

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Penelitian yang dilakukan penulis dalam pelaksanaannya memanfaatkan tulisan-tulisan/penelitian yang berhubungan dengan judul yang diambil sebagai referensi dan bahan pertimbangan penulis dalam penyelesaian tugas akhir, dan berikut adalah beberapa hasil penelitian yang dimanfaatkan penulis :

1. Penelitian yang pernah dilakukan dengan judul Evaluasi dan Optimasi Sistem *Off-Grid* Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid* (PLTH) Bayu Baru, Bantul, D.I. Yogyakarta menyimpulkan bahwa dengan kapasitas 90kW dan dengan potensi energi matahari dan kecepatan angin yang ada, melalui *software* Homer PLTH Bayu Baru dapat menghasilkan energi listrik maksimal sebesar 100.395kWh/tahun. (Pradityo, 2015).
2. Dalam penelitian dengan judul yang sama dengan poin satu diperoleh kesimpulan bahwa kinerja turbin angin PLTH Bayu Baru melalui pengukuran secara langsung dilapangan dan perhitungan terhadap keluaran turbin angin pada PLTH Bayu Baru, pada kecepatan angin rata-rata 5.54 m/s, turbin angin 1kW/240V menghasilkan efisiensi rata-rata 32,29%, turbin angin 2kW/240V menghasilkan efisiensi rata-rata 21.68%, sedangkan kinerja panel surya PLTH Bayu Baru melalui pengukuran daya keluaran secara langsung dari terbit matahari hingga terbenamnya matahari, hasilnya untuk PV 10kW/48V mempunyai daya puncak dengan efisiensi 7.35%, PV 4kW/240V mempunyai daya puncak dengan efisiensi 5.33%. (Pradityo, 2015).
3. Dalam penelitian yang berjudul Evaluasi dan Optimasi Ukuran Komponen Penyusun Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid* Sistem Inovasi Daerah Pantai Baru dalam hasil simulasinya mengatakan bahwa terjadi *capacity shortage* 80%. Daya yang bisa dihasilkan PLTH Baru adalah 20% untuk memenuhi beban dengan daya PV 20491 kWh/tahun dan daya kincir 8184 kWh/tahun. Kesimpulan lainnya yaitu Optimasi PLTH dengan *capacity shortage* 0%, *hourly loads* 0%, *solar power output* 0% bisa didapatkan dengan

menambahkan baterai. Kontribusi pv 98% dari daya yang dihasilkan PLTH. (Pakha, 2014).

4. Penelitian dan pengukuran dalam tulisan berjudul Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Surya sistem 48 V untuk Beban Warung Kuliner di Sekitar Area PLTH Pandansimo menyimpulkan bahwa efisiensi daya yang dihasilkan panel surya pada bulan Agustus 2016 berkisar antara 17.51%-31.99%. Pada persentase seperti ini daya yang dihasilkan oleh panel surya pada PLTS sistem 48 V bisa dikatakan buruk. Kesimpulan lain yang didapatkan yaitu Efisiensi daya digunakan pada beban warung kuliner pada bulan Agustus 2016 berkisar antara 35.37%-74.03%. Pada persentase seperti ini daya yang dihasilkan oleh panel surya pada PLTS sistem 48 V bisa dikatakan cukup baik. (Wijaya, 2017).

2.2. Dasar Teori

2.2.1. Energi Terbarukan

Dalam Perpres No. 5 Tahun 2006 disebutkan bahwa energi terbarukan adalah sumber energi yang dihasilkan dari sumberdaya energi yang secara alamiah tidak akan habis dan dapat berkelanjutan jika dikelola dengan baik, antara lain : panas bumi, biofuel, aliran air sungai, panas surya, angin, biomassa, biogas, ombak laut dan suhu kedalaman laut.

Dalam beberapa tahun kebelakang sekitar tahun 2010, energi terbarukan mulai dikembangkan oleh negara-negara maju maupun berkembang. Hal itu dilakukan atas dasar untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil (minyak bumi) yang saat ini ketersediaannya semakin berkurang, sehingga agar kebutuhan manusia akan energi dapat mulai digantikan oleh energi terbarukan.

Energi fosil masih menjadi pilihan dalam kehidupan sehari-hari karena kemudahan dalam mengaksesnya. Pada 2013 konsumsi energi final dalam negeri yang paling dominan adalah penggunaan bahan bakar minyak (BBM) yang meliputi avtur, avgas, bensin, minyak tanah, minyak

solar, minyak diesel, dan minyak bakar sebesar 43%, diikuti penggunaan batubara 19%, gas 14%, dan lainnya.

Indonesia mempunyai potensi beberapa energi terbarukan yang bisa dikembangkan untuk memasok kebutuhan listrik dalam skala yang besar, yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH), Biofuel dan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP). Namun dalam pengimplementasiannya, pembangunan dan pengembangan pembangkit-pembangkit tersebut mengalami kendala sehingga sampai saat ini keberadaannya belum bisa optimal dan berjalan sesuai harapan.

Pemerintah Indonesia telah berkomitmen untuk mengakselerasi pembangunan infrastruktur energi termasuk mengoptimalkan pengembangan energi terbarukan melalui Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2015-2019 dan alokasi Anggaran Pendapatan dan Belanja Negara (APBN).

Tabel 2.1. Kapasitas Total Terpasang Pembangkit (MW).

(sumber : *Dirjen Ketenagalistrikan Kementrian ESDM, Statistik Kelistrikan, 2015:2*)

Jenis Pembangkit		2013	2014	2015
1	PLTS	8.96 MW	8.96 MW	8.96 MW
2	PLTB	0.43 MW	0.43 MW	0.43 MW
3	PLTMH	11.87 MW	11.87 MW	11.87 MW
4	PLTP	570.00 MW	575.00 MW	575.00 MW
5	PLTM	30.70 MW	36.59 MW	36.99 MW

2.2.2. Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid* (PLTH)

Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid* adalah sebuah sistem pembangkit listrik yang umumnya menggabungkan dua buah sumber energi listrik yang kemudian dijadikan menjadi satu sistem pembangkit

Dari konfigurasi sistem PLTH diatas ada beberapa komponen yang digunakan dalam sistem, antara lain :

- a. *Photovoltaic Array* : komponen yang digunakan untuk mengubah energi panas matahari menjadi energi listrik. *PV array* adalah kumpulan beberapa modul PV yang dirangkai seri ataupun paralel. Jumlah dan besaran *output* tegangan dan arus disesuaikan dengan kebutuhan beban. Ada beberapa fakto yang memengaruhi kinerja *PV array* yaitu bahan pembuat PV, hambatan listrik beban, intensitas penyinaran matahari, suhu temperatur panel PV dan bayangan.
- b. *Wind Turbine* : kincir angin yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik. *Wind turbine* ini memanfaatkan angin untuk menggerakkan motor agar dapat berputar dan menghasilkan listrik.
- c. Generator : generator berfungsi sebagai pembangkit listrik cadangan ketika sistem PLTH antara PLST-PLTB tidak dapat menghasilkan listrik untuk memenuhi kebutuhan beban. Spesifikasi generator disesuaikan dengan kebutuhan beban untuk menghindari *low voltage*.
- d. *Photovoltaic Controller* : komponen ini digunakan untuk mengatur tegangan dari PV yang masuk ke baterai. *PV controller* bekerja dengan cara memutus tegangan masuk ke baterai agar baterai tidak mengalami *overvoltage* dan *overcharging*.
- e. *Wind Controller* : fungsi dari komponen ini ialah mencegah terjadinya kelebihan tegangan pada saat *wind turbine* sedang men-charge baterai. Pada saat baterai telah terisi penuh maka *wind controller* akan memutus aliran tegangan dari *wind turbine* ke baterai.
- f. *Diesel Controller* : komponen ini digunakan untuk mengontrol secara otomatis penggunaan bahan bakar untuk diesel yang disesuaikan dengan beban yang disuplai oleh diesel pada saat tegangan dari PLTH (PLTS-PLTB) tidak dapat memenuhi kebutuhan beban.
- g. *Battery Charger* : komponen ini merupakan salah satu komponen penting dalam sistem PLTH ini karena komponen ini berfungsi sebagai pengatur arus listrik yang masuk dari PV maupun arus listrik yang

keluar ke baterai, dan juga untuk menjaga baterai agar tidak mengalami *overcharge*.

- h. *Inverter / System Controller* : Tegangan dari PLTS-PLTB merupakan tegangan searah (DC) sehingga agar bisa disalurkan dan digunakan oleh beban, tegangan tersebut harus diubah menjadi tegangan bolak-balik (AC). Alat yang digunakan adalah *inverter*, *inverter* adalah rangkaian elektronika daya yang digunakan untuk mengkonversikan tegangan searah (DC) menjadi tegangan bolak-balik (AC).
- i. *House* (beban) : beban adalah peralatan yang membutuhkan aliran listrik agar dapat digunakan untuk kebutuhan rumah tangga atau industri.

2.2.2.2. Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid* (PLTH)

Cara kerja Pembangkit Listrik Sistem *Hybrid* Surya dengan Bayu tergantung dari bentuk beban atau fluktuasi pemakaian energi (*load profile*) yang mana selama 24 jam distribusi beban tidak merata untuk setiap waktunya.

Load profile ini sangat dipengaruhi penyediaan energinya. Untuk mengatasi permasalahan tersebut maka kombinasi sumber energi antara Sumber energi terbarukan dan Diesel Generator atau disebut Pembangkit Listrik Sistem *Hybrid* adalah salah satu solusi paling cocok untuk sistem pembangkitan yang terisolir dengan jaringan yang lebih besar seperti jaringan PLN.

Pada umumnya PLTH bekerja sesuai urutan sebagai berikut:

- a. Pada kondisi beban rendah, maka beban disuplai 100% dari baterai dan *PV array*, selama kondisi baterai masih penuh sehingga diesel tidak perlu beroperasi.
- b. Untuk beban diatas 75% beban *inverter* (tergantung *setting* parameter) atau kondisi baterai sudah kosong sampai level yang disyaratkan, diesel mulai beroperasi untuk mensuplai beban dan sebagian mengisi baterai sampai beban diesel mencapai 70- 80% kapasitasnya (tergantung *setting*

parameter). Pada kondisi ini *Hybrid Controller* bekerja sebagai *charger* (merubah tegangan AC dari generator menjadi tegangan DC) untuk mengisi baterai.

- c. Pada kondisi beban puncak baik diesel maupun *inverter* akan beroperasi dua-duanya untuk menuju paralel sistem apabila kapasitas terpasang diesel tidak mampu sampai beban puncak. Jika kapasitas *genset* (*generating set*) cukup untuk mensuplai beban puncak, maka *inverter* tidak akan beroperasi paralel dengan genset.

2.2.3. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya adalah salah satu sistem pembangkit energi terbarukan karena sumber energi yang digunakan berasal dari pemanfaatan panas matahari. Secara sederhana PLTS adalah sistem pembangkit yang mengubah energi panas matahari menjadi energi listrik. PLTS merupakan sistem pembangkit listrik yang ramah terhadap lingkungan karena dalam proses produksinya tidak menghasilkan polusi hal itu dikarenakan tidak ada pembakaran yang terjadi seperti halnya pembangkit yang menggunakan bahan bakar minyak, gas bumi atau batubara.

PLTS menggunakan *PV array* sebagai komponen utama untuk menangkap sinar matahari. Sinar matahari yang merupakan *foton* ketika menyinari permukaan sel-sel surya pada *PV array*, elektronnya akan tereksitasi dan menimbulkan aliran listrik. Listrik yang dihasilkan oleh panel surya dapat langsung digunakan atau disimpan lebih dahulu ke dalam baterai. Arus listrik yang dihasilkan adalah listrik dengan arus searah (DC), sehingga ketika ingin digunakan untuk beban listrik dengan arus bolak-balik (AC) maka dibutuhkan *inverter* sebagai alat konversi arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC).

Produksi energi surya pada suatu daerah dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$E = I \times A \quad (2.1)$$

dengan :

E = energi surya yang dihasilkan (Watt)

I = intensitas radiasi surya rata-rata selama satu jam (Watt/m²)

A = luas area (m²).

2.2.3.1. Potensi dan Hambatan Realisasi PLTS di Indonesia

Indonesia merupakan negara yang potensial untuk pengembangan PLTS karena letak geografis Indonesia yang berada di lintang garis khatulistiwa sehingga membuat Indonesia hanya mempunyai dua musim, yaitu musim hujan dan musim panas. Musim panas Indonesia berkisar antara bulan Maret-Agustus, hal ini menunjukkan bahwa musim panas Indonesia adalah sekitar 6 bulan. Atas dasar itulah Indonesia sangat potensial untuk pengembangan PLTS. Oleh karenanya Indonesia mempunyai sumber energi surya yang berlimpah dengan intensitas radiasi matahari rata-rata sekitar 4.8 kWh/m² per hari di seluruh wilayah Indonesia. Dengan berlimpahnya sumber energi surya yang belum dimanfaatkan secara optimal, sedangkan di sisi lain ada sebagian wilayah Indonesia yang belum terlistriki karena tidak terjangkau oleh jaringan listrik PLN, sehingga PLTS dengan sistemnya yang modular dan mudah dipindahkan merupakan salah satu solusi yang dapat dipertimbangkan sebagai salah satu pembangkit listrik alternatif.

Tabel 2.2. Intensitas radiasi matahari di Indonesia.*(sumber : BPPT, BMG, 2014)*

Propinsi	Lokasi	Tahun Pengukuran	Posisi Geografis	Intensitas Radiasi (Wh/m ²)
NAD	Pidie	1980	4°15' LS; 96°52' BT	4.097
SumSel	Ogan Komering Ulu	1979-1981	3°10' LS; 104°42' BT	4.951
Lampung	Kab. Lampung Selatan	1972-1979	4°28' LS; 105°48' BT	5.234
DKI Jakarta	Jakarta Utara	1965- 1981	6°11' LS; 106°05' BT	4.187
Banten	Tangerang	1980	6°07' LS; 106°30' BT	4.324
	Lebak	1991 - 1995	6°11' LS; 106°30' BT	4.446
Jawa Barat	Bogor	1980	6°11' LS; 106°39' BT	2.558
	Bandung	1980	6°56' LS; 107°38' BT	4.149
Jawa Tengah	Semarang	1979-1981	6°59' LS; 110°23' BT	5.488
DI Yogyakarta	Yogyakarta	1980	7°37' LS; 110°01' BT	4.500
Jawa Timur	Pacitan	1980	7°18' LS; 112°42' BT	4.300
KalBar	Pontianak	1991-1993	4°36' LS; 9°11' BT	4.552
KalTim	Kabupaten Berau	1991-1995	0°32' LU; 117°52' BT	4.172
		1979 - 1981	3°27' LS; 114°50' BT	4.796
KalSel	Kota Baru	1991 - 1995	3°25' LS; 114°41' BT	4.573
		1991-1995	1°32' LU; 124°55' BT	4.911
Gorontalo	Gorontalo	1991-1995	0°57' LS; 120°0' BT	5.512
SulTeng	Donggala	1991-1994	8°37' LS; 122°12' BT	5.720
Papua	Jayapura	1992-1994	8°40' LS ; 115°13' BT	5.263
Bali	Denpasar	1977- 1979	9°37' LS; 120°16' BT	5.747
NTB	Kabupaten Sumbawa	1991-1995	10°9' LS; 123°38' BT	5.117
NTT	Ngada	1975-1978		

PLTS sebenarnya sudah diaplikasikan di Indonesia, terutama di daerah terpencil dan jauh dari akses listrik PLN. Berikut beberapa contoh aplikasi PLTS di Indonesia :

- a. PLTS SHS (*solar home system*) : jenis PLTS ini banyak digunakan secara mandiri di rumah-rumah yang jauh dan sulit terjangkau PLN. Persebaran PLTS ini terutama berada di wilayah Papua, Sulawesi dan sebagian Kalimantan. Beberapa wilayah kepulauan di Indonesia juga banyak mengaplikasikan PLTS SHS. Kelebihan sistem ini adalah paket produk yang ringkas dan sederhana, sehingga mudah dipasang dan dirawat.
- b. PLTS Terpusat : jenis PLTS ini banyak digunakan untuk mengaliri desa atau kota baru di wilayah-wilayah pegunungan, kepulauan ataupun lokasi terpencil. Sistem dengan kapasitas besar ini mampu mengaliri mulai dari puluhan hingga ratusan KK (kepala keluarga). Kelebihan sistem ini adalah model aplikasinya yang terpusat, sehingga memudahkan pemantauan dan perawatan.

- c. PLTS Pompa Air : jenis PLTS ini khusus mengaplikasikan panel surya dengan pompa air, sehingga pengguna dapat menikmati air bersih yang dialirkan secara otomatis oleh sistem ini.
- d. PLTS pada Atap : jenis PLTS ini mulai banyak dilirik oleh masyarakat perkotaan, karena dapat membantu efisiensi penggunaan daya PLN untuk rumah. Instalasi panel surya yang dapat dilakukan pada atap dan dapat terkoneksi dengan PLN, menjadi nilai tambah untuk aplikasi ini.

Pembangunan PLTS dengan skala besar masih mempunyai beberapa hambatan, antara lain adalah :

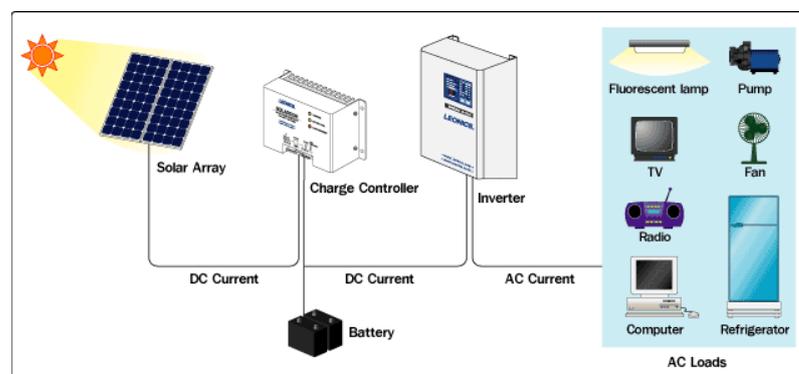
- biaya investasi yang mahal
- butuh lahan yang luas
- nilai ekonomis yang besar.

Selain itu agar sel surya dapat menjadi sumber energi yang dapat digunakan sebagai pengganti energi konvensional, maka harus :

- biaya produksi rendah
- efisiensi tinggi
- waktu/masa operasi lama.

2.2.3.2. Konfigurasi PLTS

Berikut adalah skema dari sistem PLTS yang umum digunakan :



Gambar 2.2. Skema sistem PLTS

(sumber : <http://www.sah.co.id/products-services/photovoltaic-system-pv/off-grid-pv/>).

2.2.3.3. Komponen PLTS

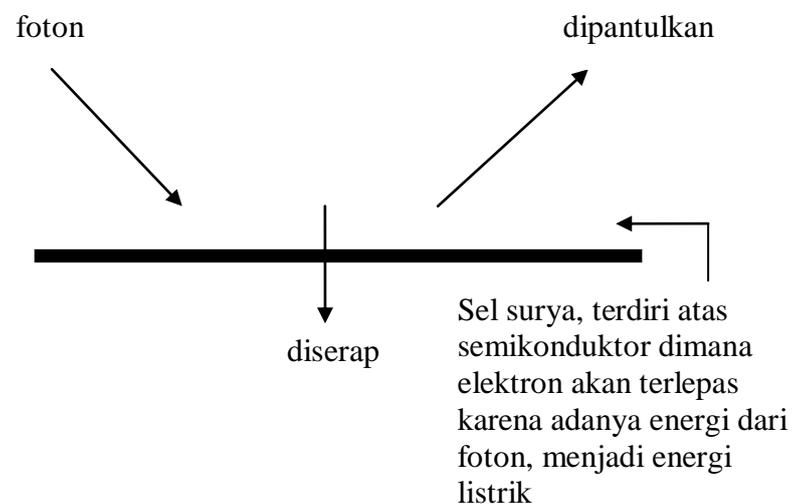
Dari sistem konfigurasi dan skema PLTS diatas, terdapat beberapa komponen penting yang digunakan sehingga sistem PLTS dapat menghasilkan listrik. Berikut adalah komponen-komponen yang ada pada sistem PLTS :

- a. *Solar Array* : adalah kumpulan dari banyak *solar cell* atau *photovoltaic cell* yang di ditempatkan pada suatu wilayah yang kemudian dirangkai secara seri maupun paralel. *Photovoltaic array* merupakan sebuah *semiconductor device* yang mampu merubah energi sinar matahari menjadi energi listrik. Dalam hal ini cahaya yang jatuh pada sel surya menghasilkan elektron yang bermuatan positif dan *hole* yang bermuatan negatif, kemudian elektron dan *hole* mengalir membentuk arus listrik. Prinsip ini dikenal sebagai prinsip *photoelectric*. Sel surya dapat tereksitasi karena terbuat dari *semiconductor* yang mengandung unsur silikon. Silikon ini terdiri atas dua jenis lapisan sensitif, lapisan negatif (tipe-n) dan lapisan positif (tipe-p).
- b. *Charge Controller* : fungsi dari alat ini yaitu mengatur pengisian baterai. Alat ini bekerja ketika baterai sudah terisi penuh, *charge controller* akan menghentikan pengisian baterai dengan memutus aliran listrik dari *solar array* ke baterai. Hal ini dilakukan agar baterai tidak mengalami *over charging* yang dapat memperpendek umur baterai.
- c. *Battery* : komponen ini fungsinya untuk menyimpan tegangan yang dihasilkan oleh *solar array* sebelum didistribusikan ke beban. Jumlah dan besar daya tampung baterai sangat tergantung dengan ukuran panel yang terpasang dan beban yang di tanggung oleh sistem.
- d. *Inverter* : fungsinya yaitu mengubah arus dan tegangan listrik searah (DC = *direct current*) yang dihasilkan *solar array* menjadi arus dan tegangan listrik bolak balik (AC = *alternating current*). *Inverter* yang digunakan tergantung dengan pada kapasitas daya *solar array* dengan keluaran tegangan AC 220 Volt.

- e. *AC Loads* : adalah perangkat elektronik atau mesin yang kebutuhan energinya ditanggung oleh aliran listrik dari sistem pembangkit listrik. *AC loads* biasanya merupakan peralatan elektronik yang digunakan sehari-hari baik untuk keperluan rumah tangga maupun industri.

2.2.3.4. Prinsip Kerja PLTS

Dalam cahaya matahari terkandung energi dalam bentuk *foton*. Ketika *foton* ini mengenai permukaan sel surya, elektron-elektronnya akan tereksitasi dan menimbulkan aliran listrik. Prinsip ini dikenal sebagai prinsip *photoelectric*. Sel surya dapat tereksitasi karena terbuat dari material *semiconductor* yang mengandung unsur silikon. Silikon ini terdiri atas dua jenis lapisan sensitif. Lapisan negatif (tipe-n) dan lapisan positif (tipe-p).



Gambar 2.3. Proses terjadinya energi listrik dari *solar cell*.

2.2.3.5. Perhitungan Dalam Pembangunan PLTS

Ada beberapa perhitungan yang perlu dilakukan agar dapat dicapai nilai efisiensi dari pembangunan sebuah sistem PLTS, diantaranya :

a. Perhitungan Penentuan Jumlah *Solar Array*



Gambar 2.4. Hubungan *cell*, *module* dan *array*.

Pemasangan instalasi *solar array* biasanya dilakukan dengan dua cara, seri dan paralel yang disesuaikan dengan kebutuhan sistem. Dua cara instalasi tersebut mempunyai sifat dan ketentuan berikut :

- Rangkaian seri akan menghasilkan tegangan keluaran dua kali lebih besar dari kombinasi dua buah PV.
- Rangkaian paralel akan menghasilkan arus keluaran dua kali lebih besar dari kombinasi dua buah PV.
- Rangkaian seri dan paralel akan menghasilkan arus dan tegangan yang lebih besar dari kombinasi dua buah PV.

Pemasangan secara seri ditentukan oleh tegangan masukan inverter, dengan persamaan :

$$J_s = \frac{V_{INV}}{V_{MF}} \quad (2.2)$$

dengan :

- J_s = jumlah seri modul surya
- V_{Inv} = tegangan masuk *inverter* (Volt)
- V_{MF} = tegangan maksimum modul surya (Volt).

Bilangan J_s harus merupakan bilangan bulat (*integer*). Bila didapatkan bilangan pecahan, maka bilangan tersebut harus dibulatkan, sehingga diperoleh persamaan :

$$V_{GPV} = J_s \cdot V_{MF} \quad (2.3)$$

dengan :

V_{GPV} = tegangan modul surya (Volt).

Berbeda dengan ketika menggunakan rangkaian paralel, maka persamaannya akan berubah. Suatu *string* terdiri dari J_s modul surya dalam hubungan seri. Daya total *photovoltaic* sebesar P'_{GPV} , dibutuhkan jumlah *string*, melalui persamaan :

$$J_P = \frac{P'_{GPV}}{V_{GPV} \cdot I_{MF}} \quad (2.4)$$

Bila diperoleh bilangan pecahan J_P dibulatkan keatas, arus nominal *photovoltaic* (I_{GPV}) dapat dihitung kemudian dengan persamaan :

$$I_{GPV} = J_P \cdot I_{MF} \quad (2.5)$$

Setelah ditentukan J_s dan J_P , maka daya *photovoltaic* terpasang dihitung kembali menggunakan persamaan :

$$P_{GPV} = V_{GPV} \cdot I_{GPV} \text{ (wattpeak)} \quad (2.6)$$

Sedangkan jumlah susunan modul PV (N) yang terpasang adalah :

$$N = J_S \cdot J_P \quad (2.7)$$

dengan :

J_P = jumlah *string* modul *photovoltaic*

P'_{GPV} = daya *photovoltaic* (Watt)

V_{GPV} = tegangan *photovoltaic* (Volt)

I_{MF} = arus maksimum modul *photovoltaic* (Ampere).

b. Perhitungan Kapasitas Baterai

$$AH = \frac{ET}{V_S} \quad (2.8)$$

dengan :

AH = kapasitas baterai (Ampere/hour)

ET = total pemakaian energi (Watt/hour)

V_S = tegangan baterai (Volt).

Dikarenakan besarnya *deep of charge* (DOD) pada baterai adalah 80 %, maka kapasitas baterai yang dibutuhkan adalah :

$$C_b = \frac{AH \times I}{DOD} \quad (2.9)$$

dengan :

C_b = kapasitas baterai (Ampere/hour)

Perhitungan untuk besar arus *battery charger regulator* (BCR) adalah :

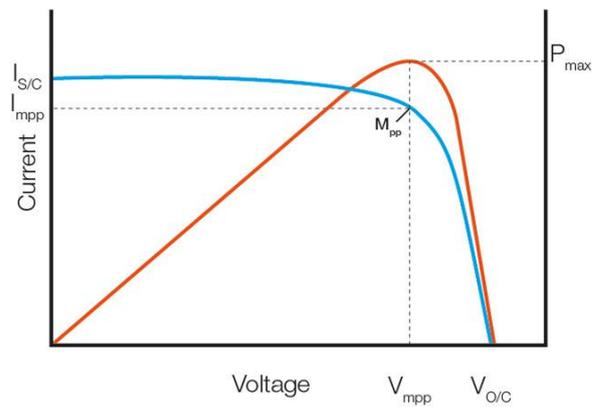
$$I_{maks} = \frac{P_{maks}}{V_S} \quad (2.10)$$

dengan :

I_{maks} = arus maksimal dari *photovoltaic* (Ampere)

P_{maks} = daya maksimal dari *photovoltaic* (Watt).

c. Perhitungan Efisiensi *Solar Cell*



Gambar 2.5. Kurva I-V pada *photovoltaic module*.

Ada beberapa hal yang perlu diketahui ketika ingin menghitung efisiensi sebuah *solar cell* yaitu :

1. *Maximum Power Point* (V_{mp} dan I_{mp})

Maximum power point (V_{mp} dan I_{mp}) pada kurva I-V, adalah titik operasi yang menunjukkan daya maksimum yang dihasilkan oleh modul *photovoltaic*.

2. *Open Circuit Voltage* (V_{oc})

Open Circuit Voltage (V_{oc}) adalah kapasitas tegangan maksimum yang dapat dicapai pada saat tidak adanya arus.

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} 1n \left(\frac{I_L}{I_{sc}} + 1 \right) \quad (2.11)$$

dengan :

k = konstanta boltzmann (1.30×10^{-16} erg)

q = konstanta muatan elektron (1.602×10^{-19} C)

T = suhu (Kelvin)

I_L = arus konstan (Ampere).

3. *Short Circuit Current* (I_{sc})

Short Circuit Current (I_{sc}) adalah maksimum arus keluaran dari modul *solar cell* yang dapat dikeluarkan di bawah kondisi dengan tidak ada *resistansi* atau hubung singkat. Untuk mengetahui arus hubung singkat dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$I_{sc} = qG(L_n + L_p) \quad (2.12)$$

dengan :

G = tingkat generasi

L_n = panjang difusi elektron

L_p = panjang difusi hole

4. *Fiil Factor* (FF)

Fiil Factor (FF) merupakan parameter yang menentukan daya maksimum dari panel surya. Besarnya FF dapat dihitung dengan rumus :

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.13)$$

Perhitungan daya modul *solar cell* adalah :

$$P_{maks} = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF \quad (2.14)$$

dan

$$P_{in} = (\text{intensitas cahaya}) \times (\text{luas area modul}) \quad (2.15)$$

Sehingga didapat persamaan efisiensi berikut :

$$\eta = \frac{P_{maks}}{G \times A} \times 100\% \quad (2.16)$$

dengan :

η = nilai efisiensi (%)

P_{maks} = daya maksimal pada modul *photovoltaic* (Watt)

G = intensitas radiasi matahari (W/m²)

A = luas penampang (m²)

2.2.3.6. Maximum Power Point Tracker (MPPT)

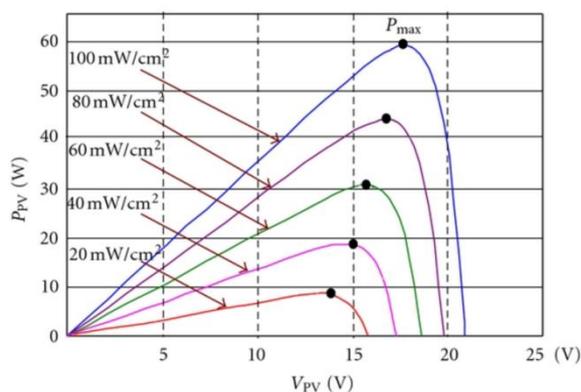
Maximum Power Point Tracker (MPPT) adalah alat untuk mencari titik maksimum dari tegangan dan arus keluaran pada *solar cell*. Cara kerja sistem MPPT adalah dengan mengubah titik operasi/kerja pada kurva karakteristik P-V dari modul *solar cell* sehingga konverter DC-DC dapat memaksa modul *solar cell* untuk membangkitkan daya maksimum sesuai dengan kemampuan modul *solar cell* pada setiap perubahan tingkat intensitas cahaya.



Gambar 2.6. Schneider Electric Conext MPPT 60 150 Charge Controller.

(sumber : http://solarshoppingmall.com/Schneider-Electric-Conext-MPPT-60-150-Charge-Controller_p_91.html).

Sistem MPPT sepenuhnya adalah sebuah rangkaian *electronic device* yang dapat mengubah-ubah titik operasi dari panel surya. Salah satu metode mudah yang dapat diterapkan pada sistem MPPT adalah dengan menaikkan atau menurunkan tegangan sampai ditemukan titik daya maksimal modul surya. Mengingat perubahan level *sun power illumination* yang berubah-ubah setiap waktu, diharap sistem MPPT dapat bekerja dinamis dalam mencari titik daya maksimum.

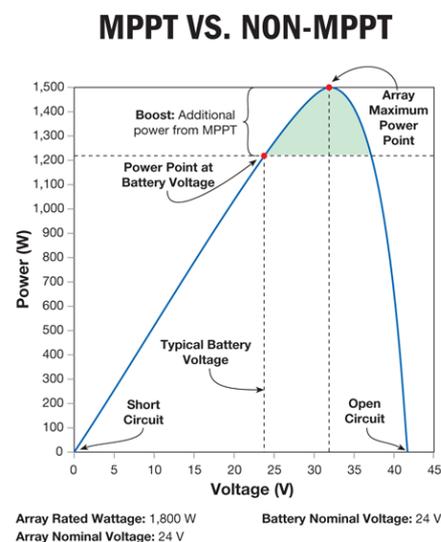


Gambar 2.7. Kurva modul *solar cell* P-V dengan intensitas cahaya yang berbeda-beda.

(sumber :

https://www.researchgate.net/figure/258387869_fig12_PV-arrays-with-different-insolations-a-V-I-curves-and-b-output-power-and-output).

Sistem MPPT diimplementasikan ke dalam suatu alat elektronik. Hasil keluaran alat elektronik tersebut berupa *duty ratio* (D) yang selanjutnya digunakan untuk *switching transistor* pada konverter DC-DC. Sehingga dengan mengatur nilai D diharap dapat menemukan titik daya maksimum dari panel surya.



Gambar 2.8. Kurva panel surya P-V dengan menggunakan MPPT dan tidak menggunakan MPPT.

(sumber : <http://www.preparedham.com/what-you-need-to-know-pwm-and-mppt-solar-charge-controller/>).

Pada gambar 2.8. terlihat bahwa titik kerja pada kontroler biasa tidak menghasilkan daya maksimum, sedangkan dengan menggunakan MPPT bisa mengubah titik kerja tegangan sehingga dihasilkan daya yang maksimum. Jadi cara kerja MPPT adalah dengan mengubah titik tegangan kerja dengan DC-DC konverter.

2.2.4. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Pembangkit listrik tenaga bayu adalah salah satu pembangkit energi terbarukan yang memanfaatkan angin sebagai sumber energi untuk menghasilkan listrik. PLTB merupakan salah satu pembangkit yang potensial untuk dikembangkan di Indonesia karena sumber angin tersedia melimpah, hal itu dikarenakan Indonesia adalah negara dengan garis pantai terpanjang ke-2 di dunia dengan panjang 54.716 km.

Secara sederhana PLTB mengkonversikan tenaga angin menjadi energi listrik dengan menggunakan kincir angin atau turbin angin, yaitu dengan memanfaatkan putaran turbin yang disebabkan oleh angin diteruskan ke rotor generator dimana generator ini memiliki lilitan tembaga yang berfungsi sebagai stator sehingga terjadinya Gaya Gerak Listrik (GGL). Listrik yang dihasilkan dapat disimpan ke baterai atau dimanfaatkan langsung ke beban.

2.2.4.1. Potensi PLTB di Indonesia

PLTB akan bekerja secara efektif di daerah pesisir pantai, karena di pesisir pantai kecepatan angin lebih besar dan lebih konstan jika dibanding daerah yang letaknya jauh dari pantai. Syarat angin yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik yaitu memiliki batas kecepatan minimum sebesar 1.6-3.3 m/s dan batas maksimum sebesar 13.9-17.1 m/s. Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional di 120 daerah di Indonesia menunjukkan bahwa rata-rata kecepatan angin adalah 5 m/s lebih.



Gambar 2.9. Peta potensi energi angin di Indonesia.

(sumber : <http://www.p3tkebt.esdm.go.id>).

Dari data diatas dapat diketahui bahwa potensi energi angin besar, karena dari 33 provinsi yang dijadikan sampel, ada 22 provinsi yang mempunyai kecepatan angin rata-rata 6 m/s. Kecepatan tersebut sudah bisa digunakan untuk menggerakkan turbin angin.

Tabel 2.3. Tabel jumlah daya dari beberapa pembangkit listrik.

(sumber : *ESDM*)

Pembangkit	Jumlah Daya yang Dihasilkan (MW)		
	2013	2014	2015
PLTU	13.407,00	14.457,00	15.103,50
PLTG	3.491,48	3.591,47	3.591,47
PLTS	8,96	8,96	8,96
PLTB	0,43	0,43	0,43
PLTP	570,00	575,00	575,00

Dari data diatas diketahui hasil PLTB yang sudah ada di Indonesia masih jauh dibanding dengan hasil pembangkit-pembangkit konvensional yang ada. Hal ini menunjukkan bahwa potensi yang ada tidak berbanding lurus dengan pembangunan pembangkit listrik tenaga bayu ini.

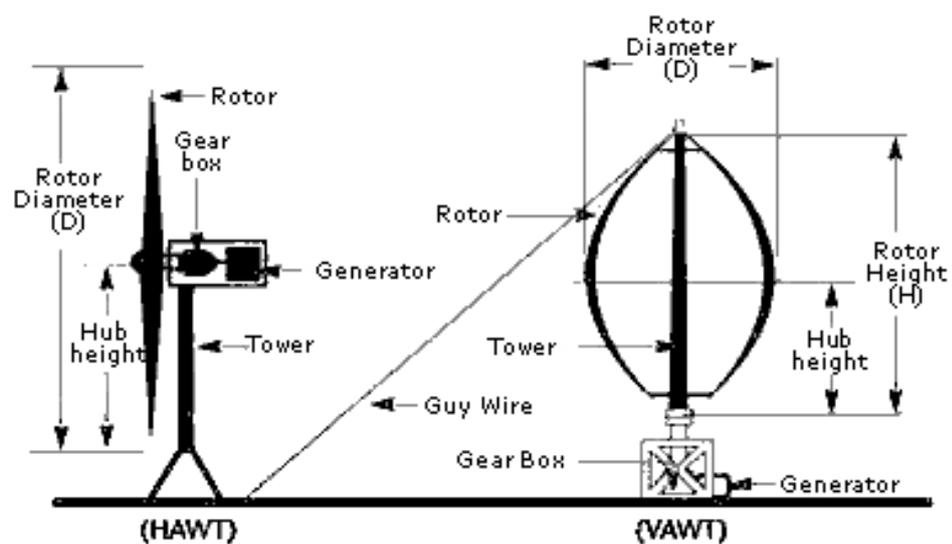
2.2.4.2. Konfigurasi PLTB

PLTB menggunakan turbin angin sebagai penggerak utama untuk menghasilkan listrik. Turbin angin berputar karena energi dari angin yang kemudian dimanfaatkan untuk mengekstrak energi kinetik angin menjadi energi listrik. Secara umum turbin angin dibagi menjadi dua, yakni menurut kapasitas terpasangnya dan menurut sumbu rotor.

1. Menurut kapasitas terpasangnya, turbin angin dibagi menjadi tiga yaitu golongan kecil, menengah dan besar.

Kapasitas Terpasang	Kecil		Menengah	Besar
	Mikro	Mini		
Maks 100 W	100 W-10 kW	10 kW-250 kW	250 kW-2 MW	

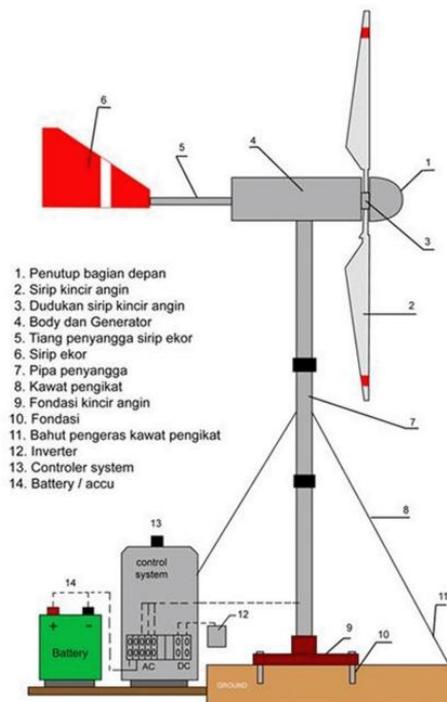
2. Menurut posisi sumbu rotor terbagi dua yaitu :
 - a. *Vertikal Axis Wind Turbine (VAWT)*
 - b. *Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT).*



Gambar 2.10. Bentuk konstruksi turbin angin berdasarkan sumbu rotor.

2.2.4.3. Komponen PLTB di PLTH Bayu Baru.

Penelitian yang dilakukan di PLTH Bayu Baru kincir angin yang beroperasi menggunakan konstruksi *Horizontal Axiz Wind Turbine* (HAWT).



Gambar 2.11. Konstruksi sistem turbin angin HAWT.

Adapun bagian-bagian dari sistem turbin diatas adalah :

- a. Penutup bagian depan, bagian ini berfungsi untuk memecah angin agar mengalir ke sudu-sudu turbin angin.
- b. Sirip kincir angin, adalah bagian yang berfungsi untuk mengubah energi angin menjadi energi putaran poros.
- c. Dudukan sirip kincir angin atau yang disebut hub, adalah bagian yang berfungsi untuk mengunci dan menyatukan sirip kincir angin pada satu titik.
- d. *Body* dan *generator*, *body* adalah bagian yang berfungsi untuk menutup dan melindungi generator yang ada didalamnya, sedangkan generator berfungsi untuk mengubah energi putaran menjadi energi listrik.
- e. Tiang penyangga sirip ekor, adalah tiang yang menghubungkan *body generator* dengan sirip ekor.

- f. Sirip ekor, bagian yang berfungsi untuk mengarahkan turbin angin agar sesuai dengan arah dari kecepatan angin.
- g. Pipa penyangga, bagian ini berfungsi untuk menyangga bagian turbin angin yang berada pada ketinggian tertentu.
- h. Kawat pengikat, adalah kawat untuk mengikat pipa penyangga dan kawat tersebut ditanam di tanah. Kawat ini berfungsi untuk memperkuat pipa penyangga agar tidak mudah roboh.
- i. Fondasi kincir angin, adalah fondasi yang bawah dari pipa penyangga yang letaknya ada di permukaan tanah.
- j. Fondasi, adalah konstruksi fondasi yang ditanam didalam tanah berbahan beton.
- k. Baut pengeras kawat pengikat, adalah bagian yang berfungsi untuk menguatkan kawat pengikat.
- l. Inverter, adalah alat elektronik yang mengubah arus DC menjadi AC.
- m. *Controller system*, adalah bagian yang mengatur kinerja dari turbin angin dan juga mengatur pengisian baterai.
- n. Baterai/Aki, adalah bagian yang berfungsi untuk menyimpan energi listrik DC.

2.2.4.4. Prinsip Kerja PLTB

Pada dasarnya PLTB memanfaatkan angin untuk memutar rotor pada generator yang ada di belakang turbin angin. Generator inilah yang kemudian mengubah energi gerak dari rotor menjadi energi listrik dengan teori medan elektromagnetik, yaitu poros pada generator dipasang dengan material *ferromagnetik* permanen. Setelah itu disekeliling poros terdapat stator yang bentuk fisisnya adalah kumparan-kumparan kawat yang membentuk loop. Ketika

poros generator mulai berputar maka akan terjadi perubahan fluks pada stator yang akhirnya karena terjadi perubahan fluks ini akan dihasilkan tegangan dan arus listrik tertentu. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan ini disalurkan melalui kabel jaringan listrik yang dihasilkan oleh generator ini berupa AC yang memiliki bentuk gelombang kurang lebih sinusoidal. Energi listrik ini biasanya akan disimpan kedalam baterai sebelum dapat dimanfaatkan.

2.2.4.5. Konversi PLTB

Angin merupakan udara yang memiliki massa dan bergerak dengan suatu kecepatan. Dari pergerakan ini, angin memiliki energi yang sebanding dengan massa, serta kecepatan. Nilai potensi energi angin dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut :

$$E = 0.5 \cdot m \cdot V^2 \quad (2.17)$$

dengan :

E = energi massa potensial (Joule)

m = massa udara (kg)

V = kecepatan angin (m/s)

Massa udara disini adalah massa yang terkandung dalam suatu volume udara, dan nilainya dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut :

$$m = \rho \cdot v \quad (2.18)$$

dengan :

ρ = massa jenis udara (kg/m³)

v = volume udara (m³)

Volume udara terukur dapat ditentukan dari perkalian antara luas penampang lingkaran turbin dan panjang lintasan yang ditempuh udara dalam suatu waktu, dan nilainya dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut :

$$v = A \cdot x \quad (2.19)$$

dengan :

A = luas penampang bidang putar turbin (m^2)

x = lintasan yang ditempuh angin dalam suatu waktu (m)

Dengan persamaan diatas dapat disubstitusi sehingga :

$$m = \rho \cdot A \cdot x \quad (2.20)$$

Dengan persamaan diatas dapat disubstitusi sehingga :

$$E = 0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot x \cdot V^2 \quad (2.21)$$

$$p = \frac{dE}{dT} = 0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot x \cdot V^2 \frac{dx}{dt} \quad (2.22)$$

$$p = 0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (2.23)$$

Dan daya spesifik dari angin per satuan luas bidang putar turbin, nilainya dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut :

$$P = \frac{p}{A} = 0.5 \cdot \rho \cdot V^3 \quad (2.24)$$

dengan :

P = daya spesifik angin (W/m^2)

p = tekanan udara (pascal = $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}/\text{m}^2 = 1 \text{ J}/\text{m}^3 = 1 \text{ kg}/\text{m} \cdot \text{s}^2$)

Angin bertiup melalui suatu turbin dan kemudian melepas sebagian energi kinetik kepada turbin tersebut, dan mengalami perhambatan. Dari hal ini dapat disimpulkan bahwa kecepatan angin sebelum dan sesudah melewati turbin tidaklah sama. Perubahan momentum yang dialami udara dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$\Delta M = m(V_1 - V_2) \quad (2.25)$$

$$P = m(V_1 - V_2) V \quad (2.26)$$

dengan :

V = kecepatan angin masuk (m/s)

$$0.5 \cdot m \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.27)$$

$$0.5 \cdot m \cdot (V_1^2 - V_2^2) = m(V_1 - V_2) \quad (2.28)$$

$$V = 0.5 \cdot (V_1 + V_2) \quad (2.29)$$

$$P = \rho \cdot A \cdot V \cdot (V_1 - V_2) V \quad (2.30)$$

$$P = \rho \cdot A \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right)^2 (V_1 - V_2) \quad (2.31)$$

$$P = \rho \cdot A \cdot V_1^3 [(1 + a)(1 - a^2)]/4 \quad (2.32)$$

$$a = \frac{V_2}{V_1} \quad (2.33)$$

$$\frac{dP}{da} = 1 + a - a^2 - a^3 = 0 \quad (2.34)$$

$$a = 1/3 \quad (2.35)$$

Energi maksimum yang dapat diambil oleh turbin adalah :

$$P_{max} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot A \cdot V_1^3 \quad (2.36)$$

Daya maksimal persatuan luas :

$$P_{max} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot V_1^3 \quad (2.37)$$

Daya per satuan luas yang terdapat di angin :

$$P = 0.5 \cdot \rho \cdot V_1^3 \quad (2.38)$$

Efisiensi maksimum turbin angin :

$$\eta = \frac{P_{turbin}}{P_{angin}} \times 100\% \quad (2.39)$$

Daya spesifik yang dapat diambil oleh turbin :

$$P = 0.5 \cdot C_p \cdot \rho \cdot V_1^3 \quad (2.40)$$

dengan :

C_p = konstanta betz ($16/27 = 59.3\%$)

ρ = kerapatan udara rata-rata(kg/m³).

2.2.5. *Software Hybrid Optimization Model for Energy Renewable* (HOMER)

HOMER digunakan untuk optimasi model sistem pembangkit listrik skala kecil (*micropower*), perangkat lunak ini mempermudah evaluasi desain sistem pembangkit listrik untuk berbagai jenis pembangkit listrik skala kecil baik yang tersambung ke jaringan ataupun tidak. *Software* HOMER dikembangkan oleh *U.S. National Renewable Energy Laboratory* (NREL).

Sebelum menjalankan *software* HOMER pertimbangan yang harus dilakukan meliputi besarnya biaya, konfigurasi dari sistem, pemilihan komponen yang digunakan, jumlah dan ukuran kapasitas komponen serta sumber daya alam yang tersedia.

Dari rancangan yang telah dibuat, HOMER akan melakukan perhitungan keseimbangan energi untuk setiap konfigurasi sistem yang layak untuk memenuhi kebutuhan listrik dalam kondisi yang ditentukan, perkiraan biaya instalasi dan sistem operasi selama masa proyek.

Kelebihan *software* ini adalah penggunaannya mudah, bisa mensimulasi, mengoptimasi suatu model kemudian secara otomatis bisa menemukan konfigurasi sistem optimum yang bisa mensuplai beban dengan biaya sekarang atau *Net Present Cost* (NPC) terendah, dan bisa menggunakan parameter sensitifitas untuk hasil yang lebih bagus dan akurat.

Sedangkan kekurangannya adalah perangkat lunak ini keluaran utamanya berupa parameter ekonomi NPC COE (*Cost Of Energy*), bukan model sistem terperinci dan beberapa teknologi energi terbarukan masih belum bisa disimulasikan dengan *software* ini.

2.2.5.1. Prinsip Kerja HOMER

Secara umum pembagian kerja HOMER meliputi dua bagian. Yang pertama yaitu terkait data dan desain dan yang kedua meliputi simulasi, optimasi dan analisis sensitivitas.

Dua pembagian tersebut dilakukan secara berurutan dimulai dari meng-input data-data yang dibutuhkan kemudian membuat desain sistem yang akan di rancang. Lalu lakukan perintah simulasi pada *software* maka *software* kemudian akan menampilkan hasil dari simulasi tersebut seperti yang telah dijabarkan diatas.

2.2.5.1.1. Data dan Desain

Data merupakan hal penting yang harus diketahui agar sistem *software* mempunyai bahan yang akan diolah untuk kemudian di konversikan menjadi beberapa bentuk output. Adapun data yang harus di-input yaitu data beban, data pembangkit, data ekonomi, data *constraints*, data *system control*, data emisi, data matahari, data *sensitivity* matahari, data kecepatan angin, data *solar cell*, dan data baterai.

Sedangkan untuk desain, adalah merupakan rancangan letak dan urutan komponen-komponen dalam sebuah sistem pembangkit yang direncanakan. Perancangan ini harus dilakukan dengan benar sesuai dengan kondisi sebenarnya agar sistem dapat berjalan dan tidak terjadi kesalahan atau *error*.

2.2.5.1.2. Simulasi, Optimasi dan Analisis Sensitivitas

Simulasi merupakan tampilan dari konfigurasi dari komponen-komponen yang telah dirancang menjadi sebuah sistem. Konfigurasinya meliputi besarnya kapasitas komponen-komponen dalam sistem dan strategi operasi yang menentukan cara bekerjasamanya sistem tersebut dalam periode waktu tertentu. Proses simulasi mempunyai dua tujuan, yaitu untuk mengetahui apakah sistem tersebut dapat berjalan dan untuk mengetahui biaya keseluruhan dari sistem.

Optimasi dilakukan untuk menentukan kemungkinan paling optimal dalam konfigurasi sistem. Setelah melakukan proses optimasi maka akan tampil urutan nilai NPC, sistem konfigurasi dan strategi pengisian baterai. Tujuan dari optimasi yaitu menentukan nilai optimal dari konfigurasi sistem yang variabel nilai masukannya dapat diubah sesuai kebutuhan. Adapun variabel yang dapat diubah yaitu :

- Kapasitas daya *photovoltaic*
- Jumlah turbin angin yang digunakan
- Kapasitas daya dari turbin air (satu turbin air)
- Kapasitas daya generator
- Jumlah baterai yang digunakan
- Kapasitas daya konverter (AC-DC)
- Kapasitas daya *electrolizer*
- Kapasitas daya tangki *hydrogen*
- Strategi pengisian baterai.

Analisis sensitivitas ini akan menunjukkan bagaimana hasil konfigurasi sistem yang optimal apabila nilai parameter input berbeda-beda. Pengguna dapat menunjukkan analisis sensitivitas dengan memasukkan beberapa nilai variabel sensitivitas. Contohnya harga listrik, harga bahan bakar, suku bunga dan lain-lain. Secara garis besar analisis sensitivitas dibagi menjadi dua, yaitu :

- Analisis sensitivitas dalam keadaan tidak menentu, adalah analisis sensitivitas yang dilakukan terhadap hal-hal yang sifatnya selalu berubah-ubah seiring perjalanan waktu dan kondisi. Misalnya harga komponen, kecepatan angin. Fungsi analisis sensitivitas ini yaitu untuk menentukan efek dari variasi masukkan, kemungkinan konfigurasi dan tingkat keoptimalan sistem apabila masukannya berubah-ubah.

- Analisis sensitivitas berdasarkan kumpulan data per jam, analisis sensitivitas ini dilakukan secara berkala dalam setiap satu jam. Adapun nilai yang dianalisis adalah beban listrik, sumber daya angin, sumber daya air atau biomassa. Analisa ini akan menampilkan hasil optimal tidaknya suatu konfigurasi berdasarkan warna dan menunjukkan sensitivitas dengan tanda diamond.

2.2.5.2. Implementasi Fisik Menggunakan *Software* HOMER

Sesuai dengan namanya, perancangan menggunakan *software* HOMER ini harus merupakan sebuah sistem pembangkit *hybrid* yang menggabungkan dua atau lebih sumber energi pembangkit menjadi satu buah sistem pembangkit. Selain itu, penggunaan energi juga harus ditentukan terlebih dahulu yaitu beban listrik atau beban *thermal* (panas). Di dalam *software* HOMER juga dilengkapi dengan beberapa perlengkapan untuk konversi seperti konversi AC-DC, konverter, elektrolizer dan alat penyimpan energi (*battery bank* dan tangki *hydrogen*).

2.2.5.2.1. Beban

Beban yang akan diminta oleh HOMER berdasarkan jenisnya ada dua yaitu beban listrik dan beban *thermal* (panas). Kemudian berdasarkan kebutuhan suplai energi ada dua yaitu beban utama (*primary load*) dan beban tunda (*defferable load*).

- a. Beban Listrik, adalah peralatan elektronik yang semua kebutuhan energinya disuplai dari sistem pembangkit. Kebutuhan energi beban listrik dapat berbeda-beda antar peralatan berdasarkan waktu penggunaan dan durasi penggunaan.
- b. Beban *Thermal* (Panas), beban ini merupakan yang pasti ada dalam sistem pembangkit listrik, maka dari itu keberadaannya

perlu dihitung agar analisa sistem dapat maksimal. Data dapat dimasukkan dengan mengumpulkan data per jam atau dengan mengimpor file data yang sudah ada.

- c. Beban Utama (*primary load*), adalah beban listrik yang konsumsi energinya dapat ditentukan dengan pasti. Data yang dimasukkan ke HOMER adalah jumlah beban utama dalam kilowatt untuk beberapa jam setiap tahunnya. Cara memasukkannya dengan mengimpor file yang sudah ada atau dengan memasukkan data beban per jam ke dalam *average daily load profile*. Data beban yang dimasukkan adalah data selama 24 jam selama satu tahun atau memilih beberapa bulan yang berbeda dan juga ada data yang berbeda untuk *weekend* dan *weekdays*. Hasilnya dalam bentuk grafik beban secara keseluruhan. HOMER juga dapat memodelkan dua beban yang berbeda (AC atau DC). Beban utama juga membutuhkan tenaga cadangan untuk mengantisipasi terjadinya *drop* tegangan dan *overload*.
- d. Beban Tunda (*defferable load*), merupakan beban yang dapat ditentukan berdasarkan interval waktu penggunaan. Beban tunda mendapat suplai energi dari tangki beban tunda yang diisi oleh sistem dan digunakan dalam waktu-waktu tertentu saja. Data yang dimasukkan yaitu data rata-rata *defferable load* selama beberapa bulan pada saat tangki akan habis pada ukuran tertentu. Beberapa hal yang dapat ditentukan adalah kapasitas penyimpanan tangki (kWh), batas maksimum tangki dan batas minimum tangki.

2.2.5.2.2. Sumber Energi Sistem Pembangkit

Dalam *software* HOMER perlu memasukkan sumber energi terbarukan yang akan dijadikan sebagai sumber energi pembangkit atau menggunakan bahan bakar konvensional. Pilihan

energinya yaitu energi matahari, energi angin, energi *hydro*, biomassa dan bahan bakar (*fuel*). Faktor dari alam sangat mempengaruhi keberlangsungan sumber energi ini, baik dari proses maupun secara ekonomis. Sumber daya alam sangat mempengaruhi hasil produksi energi dari sistem pembangkit.

- a. Energi Matahari, intensitas penyinaran matahari bergantung pada garis lintang dan bujur. Data sumber daya matahari yang telah didapatkan harus di-input terlebih dahulu ke dalam HOMER. Data yang dimasukkan berupa intensitas rata-rata radiasi matahari yang mengarah langsung ke permukaan bumi.
- b. Energi Angin, energi angin sangat dipengaruhi oleh pola sirkulasi atmosfer dan letak geografis pembangkit. Data yang di-input adalah kecepatan angin selama 12 bulan di lokasi pembangkit. Ada 4 parameter yang bisa di-input :
 - *Weibull shape factor*, adalah pengukuran distribusi dan kecepatan angin selama satu tahun.
 - *Autocorrelation factor*, adalah besar kecepatan angin selama satu jam dan bergantung pada kecepatan angin satu jam sebelumnya.
 - *Diurnal pattern strength* dan *hour of peak wind speed*, adalah parameter yang mengindikasikan *magnitude* dan *phase* secara berurutan dari rata-rata pola harian kecepatan angin.
- c. Energi *Hydro*, sumber energi ini dipengaruhi oleh pola curah hujan dan topografi. HOMER membutuhkan data aliran sungai yang tersedia dalam satu tahun, dan juga bisa data per jam jika ada. HOMER juga bisa menentukan aliran sisa, yaitu aliran minimum yang harus dilewatkan ke turbin. Hal ini dilakukan agar HOMER dapat menentukan tersedia atau tidaknya aliran sungai untuk turbin.
- d. Biomassa, dipengaruhi oleh produktivitas suatu daerah. Produktivitas yang dimaksud ialah dalam menghasilkan bahan

untuk membuat biomassa, seperti limbah kayu, sisa hasil pertanian, kotoran hewan, tanaman yang sudah tidak produktif dan lain-lain yang dapat menghasilkan energi listrik, panas atau gas. Hasil ini digunakan untuk menggerakkan generator yang kemudian akan menghasilkan energi listrik. HOMER membutuhkan data ketersediaan sumber energi biomassa selama satu tahun untuk kemudian HOMER akan menentukan kebutuhan konsumsi untuk menghasilkan listrik melalui generator.

- e. Bahan Bakar (*fuel*), input data bahan bakar juga tersedia dalam *software* HOMER. Adapun bahan bakar yang tersedia yaitu biogas, diesel, *ethanol*, *gasoline*, *methanol*, *natural gas*, *propane*, dan *stored hydrogen*. Sedangkan untuk spesifikasi fisik dari bahan bakar terdiri dari *density*, *lower heating value*, *carbon content* dan *sulfur content*.

2.2.5.2.3. Komponen-Komponen Utama Sistem Pembangkit

HOMER mempunyai 10 tipe komponen utama sebuah pembangkit, Adapun 10 komponen tersebut yaitu :

- Sel surya (*photovoltaic*), mengubah radiasi sinar matahari menjadi energi listrik (DC) melalui proses *photoelectric*.
- Turbin angin, memanfaatkan angin untuk memutar turbin yang memutar motor yang dapat menghasilkan listrik (DC).
- Turbin air, memanfaatkan deras aliran air untuk memutar motor yang dapat menghasilkan listrik (AC/DC).
- Generator, menggunakan bahan bakar konvensional untuk dapat memutar motor yang dapat menghasilkan listrik (AC/DC).
- Jaringan transmisi, fungsinya sebagai jembatan untuk mengirimkan energi listrik dari pembangkit ke jaringan distribusi lalu ke konsumen.

- *Boiler* (uap), energi yang dapat diatur sesuai dengan kebutuhan melalui proses pemanasan yang menghasilkan uap untuk menggerakkan generator.
- *Converter*, adalah komponen yang mengubah listrik AC menjadi listrik DC.
- *Electrolizer*, fungsinya mengubah kelebihan energi listrik AC/DC menjadi *hydrogen* melalui proses elektrolisis air.
- *Battery*, digunakan untuk penyimpanan sementara listrik DC dari sumber pembangkit untuk kemudian digunakan secara langsung oleh beban atau diubah menjadi AC terlebih dahulu agar bisa dikonsumsi beban.
- Tangki penyimpanan *hydrogen*, fungsinya menyimpan *hydrogen* dari *electrolizer* ke bahan bakar atau generator.

Ada dua komponen yang akan dijabarkan lebih lanjut dalam pembahasan ini, yaitu :

a. Sel Surya (*Photovoltaic*)

Sel surya merupakan sumber energi terbarukan, dan di dalam HOMER, PV memproduksi energi listrik DC. Daya P_{pv} (DC) yang dibangkitkan oleh PV dengan menggunakan efek temperatur pada PV dapat ditentukan dengan persamaan :

$$P_{pv} = f_{pv} \cdot Y_{pv} \frac{G_T}{G_{T,STC}} \quad (2.41)$$

dengan :

Y_{pv} = daya output pada pengujian dengan kondisi standar (kW)

f_{pv} = PV *derating factor* (faktor skala untuk menghitung dari efek debu pada panel, rugi-rugi pada kawat, suhu atau semua faktor-faktor yang

menyebabkan keluaran dari sel surya berkurang dari kondisi yang diharapkan)

G_T = radiasi sesaat pada permukaan PV *module* (kW/m²)

$G_{T,STC}$ = radiasi sesaat menurut kondisi standar pengujian (1 kW/m²).

Biaya dari PV *array* ditentukan melalui biaya modal yang dimiliki (\$), biaya penggantian komponen (\$), biaya operasional dan pemeliharaan (\$/year) serta biaya penggantian.

b. Turbin Angin

Angin adalah energi terbarukan yang ketersediaannya akan terus ada. Sehingga dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin angin. Turbin angin menghasilkan listrik karena adanya perubahan energi kinetik dari angin menjadi listrik (AC/DC). HOMER mengakumulasikan standar kerapatan udara sebesar 1.225 kg/m², yang mana sesuai dengan standar suhu dan tekanan udara. Daya (P) yang dibangkitkan oleh turbin angin ditentukan menurut persamaan :

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_{pMax} \quad (2.42)$$

dengan :

P = daya yang dibangkitkan (W)

ρ = densitas udara (kg/m³)

A = luas area baling-baling (m²)

v = kecepatan angin (m/s)

C_{pMax} = koefisien daya teoritis (0.59)

2.2.5.2.4. Sistematisasi Energi

Sistemasi merupakan perencanaan dalam penataan jaringan dan komponen agar sistem dapat bekerja secara sistematis dan saling mendukung satu sama lain sehingga optimasi sistem dapat tercapai. Perencanaan ini meliputi sistem tenaga cadangan, sistem kontrol dari komponen dan strategi pengisian baterai.

a. Sistem Tenaga Cadangan

Sistem ini dibutuhkan untuk mengantisipasi terjadinya *overload* dan fluktuasi beban yang tidak menentu. Hal ini biasanya dilakukan dengan cara membeli spesifikasi komponen yang lebih besar dari kebutuhan beban. Misal kebutuhan beban sebesar 50 kW maka spesifikasi pembangkit sebesar 75 kW, sehingga ada 25 kW daya sebagai cadangan.

b. Sistem Kontrol dari Komponen Tidak Terbarukan (*Dispatchable*)

Sistem ini menggunakan dua buah sumber pembangkit yaitu energi terbarukan dan energi tidak terbarukan (generator, baterai, jaringan transmisi, boiler). Hal ini dilakukan untuk membantu sumber pembangkit energi terbarukan ketika tidak dapat mensuplai kebutuhan beban. HOMER menggambarkan sisi ekonomi dari beberapa energi tidak terbarukan berdasarkan dua nilai, yaitu biaya tetap (\$/h) dan biaya marginal energi (\$/kWh). Nilai ini menggambarkan semua biaya yang berhubungan dengan produksi energi dengan sumber energi per jam.

c. Strategi Pengisian Baterai

Hal ini merupakan beberapa perencanaan untuk menentukan cara kerja dari generator dan *battery bank*. Hasil dari perencanaan yang optimal tergantung dari beberapa faktor, termasuk ukuran

kapasitas daya pada generator dan baterai, harga bahan bakar, biaya O&M generator dan jumlah tenaga hibrida pada sistem Ada dua cara pengisian baterai yang terdapat di HOMER, yaitu :

- *load following*, yaitu generator hanya menghasilkan energi sesuai dengan kebutuhan beban, sehingga baterai akan di isi oleh energi yang berasal dari pembangkit tenaga *hybrid*.
- *cycle charging*, yaitu generator bekerja dengan kapasitas maksimal, sehingga energi lebih yang dihasilkan digunakan untuk mengisi baterai.