelan sistem dengan simulink, hasil simulasi menunjukkan

panel surya menghasilkan 499,1 A, 147 volt, 73,36 kW, sedangkan turbin angin menghasilkan 20,43 A, 147 volt, 3002 watt.

Kata kunci: panel surya, turbin angin, PLTH, hibrid.

*) penulis korespondensi: Dedi Nugroho
Email: dedi.nugroho@unissula.ac.id

I. PENDAHULUAN

Kesadaran masyarakat dunia terhadap dampak pencemaran lingkungan akibat penggunaan sumber daya fosil telah mendorong penggunaan energi terbarukan yang ramah lingkungan. Beberapa contoh sumber energi terbarukan yang memanfaatkan sumber daya alam ramah lingkungan secara langsung seperti energi surya, energi angin, energi air, energi gelombang laut, dan energi panas laut. Beberapa sumber penggunaan energi terbarukan lainnya seperti biomassa, biogas, *hydrogen*, *fuel cell*, dan sebagainya. Meskipun terdapat banyak sumber energi terbarukan, namun peranannya belum mampu sepenuhnya menggantikan energi fosil, hal ini disebabkan energi terbarukan memiliki beberapa kekurangan, misalnya pada energi surya hanya dapat memproduksi energi listrik di siang hari saja, produksi energi listrik dari turbin angin sangat tergantung pada kecepatan angin, dan sebagainya. Untuk mengatasi kendala tersebut maka diterapkan sistem hibrid yaitu menggabungkan dua atau lebih pembangkit listrik energi terbarukan agar dapat meningkatkan keandalan sistem. Bagian terpenting dalam pemanfaatan sumber energi terbarukan yang berasal dari sumber daya alam adalah mengetahui seberapa besar potensi sumber energi terbarukan yang ada di suatu tempat (wilayah), karena antara satu tempat dengan tempat lainnya sudah tentu berbeda.

Riset ini bertujuan untuk mendesain sistem pembangkit hibrid panel surya dan turbin angin dengan memanfaatkan sumber daya alam yang tersedia di wilayah PPP Morodemak kabupaten Demak. PPP Morodemak sendiri merupakan sentra perdagangan ikan hasil tangkapan nelayan setempat. Untuk pengawetan ikan diperlukan es batu yang didatangkan dari luar daerah. Agar es batu dapat disediakan sendiri oleh PPP Morodemak, maka diperlukan mesin pembuat es batu, dengan demikian harga es batu menjadi murah. Untuk menghemat biaya produksi es batu, dan juga dalam rangka mewujudkan sumber energi listrik ramah lingkungan, maka perlu dirancang sistem pembangkit listrik hibrid

II. PENELITIAN YANG TERKAIT

Beberapa peneliti telah melakukan kajian secara ekonomi terhadap operasi dan desain sistem PLTH yang didasarkan pada nilai *Net Present Value Cost* (NPC) dan *Cost Of Energy* (COE) menggunakan perangkat lunak HOMER, seperti pada beberapa kasus diantaranya :

- PLTH Bayu Bantul merupakan PLTH proyek percontohan yang menggabungkan turbin angin dan panel surya dengan kapasitas terpasang 90 kW sistem off grid yang digunakan untuk beban bangunan PLTH itu sendiri. Sistem pembebanan terbagi atas 4 grup yang masing – masing grup disuplai dari sumber daya berbeda. Kondisi ini dinilai tidak ekonomis, karena distribusi pembebanan masing-masing pembangkit tidak merata, maka untuk mengatasinya dilakukan rekonfigurasi jaringan . Hasil riset memperlihatkan dengan menggabungkan ke empat grup beban menjadi satu kesatuan dan menggabungkan unit-unit pembangkit dalam satu grid maka menghasilkan biaya operasi yang lebih ekonomis dan meningkatkan keandalan sistem [1].
- Pulau Semujur yang terletak di Kabupaten Bangka Belitung, selama ini energi listrik di suplai dari Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) 14 kW dengan operasi 3 jam/hari. Mengingat biaya bahan bakar yang mahal maka dirancang pemodelan sistem PLTH panel surya dan diesel untuk mengurangi biaya operasinya. Hasil simulasi memperlihatkan adanya penurunan penggunaan bahan bakar sebanyak 64,3% untuk kebutuhan PLTD tersebut [2].
- Pulau Panjang terletak di teluk Banten Kabupaten Serang. Kebutuhan energi listrik di pulau ini hanya beroperasi 12 jam/hari yang disediakan oleh PLTD. Untuk meningkatkan jam operasi menjadi 24 jam/hari maka dilakukan desain pemodelan PLTH panel surya dan diesel yang optimal. Hasil simulasi memperlihatkan PLTH dapat beroperasi selama 24 jam/hari dengan pembebanan optimal panel surya 63% dan diesel 37%. [3].
- Kapal Motor Barcelona memiliki generator diesel untuk menggerakkan kapal laut tersebut dan memenuhi kebutuhan energi listrik pada peralatan – peralatan listrik lainnya. Pembebanan maksimal mencapai sekitar 20 kW, sementara kapasitas generator diesel itu sendiri 200 kW. Memperhatikan biaya bahan bakar yang mahal dan kapasitas generator diesel yang relatif besar, maka dirancang kapasitas PLTH panel surya – diesel yang optimal. Hasil simulasi memperlihatkan kapasitas optimal generator diesel 10 kW dan panel surya 58,6 kW [4].
- Pulau Nyamuk merupakan bagian dari kepulauan Karimunjawa. Energi listrik masing mengandalkan PLTD, sehingga hanya bisa beroperasi 6 jam/hari. Memperhatikan potensi sumber energi terbarukan setempat berupa energi matahari, energi angin dengan kecepatan 4,75 m/s, dan ketersediaan serbuk kayu sebanyak 6 ton/hari, maka dirancang desain pemodelan PLTH dengan menggabungkan panel surya, turbin angin, biomassa, dan diesel agar suplai energi listrik dapat berlangsung selama 24 jam /hari. Hasil simulasi memperlihatkan Konfigurasi kapasitas PLTH yang optimal adalah terdiri dari panel surya kapasitas 40 kW, turbin angin berjumlah 70 unit (2,5 kW per unit), gasifikasi biomassa 150 kWkW, dan diesel 200 kW [5].

- Desa Saik terletak di kabupaten Kuantan Singingi Riau. Kebutuhan energi listrik diperkirakan mencapai 180 kWh/hari dengan beban puncak 25 kW. Untuk menghemat produksi energi listrik dirancang pemodelan PLTH dengan memanfaatkan potensi sumber daya alam yang tersedia berupa energi matahari dan energi kinetik air sungai. Berdasarkan hasil simulasi maka kapasitas optimal diperoleh dengan kapasitas panel surya 5 kW, Daries Hydrokinetic Turbine 3 kW dan generator diesel 18 kW [6].
- Desa Merden Kabupaten Kebumen memiliki PLTMH berkapasitas 2 x 200 kVA yang disuplai dari Waduk Wadaslintang. Pada musim kemarau PLTMH tidak dapat beroperasi. Berdasarkan hal tersebut dirancang pemodelan PLTH panel surya dan mikrohidro yang optimal. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi optimal terdiri dari kapasitas panel surya 15 kW dan mikrohidro 385 watt [7].
- PLTH on-grid yang menggabungkan beberapa sumber energi terbarukan seperti panel surya, turbin angin dan biomassa digabungkan ke sistem jaringan umum listrik (grid) dinilai lebih efektif dan ekonomis jika dibandingkan sistem of-grid. Hasil riset memperlihatkan sistem on grid memiliki banyak kelebihan, seperti biaya investasi lebih murah, andal dan kelebihan energi dapat disuplai ke sistem grid. Sistem ini lebih menguntungkan jika dibangun di area pedesaan yang memiliki potensi energi terbarukan [8].

Peneliti lain melakukan riset melalui perhitungan teknis yang didasarkan pada ketersediaan potensi energi terbarukan yang ada di daerah setempat. Beberapa penelitian tersebut adalah :

- Perancangan dan implementasi PLTH panel surya – turbin angin untuk skala rumah tangga yang didasarkan pada potensi iradiasi matahari berupa *peak sun hour* 4,6 jam dan kecepatan angin 3,5 m/s. Kebutuhan energi listrik rumah tangga 160 WH/hari. Hasil riset memperlihatkan kapasitas panel surya 40 Wp dan turbin angin dengan diameter 0,2 meter hanya menghasilkan daya listrik 1,169 watt [9].
- Perancangan PLTH panel surya – turbin angin untuk Desa Parangtritis Kabupaten Bantul. Potensi insolation matahari berkisar antara 5,08 – 6,56 kWh/m²/hari dan kecepatan angin berkisar antara 4,84 – 8,02 m/s. Kebutuhan energi listrik 890 kWh/hari dan daya maksimal 40 kW. Hasil riset memperlihatkan kapasitas panel surya 62,760 kW (120 wp x 523 modul PV) dan turbin angin 20 kW [10].

Sejumlah peneliti melakukan kajian terhadap unjuk kerja PLTH melalui sistem pemodelan dengan perangkat lunak Simulink Matlab diantaranya :

- Pemodelan PLTS, PLTB dan PLTH panel surya dan turbin angin untuk mengetahui tingkat efisiensi masing – masing pembangkit tenaga listrik tersebut diatas. Hasil simulasi memperlihatkan PLTH panel surya dan turbin angin lebih efisien dan andal jika dibandingkan PLTS dan PLTB yang beroperasi secara terpisah [11].
- Pemodelan PLTH panel surya dan turbin angin yang mengkaji pengaruh perubahan iradiasi matahari, temperatur dan kecepatan angin. Berdasarkan hasil

simulasi memperlihatkan bahwa penurunan iradiasi akan berdampak pada penurunan daya keluaran panel surya, begitu pula dengan peningkatan temperature akan mengakibatkan daya arus dan daya keluaran panel surya mengalami penurunan. Pada kasus penurunan kecepatan angin akan mengakibatkan penurunan kecepatan putaran generator dan daya keluaran turbin angin [12].

- Pemodelan PLTH panel surya dan turbin angin dengan generator sinkron magnet permanen (PMSG) dengan sistem on-grid. Sejumlah model peralatan control dan converter digunakan dalam pemodelan ini seperti rectifier untuk menyearahkan tegangan keluaran turbin angin, MPPT untuk memaksimalkan daya keluaran, boost converter untuk menaikkan tegangan ke tingkat tegangan DC bus, dan inverter untuk mengubah tegangan DC ke AC agar terhubung ke sistem grid. Hasil simulasi memperlihatkan keandalan sistem on grid meskipun salah satu komponen PLTH tidak beroperasi ataupun terjadinya perubahan kecepatan pada turbin angin [13].

Penelitian dengan sistem rancang bangun dan pengujian unjuk kerja PLTH panel surya dan turbin angin dilakukan untuk pengujian efisiensi PLTH jika dibandingkan dengan pengoperasian PLTS dan PLTB secara terpisah. Hasil pengujian memperlihatkan dengan sistem PLTH panel surya – turbin angin menghasilkan efisiensi yang jauh lebih tinggi dibandingkan jika PLTS dan PLTB beroperasi secara terpisah atau sendiri-sendiri [14].

III. METODE PENELITIAN

Desain PLTH hibrid panel surya dan turbin angin memerlukan data-data berupa : insolation (*incoming solar radiation*) yaitu radiasi surya yang dapat diterima dipermukaan bumi, kecepatan angin dan kebutuhan energi listrik di tempat lokasi riset. Data – data tersebut digunakan untuk menggali potensi energi surya dan energi angin, sehingga dapat ditentukan lama penyinaran maksimum surya (*Peak Sun Hours*) dan kecepatan nominal turbin angin. Data kebutuhan energi listrik berupa daya listrik mesin pembuat es batu, pompa air listrik dan penerangan digunakan sebagai dasar untuk menentukan rancangan kapasitas panel surya dan turbin angin. Metode riset diawali dengan pengambilan dan pengamatan data-data riset berupa : data insolation tahunan, kecepatan angin tahunan dan data kebutuhan energi listrik. Berdasarkan data-data tersebut diatas, dapat ditentukan nilai *peak sun hours*, kecepatan nominal angin dan kebutuhan energi listrik. Selanjutnya dapat ditentukan alokasi pembebanan panel surya dan turbin angin dengan mempertimbangkan ketersediaan potensi energi surya dan energi angin. Tahapan berikutnya adalah menentukan kapasitas panel surya, jumlah modul PV, tegangan bus DC , jumlah string PV, kapasitas tegangan kontrol, kapasitas maksimum pengisian baterai, jumlah konfigurasi grup array PV, dan simulasi melalui pemodelan panel surya untuk mengetahui unjuk kerja sistem panel surya. Tahapan penentuan kapasitas turbin angin meliputi perhitungan radius bilah rotor , luas sapuan rotor turbin angin , dan simulasi melalui pemodelan turbin angin untuk mengetahui unjuk kerja sistem turbin angin. Desain pembangkit listrik hibrid dilakukan dengan menggabungkan panel surya dan turbin angin melalui bus DC dan inverter. Tahapan akhir adalah melakukan pemodelan pembangkit listrik tenaga hibrid untuk mengetahui unjuk kerja sistem tersebut.

A. Panel Surya

Panel surya sering dikenal sebagai pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) yang berfungsi untuk mengubah energi surya menjadi energi listrik. Panel surya terdiri dari modul – modul *Photovoltaic* (PV) yang disusun dengan konfigurasi seri, paralel dan kombinasi membentuk array PV. Modul surya sendiri terdiri dari sejumlah sel – sel surya yang disusun secara seri dalam sebuah *frame*. Ada dua jenis modul surya yaitu *Monocrystalline* dan *Polycrystalline*. Untuk mendesain panel surya ini , hal terpenting adalah menentukan kebutuhan energi listrik dan lama penyinaran maksimum surya (*Peak Sun Hours*) yang didasarkan dari data insolation tahunan. *Peak Sun Hours* (PSH) dapat ditentukan sebagai berikut :

$$PSH = \frac{\text{Insolation (watt Hours/m}^2\text{)}}{\text{Iradiasi (watt /m}^2\text{)}} \text{ (hours)} \quad (1)$$

Untuk menentukan produksi energi listrik dari panel surya E_{pv} , perlu diketahui terlebih dahulu kebutuhan energi listrik beban E_{load} . Besarnya energi listrik yang diproduksi panel surya ditentukan dengan persamaan berikut ini :

$$E_{pv} = 1,3 \times E_{Load} \quad (2)$$

Kapasitas sistem PV dihitung sebagai berikut :

$$\text{Kapasitas sistem PV} = \frac{E_{pv}}{PSH} \quad (3)$$

Jumlah modul PV yang diperlukan dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$\text{Jumlah Modul} = \frac{\text{Kapasitas sistem PV}}{\text{Kapasitas modul PV}} \quad (4)$$

Tegangan keluar sistem operasi PV dapat ditentukan dengan cara merangkai secara seri modul PV. Jumlah modul PV seri adalah :

$$N_{PV_seri} = \frac{\text{Tegangan sistem PV}}{\text{Tegangan modul PV}} \quad (5)$$

Jumlah String panel PV adalah :

$$N_{PV_string} = \frac{\text{Jumlah total Modul PV sistem}}{\text{Jumlah Modul terhubung seri}} \quad (6)$$

Dengan demikian dapat ditentukan jumlah kebutuhan modul PV sebagai berikut :

$$N_{PV} = N_{PV_seri} \times N_{PV_string} \quad (7)$$

Kontroler PV panel berfungsi untuk mengatur sistem pengisian arus listrik baterai. Kapasitas arus maksimal dapat ditentukan sebagai berikut :

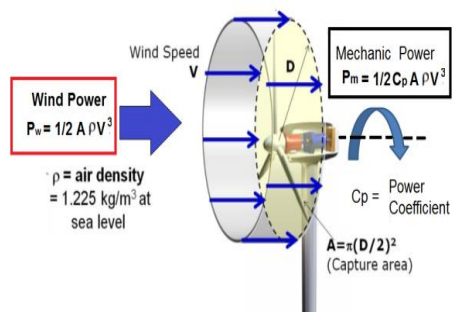
$$I_{\text{max_controller}} = 1,25 \times I_{sc_PV\text{modul}} \quad (8)$$

Dengan $I_{sc_PV\text{modul}}$ adalah arus hubung singkat modul PV

B. Turbin Angin

Turbin angin atau dikenal sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) , berfungsi untuk mengubah energi

kinetik angin menjadi energi listrik. Komponen – komponen utama terdiri atas bilah, rotor turbin dan generator listrik. Ada dua proses konversi energi yaitu energi kinetik angin menjadi energi mekanik putaran dan energi mekanik putaran menjadi energi listrik. Dalam merancang turbin angin, hal terpenting adalah besarnya kecepatan angin yang tersedia di suatu daerah, hal ini disebabkan antara satu daerah dengan daerah lain memiliki karakteristik kecepatan angin yang berbeda-beda.



Gambar 1. Prinsip kerja turbin angin

Daya Angin yang masuk ke area luas tangkapan rotor turbin angin adalah:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (9)$$

Besarnya daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin sangat tergantung pada koefisien daya C_p .

$$P_m = C_p \times P_w \quad (10)$$

Daya listrik yang dihasilkan oleh turbin angin bergantung pada efisiensi generator

$$P_e = \eta \times P_m \quad (11)$$

Keterangan:

P_w = Daya angin (watt)
 ρ = Kerapatan udara ($1,225 \text{ kg/m}^3$)
 A = Luas area sapuan (m^2)
 V = Kecepatan angin (m/s)
 C_p = Koefisien daya
 P_m = Daya mekanik (watt)
 P_e = Daya listrik (watt)

C. PLTH Hibrid

PLTH hibrid ini merupakan gabungan dari panel surya dan turbin angin. PLTH seperti ini memiliki keunggulan dibandingkan penggunaan PLTS sendiri, karena energi angin dapat diperoleh juga pada malam hari. Keberadaan turbin angin akan membantu meningkatkan keandalan sistem penyediaan daya listrik.

D. Baterie

Baterie sangat diperlukan untuk sistem pembangkit PLTH jenis *Standalone (off grid)*, karena berguna untuk menyimpan hasil produksi energi listrik. Untuk menghitung kapasitas baterai yang diperlukan dalam sistem PLTH menggunakan persamaan berikut ini:

$$\text{Kapasitas baterai} = \frac{E_{bat}}{\eta_{bat} \times V \times DOD} \times N_A \quad (\text{AH}) \quad (12)$$

Dengan :

E_{bat} = Energi baterai harian (Wh)
 V = Sistem Tegangan baterai (volt)
 DOD = Depth of Discharge
 N_A = Jumlah hari otonomi (hari)
 η_{bat} = Efisiensi baterai (0,8 – 0,95)

Untuk meningkatkan tegangan sistem, maka baterai dihubungkan secara seri, jumlah baterai terhubung seri adalah :

$$N_{bat_seri} = \frac{V_{dc \text{ sistem}}}{V_{dc(\text{individu baterai})}} \quad (13)$$

Untuk meningkatkan kapasitas sistem baterai, maka rangkaian baterai dihubungkan secara paralel.

$$N_{bat_paralel} = \frac{\text{Kapasitas total sistem}}{\text{kapasitas individu baterai}} \quad (14)$$

Untuk mengubah tegangan DC baterai ke AC digunakan inverter. Kapasitas inverter umumnya adalah 125% dari beban puncak untuk faktor keamanan.

$$\text{Kapasitas Inverter} = 1,25 \times \text{Peak load} \quad (15)$$

E. Data –Data Riset

Data – data insolation dan kecepatan angin tahunan didapat dari NASA Surface Meteorology and solar energy database, (2022) dengan menitik koordinatkan obyek penelitian di Pelabuhan Perikanan Pantai (PPP) Morodemak. Berdasarkan pengambilan data – data tersebut diatas diperoleh hasil data insolation dan kecepatan angin tahunan yang bervariasi seperti diperlihatkan dalam tabel 1.

Tabel 1.

DATA – DATA INSOLATION DAN KECEPATAN ANGIN		
Bulan	Insolation (kWh/m ² /hari)	Kecepatan Angin (m/s)
Januari	4,22	4,12
Februari	4,53	4,25
Maret	5,43	3,11
April	5,52	3,38
Mei	5,50	4,79
Juni	5,27	5,47
Juli	5,73	6,20
Agustus	6,41	6,13
September	6,80	5,12
Oktober	6,40	3,91
November	5,33	3,34
Desember	4,61	3,21

III.HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kebutuhan Energi Listrik

Energi listrik diperuntukkan untuk memenuhi kebutuhan satu unit mesin pembuat es batu, pompa air listrik dan penerangan.

Tabel 2.

KEBUTUHAN ENERGI LISTRIK

Peralatan listrik	Daya listrik (watt)	W aktu Operasi (jam)	Energi Listrik (kWh/hari)
Mesin Pembuat es batu	8800	24	211,2
Pompa air 1 HP (Effisiensi 80%)	932,5	5	4,663
Penerangan	1000	24	24

Berdasarkan tabel 2 dapat dihitung konsumsi daya listrik mencapai 10,733 kW dengan kebutuhan energi listrik sebesar 239,863 kWh/hari.

B. Potensi Energi Surya dan Angin

Berdasarkan data pada tabel 1 terlihat bahwa insolation tahunan berkisar antara 4,22 sampai dengan 6,8 kWh/m²/hari, oleh karena itu diambil nilai yang terendah yaitu 4,22 kWh/m²/hari agar menjamin produksi energi listrik dapat terpenuhi sepanjang tahun.

Potensi energi angin berkisar antara 3,11 m/s sampai 6,2 m/s. Agar turbin angin dapat memproduksi energi listrik sepanjang tahun, maka desain turbin angin diambil untuk kecepatan angin terendah yaitu 3,11 m/s. Kecepatan ini dianggap sebagai kecepatan nominal turbin angin. Memperhatikan data-data kecepatan angin yang relatif rendah, maka potensi terbesar berasal dari energi surya. Berdasarkan hal tersebut maka panel surya dirancang untuk memenuhi kebutuhan utama energi listrik, sedangkan energi angin digunakan sebagai energi listrik tambahan. Alokasi pembebanan PLTH terdiri atas pembebanan panel surya dan turbin angin. Panel surya digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik utama sebesar 239,863 kWh/hari. Turbin angin digunakan untuk menyediakan energi listrik tambahan lainnya dengan kapasitas yang direncanakan sebesar 3000 watt, hal ini didasarkan pada pertimbangan potensi energi angin yang cukup rendah.

Tabel 3

ALOKASI PEMBEBANAN PANEL SURYA DAN TURBIN ANGIN

Pembangkit listrik	Produksi energi listrik (kWh/hari)
Panel Surya	239,863
Turbin angin	72
Hibrid (gabungan)	311,863

Jika diasumsikan turbin angin beroperasi 24 jam, maka dihasilkan energi listrik berasal dari turbin angin sebesar 72 kWh/hari. Tabel 3 memperlihatkan alokasi pembebanan panel surya dan turbin angin.

A. Desain Panel Surya

Energi yang diproduksi panel surya :

$$E_{PV} = 1,3 \times 239,863 \text{ kWh /hari} = 311,82 \text{ kWh/hari}$$

Peak Sun Hours adalah :

$$PSH = \frac{4220 \text{ Wh/m}^2}{1000 \text{ w/m}^2} = 4,22 \text{ jam}$$

Kapasitas panel surya dihitung sebagai berikut :

$$\text{Kapasitas sistem PV} = \frac{311,82}{4,22} = 73,89 \text{ kW}$$

Kapasitas modul PV yang direncanakan adalah 500 watt dengan spesifikasi diperlihatkan pada tabel 4.

Tabel 4.
SPESIFIKASI MODUL PV

Parameter	Rating
Daya Maksimum	500 watt
Tegangan Maksimum	48,63 volt
Arus Maksimum	10,28 Ampere
Arus hubung singkat	10,87 Ampere
Tegangan terbuka	59,01 volt
Effisiensi	19,51 %

Jumlah modul PV yang diperlukan adalah :

$$\text{Jumlah Modul} = \frac{73,89 \times 1000}{500} = 148 \text{ modul}$$

Tegangan bus DC yang direncanakan adalah :

$$V_{PV} = 3 \times 48,63 = 145,89 \text{ volt}$$

Hal ini berarti 3 buah modul surya dihubungkan seri untuk memenuhi besarnya tegangan bus DC tersebut.

Jumlah PV string adalah :

$$\text{Jumlah PV string} = \frac{148}{3} = 49,34$$

Nilai tersebut dibulatkan sehingga jumlah PV string menjadi 50 string. Sebelum menentukan konfigurasi susunan PV array, maka dipilih terlebih dahulu kapasitas kontroler MPPT yang terdapat dipasaran.

Kapasitas tegangan kontroler dihitung sebagai berikut :

$$V_{control} =$$

$$1,25 \times V_{oc_PV\text{modul}} \times \text{jumlah modul seri}$$

$$V_{control} = 1,25 \times 59,01 \times 3 = 221,3 \text{ volt}$$

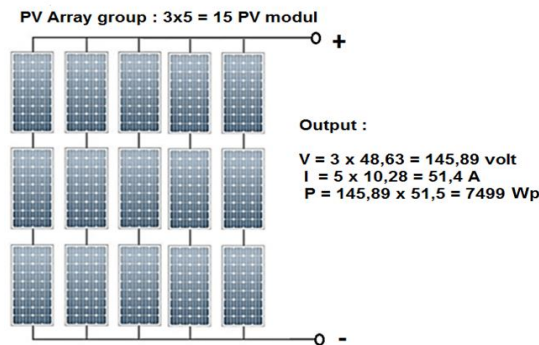
Dengan demikian dipilih kontroler MPPT pengisian baterai 250 volt, 70 Ampere. Untuk menentukan konfigurasi array PV agar tidak melebihi kapasitas arus pengisian baterai, maka sistem array harus dibagi menjadi beberapa grup PV. Setiap grup PV terdiri atas beberapa string PV dengan arus total keluaran grup PV tersebut tidak melebihi kapasitas kontroler. Berdasarkan hal tersebut maka batasan limit maksimum arus pengisian baterai dijadikan acuan untuk penentuan jumlah string PV dalam setiap grup PV array.

Kapasitas maksimum untuk arus pengisian (name plate of controller) adalah 70 Ampere.

$$I_{\max_control} = 1,25 \times I_{sc_PV\text{modul}} \times \text{jumlah string}$$

$$\text{Jumlah string} = \frac{70}{10,87 \times 1,25} = 5,15 = 5$$

Jadi satu buah kontroler melayani 5 buah string.
Setiap grup array akan terdiri dari : $3 \times 5 = 15$ buah modul PV
Jumlah total modul PV = 148 buah
Jumlah grup array : $148/15 = 9,87$, dibulatkan menjadi 10
buah grup array, dengan demikian jumlah modul PV yang
diperlukan dalam desain ini perlu ditambah menjadi : 15×10
= 150 buah modul PV, hal ini dilakukan agar tegangan bus DC
setiap string sama besar yaitu 145,89 volt



Gambar 2. Desain group PV array 3 x 5 modul PV

Tegangan keluaran panel surya adalah : 145,89 volt

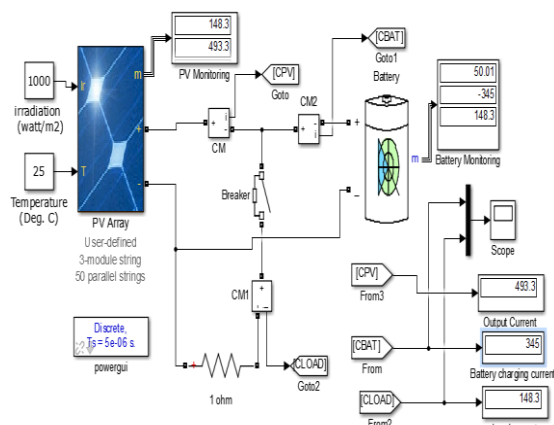
Arus keluaran panel surya adalah

$$I_{pv} = 10 \times 51,4 = 514 \text{ A}$$

Total Daya keluaran sistem PV adalah

$$P_{PV} = 10 \times 7499 = 74990 \text{ Watt.} = 75 \text{ kW.}$$

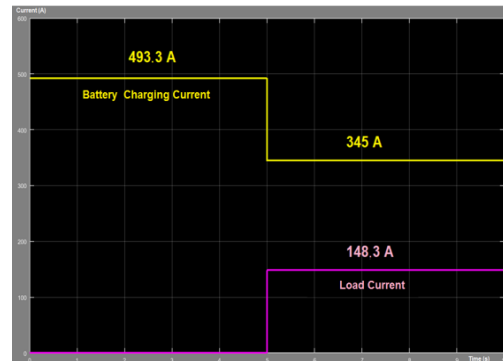
Berdasarkan hasil – hasil perhitungan tersebut diatas maka desain panel surya terdiri atas 150 modul PV yang terbagi atas 10 array PV. Setiap array PV terdiri atas 15 buah modul PV yang terbagi atas 5 buah string, dan setiap string terdiri atas 3 buah modul PV terhubung seri. Jadi panel surya memiliki jumlah 50 string PV. Kapasitas panel surya adalah 75 kW dengan arus keluaran maksimum mencapai 514 A. Untuk mengetahui kinerja panel surya dilakukan dengan pemodelan panel surya melalui simulink-Matlab, seperti diperlihatkan dalam gambar 3.



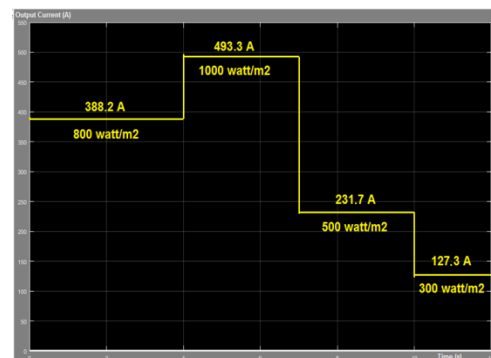
Gambar 3. Pemodelan dan pengujian panel surya

Skenario pengujian pertama adalah pengujian dengan iradiasi standar 1000 watt/m² dan temperatur standar 25°C. Pengujian dilakukan dalam keadaan tanpa beban dan dalam keadaan berbeban.

Berdasarkan hasil simulasi terlihat bahwa pada kondisi tanpa beban, arus yang diproduksi panel surya sebesar 493,3 A, seluruhnya dikirimkan ke baterai. Pada saat dilakukan pembebanan dengan $R_{load} = 1 \text{ ohm}$, arus yang diproduksi oleh panel surya terbagi atas arus pengisian baterai sebesar 345 A, dan arus yang ditarik beban sebesar 148,3 A , seperti diperlihatkan dalam gambar 4.



Gambar 4. Grafik perubahan beban panel surya terhadap arus pengisian baterai



Gambar 5. Grafik perubahan iradiasi panel surya terhadap arus keluaran panel surya

Skenario kedua adalah pengujian dengan cara mengubah-ubah tingkat iradiasi yaitu : 800 watt/m², 1000 watt/m², 500 watt/m² dan 300 watt/m². Hasil simulasi memperlihatkan bahwa perubahan iradiasi secara signifikan mempengaruhi arus keluaran panel surya, seperti diperlihatkan dalam gambar 5. Terlihat bahwa terjadi perubahan arus keluaran panel PV yaitu : 388,2 A (800 watt/m²), 493,3 A (1000 watt/m²), 231,7 A (500 watt/m²), dan 127,3 A (300 watt/m²).

B. Desain Turbin Angin

Alokasi kapasitas turbin angin adalah 3000 watt. Memperhatikan kecepatan angin yang rendah, maka dengan kapasitas 3000 watt memerlukan bilah turbin berukuran besar. Berdasarkan hal tersebut, maka dalam desain ini digunakan turbin angin 100 watt, sehingga jumlah turbin angin adalah :

$$N_{WT} = \frac{3000}{100} = 30 \text{ buah turbin angin}$$

Jika efisiensi turbin angin diasumsikan 0,9 , maka daya mekanik turbin angin adalah :

$$P_m = \frac{100}{0,9} = 111 \text{ watt}$$

Desain turbin angin merupakan turbin sumbu horizontal dengan jumlah bilah (*blade*) sebanyak 3 buah. Dimensi radius bilah ditentukan sebagai berikut

$$R = \sqrt{\frac{2 P_m}{C_p \pi \rho V^3}} = \sqrt{\frac{2 (111)}{0,48 \pi (1,225)(3,11)^3}} = 2 \text{ meter}$$

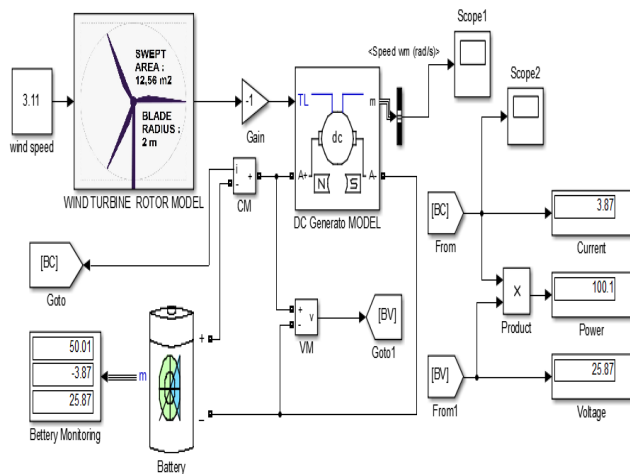
Diameter rotor turbin $D = 2 \times 2 = 4 \text{ m}^2$

Luas sapuan turbin angin :

$$A = \left(\frac{D}{2}\right)^2 \pi = \left(\frac{4}{2}\right)^2 \pi = 12,56 \text{ m}^2$$

Kecepatan sudut angular rotor pada kecepatan angin konstan 3.11 meter/detik untuk tip ratio $\lambda = 8,1$:

$$\omega = \frac{\lambda V}{R} = \frac{8,1(3,11)}{2} = 12,595 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

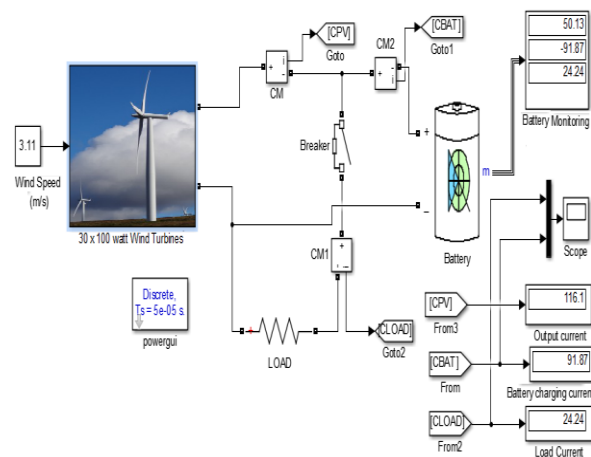


Gambar 6. Model turbin angin 100 watt

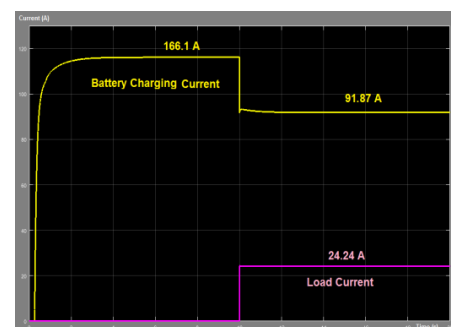
Untuk mengetahui unjuk kerja desain turbin 100 watt dilakukan simulasi melalui pemodelan turbin angin seperti diperlihatkan dalam gambar 6. Hasil pengujian memperlihatkan turbin angin mampu menghasilkan daya 100,1 watt, dan arus keluaran 3,87A pada kecepatan angin 3,11 m/s.

C. Pengujian Desain Turbin Angin 3000 Watt

Untuk mengetahui kinerja turbin angin 3000 watt, maka dilakukan pemodelan sistem seperti diperlihatkan dalam gambar 7. Skenario pengujian pertama adalah turbin angin beroperasi tanpa beban untuk beberapa saat, setelah itu sebuah beban dihubungkan paralel dengan batere. Berdasarkan hasil simulasi terlihat bahwa pada kondisi tanpa beban, turbin angin menghasilkan arus 116,1 A pada tegangan 24,24 volt. Arus tersebut seluruhnya dikirimkan untuk pengisian batere. Pada saat turbin angin diberikan beban $R_{load} = 1 \text{ ohm}$, arus pengisian turun menjadi 91,87 A, karena beban menarik arus sebesar 24,24 A, seperti diperlihatkan pada gambar 8.

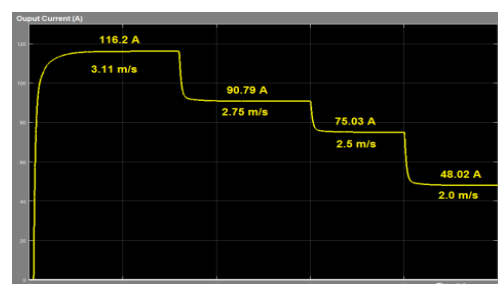


Gambar 7. Model turbin angin 3000 watt



Gambar 8. Grafik perubahan beban turbin angin terhadap arus pengisian batere

Skenario kedua adalah dengan mengubah-ubah kecepatan angin dari 3,11 m/s, 2,75 m/s, 2,5 m/s dan 2 m/s. Berdasarkan hasil simulasi terlihat bahwa arus mengalami penurunan masing – masing dari 116,2 A, 90,79A, 75,03 A dan 48,02 A, seperti diperlihatkan dalam gambar 9.



Gambar 9. Grafik perubahan kecepatan angin terhadap arus keluaran turbin angin.

Dengan demikian jelas bahwa perubahan kecepatan angin secara signifikan mempengaruhi arus keluaran turbin angin

F. Kapasitas Batere

Kapasitas batere ditentukan berdasarkan kapasitas total produksi energi listrik yang bersumber dari panel surya dan turbin angin

Energi panel surya :

$$E_{PV} = 1,3 \times 239,863 \text{ kWh /hari} = 311,82 \text{ kWh/hari}$$

Energi turbin angin :

$$E_{WT} = 1,3 \times 72 \text{ kWh/hari} = 61,93 \text{ kWh/hari}$$

$$\text{Total Energi batere} = 311,82 + 93.6 = 405,4 \text{ kWh/hari}$$

Tegangan Batere Sistem PLTH direncanakan 144 Volt
Kapasitas per unit batere : 400 AH, 12 volt, dengan asumsi
DOD = 70%

Kebutuhan energi listrik : 405,4 kWh
Hari otonomi N_A diasumsikan 1 hari.

$$\text{Kapasitas batere} = \frac{405400}{144 \times 0,7} \times 1 = 4022 \text{ AH}$$

Jumlah batere terhubung seri :

$$\frac{\text{Tegangan sistem}}{\text{Tegangan individu batere}} = \frac{144}{12} = 12 \text{ buah}$$

Jumlah batere terhubung paralel :

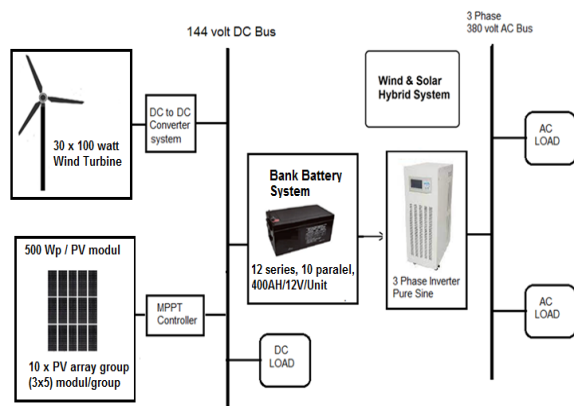
$$\frac{\text{Kapasitas total sistem}}{\text{kapasitas individu batere}} = \frac{4022}{400} = 10,06 = 10 \text{ buah}$$

Jadi total kebutuhan batere adalah :

$$12 \times 10 = 120 \text{ buah}$$

G. Desain dan Pengujian PLTH Hibrid

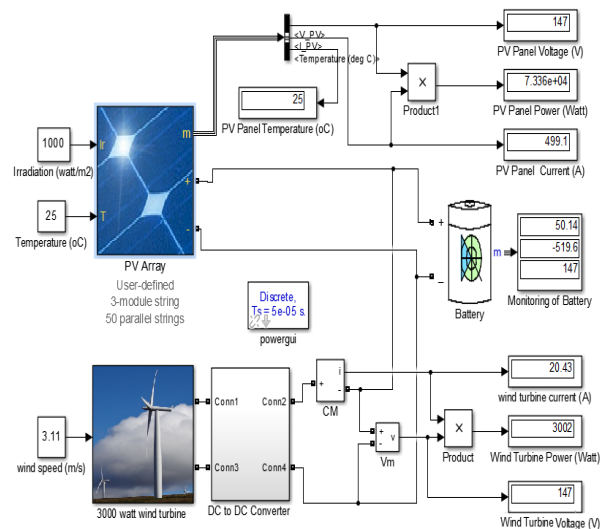
Hasil akhir rancangan PLTH hibrid adalah dengan menggabungkan panel surya dan turbin angin melalui DC bus 144 Volt. Panel surya dapat secara langsung dihubungkan ke DC bus, karena tegangan keluarannya dapat mencapai 147 volt. Pada turbin angin diperlukan rangkaian untuk menaikkan tegangan menjadi 144 volt dengan menggunakan DC – DC converter. Selanjutnya Bus DC ini dihubungkan dengan batere untuk menyimpan energi listrik. Untuk melayani beban – beban AC, maka tegangan batere diubah menjadi tegangan AC melalui inverter 3 fasa, sehingga dihasilkan tegangan AC 380/220 volt. Gambar 10 memperlihatkan skema desain PLTH hibrid. Untuk mengetahui unjuk kerja PLTH ini, maka dilakukan simulasi melalui pemodelan PLTH hibrid dengan menggabungkan model panel surya dan turbin angin seperti diperlihatkan dalam gambar 11.



Gambar 10. Desain PLTH panel surya dan turbin angin

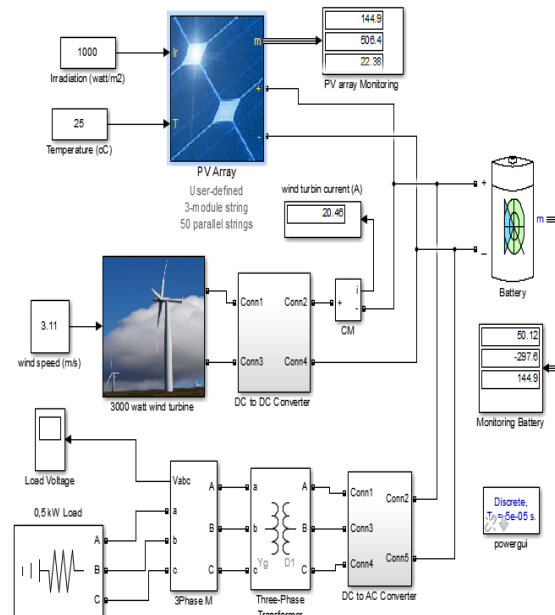
Pengujian dilakukan pada kondisi standar dengan iradiasi 1000 watt/m² pada temperatur sel surya 25°C. dan turbin angin dengan kecepatan nominal 3,11 m/s. Hasil pengujian seperti terlihat dalam gambar 12 yang memperlihatkan bahwa arus keluaran panel surya 499,1 A dan turbin angin 20,43 A, sehingga arus pengisian batere menjadi 519,6 A. Daya turbin pada kecepatan nominal adalah : 3002 Watt (desain 3000 watt),

dan daya keluaran panel surya adalah 73,36 kW (desain 75 kW).



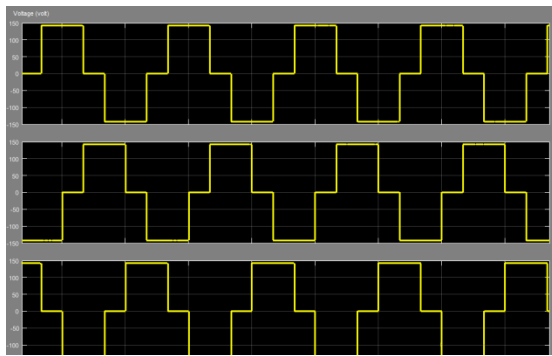
Gambar 11. Pemodelan dan pengujian PLTH

Untuk melayani beban AC, maka tegangan 147 volt DC batere diubah melalui inverter 3 fasa (*DC to AC Converter*), kemudian dinaikkan oleh transformator penaik tegangan (*step up transformer*) ke tingkat tegangan 380 volt. Gambar 12 memperlihatkan model rangkaian simulasi tersebut.

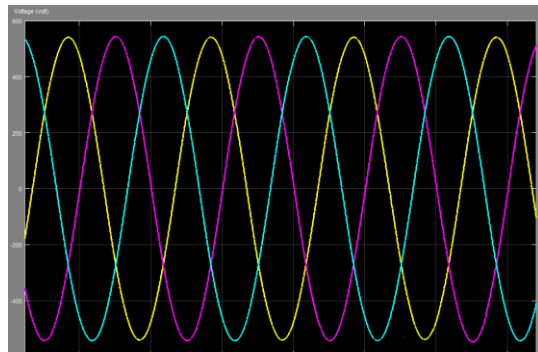


Gambar 12. Model PLTH Hibrid dengan keluaran tegangan AC

Hasil simulasi memperlihatkan bentuk keluaran tegangan inverter merupakan gelombang tegangan AC kotak, seperti diperlihatkan dalam gambar 13, oleh sebab itu diperlukan filter agar bentuk tegangan menjadi sinusoida murni. sebelum tegangan dinaikkan oleh transformator penaik tegangan ke tingkat tegangan 380 volt.



Gambar 13. Bentuk tegangan AC keluaran inverter 3 fasa



Gambar 14. Bentuk tegangan AC keluaran transformator

Pada gambar 14 memperlihatkan bentuk gelombang sinusoida murni keluaran dari transformator. Tegangan rms adalah 380 volt sedangkan tegangan maksimumnya antar fasa adalah $\sqrt{3} \times 380 = 658$ volt.

IV. KESIMPULAN

Kebutuhan energi listrik untuk mesin pembuat es batu, pompa air listrik dan panel mencapai 239,863 kWh/hari. Berdasarkan pertimbangan potensi energi surya dan energi angin yang ada, maka alokasi pembebanan utama bertumpu pada panel surya, sedangkan turbin angin digunakan untuk menyediakan energi listrik tambahan. Kapasitas desain panel surya adalah 75 kW, sedangkan turbin angin 3000 watt. Desain panel surya terdiri atas 150 buah modul PV (kapasitas per modul PV 500 Wp), yang dibagi menjadi 10 grup array PV. Setiap grup array PV terdapat 15 modul PV yang tersusun atas 5 buah string, dan setiap string terdiri atas 3 modul PV terhubung seri. Panel surya memiliki kapasitas 75 kW, dengan arus keluaran maksimum 514 A dan tegangan DC 145,89 volt. Desain turbin angin adalah 3000 watt, yang terdiri atas 30 buah turbin angin berkapasitas 100 watt. Desain PLTH dilakukan dengan menggabungkan panel surya dan turbin angin melalui bus DC 144 volt yang terhubung dengan baterai untuk menyimpan energi listrik. Tegangan DC ini diubah melalui inverter guna menghasilkan tegangan AC 380 volt. Hasil pengujian melalui pemodelan sistem memperlihatkan bahwa arus keluaran panel surya 499,1 A, dan turbin angin 20,43 A, dengan demikian keluaran PLTH mencapai 519,5 A. Tegangan keluaran 147 volt. Daya keluaran panel surya adalah 73,36 kW, dan turbin angin 3002 watt.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Pradityo, B. Winardi, A. Nugroho, "Evaluasi dan Optimasi Sistem Off Grid Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid (PLTH) Bayu Baru, Bantul, D.I. Yogyakarta," *Transient*, Vol.4, No. 3, September 2015.
- [2] D.sukma, W. Sunanda, R. F. Gusa, "Pemodelan Sistem Pembangkit Listrik Hibrid Diesel Generator Dan Photovoltaic Array Menggunakan Perangkat Lunak Homer (Studi Kasus di Pulau Semujur Kabupaten Bangka Tengah)," *Jurnal Ecotipe*, Volume2, Nomor 2, Oktober 2015.
- [3] A. Suherman, W. T. Priane, A. Salmah, R. Rosdianyah, "Studi kelayakan pembangkit listrik tenaga hibrida di Pulau Panjang," *Gravity, Jurnal Ilmiah Penelitian dan Pembelajaran Fisika.*, vol. 3, no. 1, 2017.
- [4] O.A. Jaya, H. S. Kolibu, V. A. Suoth, "Desain Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Diesel Generator - PV Menggunakan Software Homer (Studi Kasus : KM Barcelona 1 di Pelabuhan Manado) " *Jurnal Mipa Unsrat Online* , 8 (2) 63-66, Agustus 2019.
- [5] L. Sinaga, Hermawan, A. Nugroho, "Optimasi Sistem Pembangkit Listrik Hibrida Tenaga Surya, Angin, Biomassa, dan Diesel Di Pulau Nyamuk Karimunjawa Jawa Tengah Dengan Menggunakan Perangkat Lunak," *Transient*, Vol.4, No. 4, Desember 2015.
- [6] Kunaifi, "Program Homer Untuk Studi Kelayakan Pembangkit Listrik Hibrida di Provinsi Riau," *Seminar Nasional Informatika, UPN Veteran* , Mei 2010.
- [7] A. N. Azizah, S. Purbawanto, "Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid (PV dan Mikrohidro) Terhubung Grid (Studi Kasus : Desa Merden, Kecamatan Padureso, Kebumen) " *Jurnal Listrik, Instrumentasi dan Elektronika Terapan*, Vol. 2, No. 1, April 2021.
- [8] R. sahu, B.Das, R.R. Sabat, M. K. Swain (2013), "Hybrid Power Model Of Renewable Energy Sources For On Grid Power Supply", *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering* , Vol.2, November 2013.
- [9] G.A. Setia, Sutriyadi, N. Winanti, F. Haz, H.R. Iskandar, "Desain Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (Solar Cell dan Wind Turbine) untuk Beban Perumahan, "Esilon , *Journal of Electrical Engineering and Information Technology*, Vol. 19. No. 2, pp. 33-39, Agustus 2021.
- [10] S. Saodah,, R. Amalia "Perancangan Pembangkit Hibrid Angin-Surya Di Desa Parangtritis Yogyakarta," *Jurnal Teknik Energi*. Vol 3 No. 2 ,Oktober 2013.
- [11] A. Rana, M. Ilyas, "Implementation of a Wind/PV Hybrid Using Matlab Simulink, " *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*", Vol. 4, Issue 7 pp.5941-5948, July 2015.
- [12] M. Y. Allani, M. Jomaa, D. Mezghani, A. Mami "Modelling and Simulation of the hybrid sistem PVWind with Matlab/Simulink", *The 9th International Renewable Energy Congress*, (IREC 2018).
- [13] T. A. Cardoso, R.R. Riehl, " Modeling and Simulation of Hybrid PV/Wind Distributed Generation Sistem Under Different Power Input Scenarios," *The 12th Latin American Congress on Electricity Generation and Transmission*, Clagtee ,2017.
- [14] D. Hidayanti, G. Dewangga, P. Yoreniko, " Rancang Bangun Pembangkit Hibrid Tenaga Angin dan Surya Dengan Penggerak Otomatis Pada Panel Surya," *Eksergi Jurnal Teknik Energi* Vol 15 No. 3, pp. 93-101, September 2019