

## BAB II

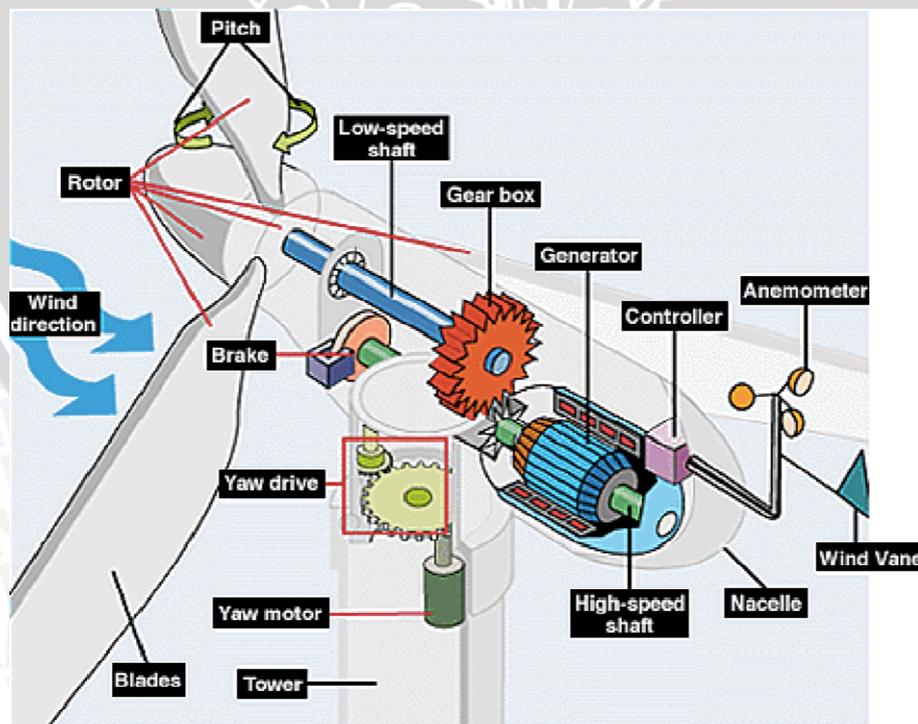
### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) adalah suatu teknologi pembangkit listrik yang merubah potensi energi angin menjadi energi listrik. Proses tahapan konversi energi bermula dari energi kinetik angin menjadi energi gerak rotor kemudian menjadi energi listrik. Listrik yang dihasilkan dari Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) akan bekerja optimal pada siang hari dimana angin yang berhembus cukup kencang dibandingkan dengan angin yang berhembus pada malam hari, sedangkan penggunaan listrik biasanya akan meningkat menjelang malam hari. Untuk mengantisipasi, sistem ini sebaiknya tidak langsung digunakan untuk keperluan produk-produk elektronik, namun terlebih dulu disimpan dalam satu media seperti baterai atau aki sehingga listrik yang keluar besarnya stabil dan bisa digunakan kapan saja [Herlina. 2009:10].

##### 2.1.1. Komponen-komponen PLTB

Komponen-komponen PLTB dari ukuran besar, pada umumnya terlihat pada gambar 2.1 berikut, sedangkan untuk ukuran kecil biasanya tidak semua komponen ada seperti yang terlihat pada gambar.



Gambar 2.1 Potongan Turbin Angin  
Sumber : [www.srl.gatech.edu](http://www.srl.gatech.edu)

- **Anemometer**  
Mengukur kecepatan angin, dan mengirim data angin ini ke alat pengontrol.
- **Blades (Bilah Kipas)**  
Kebanyakan turbin angin mempunyai 2 atau 3 bilah kipas. Angin yang berhembus akan menyebabkan turbin ini berputar.
- **Brake (Rem)**  
Suatu rem cakram yang dapat digerakkan secara mekanis, dengan tenaga listrik atau hidrolik untuk menghentikan rotor atau saat keadaan darurat. Digunakan untuk menjaga putaran pada poros setelah *gearbox* agar bekerja pada titik kerja aman saat terdapat angin yang besar. Alat ini perlu dipasang karena generator memiliki titik kerja aman dalam pengoperasiannya. Generator ini akan menghasilkan energi listrik maksimal pada saat bekerja pada titik kerja yang telah ditentukan. Dampak dari akibat kerusakan akibat putaran berlebih diantaranya : *overheat*, rotor *breakdown*, kawat pada generator putus, karena tidak dapat menahan arus yang cukup besar.
- **Controller (Alat Pengontrol)**  
Alat pengontrol ini menstart turbin pada kecepatan angin kira-kira 12-25 km/jam, dan mematakannya pada kecepatan 90 km/jam. Turbin tidak beroperasi diatas 90 km/jam dikarenakan angin terlalu kencang dapat merusaknya.
- **Gear Box (Roda Gigi)**  
Alat ini berfungsi untuk mengubah putaran rendah pada kincir menjadi putaran tinggi. Biasanya *gearbox* yang digunakan sekitar 1:60. Roda gigi menaikkan putaran dari 30-60 rpm menjadi kira-kira 1000-1800 rpm, yaitu putaran yang biasanya disyaratkan untuk memutar generator listrik.
- **High-speed Shaft (Poros Putaran Tinggi)**  
Berfungsi untuk menggerakkan generator.
- **Low-speed Shaft (Poros Putaran Rendah)**  
Poros turbin yang berputar kira-kira 30-60 rpm.
- **Generator**  
Generator pembangkit listrik, biasanya sekarang alternaotr arus bolak-balik. Ini adalah salah satu komponen terpenting dalam pembuatan sistem turbin angin. Generator ini mengubah energi gerak menjadi energi listrik.

- *Pitch* (Sudut Bilah Kipas)  
Bilah kipas bisa diatur sudutnya untuk mengatur kecepatan rotor yang dikehendaki, tergantung angin terlalu kencang atau terlalu rendah.
- Rotor  
Bilah kipas bersama porosnya dinamakan rotor.
- *Tower* (Menara)  
Menara bisa dibuat dari pipa baja, beton, rangka besi. Karena kencangnya angin bertambah dengan ketinggian, maka makin tinggi menara makin besar harus semakin kokoh pula menara yang didirikan.
- *Wind Direction* (Arah Angin)  
Gambar 2.1 adalah turbin yang menghadap angin, desain turbin lain ada yang mendapat hembusan angin dari belakang.
- *Wind Vane* (Tebeng Angin)  
Mengukur arah angin, berhubungan dengan penggerak arah yang memutar arah turbin sesuai dengan arah angin.
- *Yaw Drive* (Penggerak Arah)  
Penggerak arah memutar turbin ke arah angin untuk desain turbin yang menghadap angin. Untuk desain turbin yang mendapat hembusan angin dari belakang tidak memerlukan alat ini.
- *Yaw Motor* (Motor Penggerak Arah)  
Motor listrik yang menggerakkan penggerak arah.  
[Herlina. 2009:12]

## 2.2.2 Jenis-Jenis Turbin Angin

Jenis-jenis turbin angin berdasarkan arah/poros pereputarannya dibedakan menjadi dua jenis, yaitu turbin angin sumbu horizontal dan turbin angin sumbu vertikal.

### 2.2.2.1 Turbin Angin Sumbu Horizontal

Turbin angin sumbu horizontal (TASH) memiliki poros rotor utama dan generator listrik di puncak menara. Turbin berukuran kecil diarahkan oleh sebuah baling-baling angin (baling-baling cuaca) yang sederhana, sedangkan turbin berukuran besar pada umumnya menggunakan sebuah sensor angin yang digandengkan dengan motor servo. Sebagian besar memiliki sebuah *gearbox* yang mengubah putaran kincir yang pelan menjadi lebih cepat berputar.



Gambar 2.2 Turbin Angin Sumbu Horizontal  
Sumber : Hau. 2006

Karena sebuah menara menghasilkan turbulensi dibelakangnya, turbin biasanya diarahkan melawan arah angin dari menara. Bilah-bilah turbin dibuat kaku agar mereka tidak terdorong menuju menara yang disebabkan oleh angin berkecepatan tinggi. Sebagai tambahan, bilah-bilah itu diletakkan didepan menara pada jarak tertentu dan sedikit dimiringkan. Karena turbulensi dari angin yang kencang dapat menyebabkan kerusakan struktur menara, dan realibilitas sangatlah penting, maka sebagian besar TASH merupakan jenis *upwind* (melawan arah angin) dan biasanya menggunakan tiga bilah kipas. Dan meskipun memiliki permasalahan pada turbulensi, turbin dengan dua bilah kipas atau mesin *downwind* (mengikuti arah angin) tetap dibuat karena tidak memerlukan mekanisme tambahan agar tetap sejalan dengan angin. Dan disaat angin berhembus sangat kencang, bilah-bilahnya bisa ditekuk sehingga mengurangi turbulensi yang terjadi akibat angin kencang [Herlina. 2009:15].

#### 2.2.2.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin angin sumbu vertikal (TASV) memiliki poros/sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus terhadap permukaan pemasangannya. Kelebihan utama turbin ini adalah tidak mengharuskan penggunaan yang diarahkan terhadap arah angin agar efektifitasnya meningkat. Karena turbin jenis ini mampu mendayagunakan angin dari berbagai arah. Jadi sangat cocok ketika dipakai pada daerah-daerah yang arah anginnya sangat bervariasi.

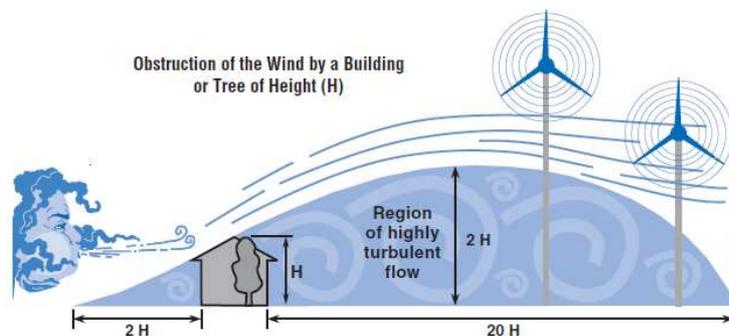
Dengan sumbu poros yang vertikal, generator maupun gearbox bisa ditempatkan di dekat permukaan tanah, jadi tidak diperlukan menara yang tinggi yang mampu menyokong generator dan *gearbox* tersebut, serta akan lebih mudah diakses untuk keperluan perawatan.



Gambar 2.3 Turbin Angin Sumbu vetikal  
Sumber : Fitzgerald. 2007.

Turbin sumbu vertikal ini sering dipasang di dekat dasar tempat ia diletakkan, seperti permukaan tanah atau puncak atap sebuah bangunan. Tetapi kecepatan angin lebih pelan pada ketinggian yang rendah, sehingga energi yang dihasilkan pun semakin sedikit. Aliran udara di dekat tanah dan obyek lain mampu menciptakan aliran angin yang bergolak dan mampu menghasilkan *drag* (gaya yang menahan pergerakan sebuah benda padat melalui zat cair atau gas).

Jika tinggi puncak atap bangunan yang akan dipasang menara turbin kira-kira 50% dari tinggi menara, ini merupakan titik optimal bagi energi angin yang maksimal dan turbulensi angin yang minimal [Herlina. 2009:16].



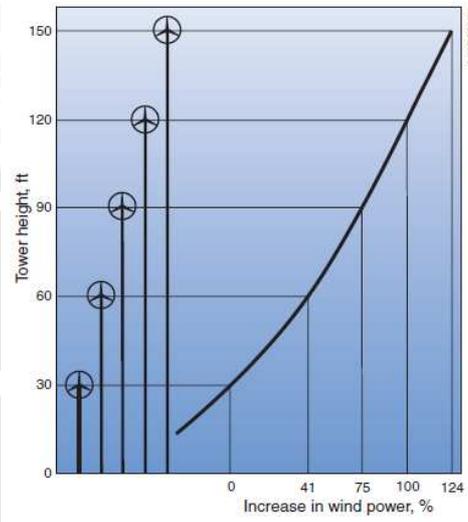
Gambar 2.4 Titik Optimal Pemasangan Turbin Angin  
Sumber : Wegley. 1980

## 2.2.3 Keunggulan dan Kelemahan Turbin Angin

### 2.2.3.1 Keunggulan dan Kelemahan Turbin Angin Sumbu Horizontal

#### (TASH)

#### Keunggulan TASH



Gambar 2.5 Pertambahan Kecepatan Angin dengan Ketinggian  
Sumber : Wegley, 1980

Menara yang pada umumnya dibangun tinggi memperbolehkan akses angin yang jauh lebih kuat di tempat-tempat yang memiliki geseran angin (perbedaan antara laju dan arah angin antara dua titik yang jaraknya relatif dekat di dalam atmosfer bumi). Di sejumlah lokasi geseran angin, setiap sepuluh meter ke atas, kecepatan angin meningkat sebesar 20%.

#### Kelemahan TASH

- Menara yang tinggi serta bilah kipas yang panjangnya bisa mencapai 90 meter sulit diangkut. Diperkirakan besar biaya transportasi bisa mencapai 20% dari seluruh biaya peralatan turbin angin.
- TASH yang tinggi sulit dipasang, membutuhkan derek yang sangat tinggi dan mahal serta membutuhkan operator yang terampil.
- Konstruksi menara yang besar dibutuhkan untuk menyangga bilah-bilah yang berat, *gearbox* dan generator.
- Ukurannya yang tinggi merintangi jangkauan pandangan, dan mengganggu penampilan pandangan.
- Berbagai varian *downwind* menderita kerusakan struktur yang disebabkan oleh turbulensi.

### 2.2.3.2 Keunggulan dan Kelemahan Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV)

#### Keunggulan TASV

- Tidak membutuhkan struktur menara yang besar.
- Karena bilah-bilah rotornya vertikal, tidak membutuhkan mekanisme *yaw*.
- TASV bisa diletakkan lebih dekat ke tanah, membuat pemeliharaan bagian-bagian yang bergerak menjadi mudah.
- TASV memiliki sudut *airfoil* (bentuk bilah sebuag baling-baling yang terlihat secara melintang) yang lebih tinggi, memberikan keaerodinamisan yang tinggi sembari mengurangi *drag* tekanan yang rendah dan tinggi.
- TASV memiliki kecepatan awal angin yang lebih rendah daripada TASH. Biasanya TASV mulai menghasilkan listrik pada 10km/jam (6 m.p.h).
- TASV biasanya memiliki *tip speed ratio* (perbandingan antara kecepatan putaran dari ujung sebuah bilah dengan laju angin sebenarnya) yang lebih rendah sehingga lebih kecil kemungkinan untuk rusak pada saat angin berhembus sangat kencang.
- TASV bisa didirikan pada lokasi-lokasi dimana struktur yang lebih tinggi dilarang dibangun.
- TASV tidak harus diubah posisinya jika arah angin berubah.

#### Kelemahan TASV

- Kebanyakan TASV memproduksi energi hanya 50% dari efisiensi TASH karena drag tambahan yang dimilikinya saat kincir berputar.
- Kebanyakan TASV mempunyai torsi awal yang rendah, dan membutuhkan energi untuk mulai berputar.
- Sebuah TASV yang menggunakan kabel untuk menyanggahnya memberi tekanan pada bantalan dasar karena semua berat rotor dibebankan pada bantalan. Kabel yang dikaitkan ke puncak bantalan meningkatkan daya dorong ke bawah saat angin bertiup.

[Herlina, 2009:17]

Hubungan antara daya dengan kecepatan angin dapat dijelaskan sebagai berikut, energi kinetik di udara dengan massa 'm' yang bergerak dengan kecepatan V dijabarkan pada persamaan [Patel, 1999]:

$$\text{Energi Kinetik} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad (2.1)$$

Sedangkan daya atau energi yang dihasilkan oleh udara berupa energi kinetik yang dihasilkan tiap detiknya, atau seperti pada persamaan :

$$\text{Power} = \frac{1}{2} \cdot (\text{mass flow rate per second}) \cdot V^2 \quad (2.2)$$

Dimana, P = Daya mekanik pada udara (Watt)

p = kerapatan udara ( $\text{kg/m}^3$ )

A = Area sapuan angin ( $\text{m}^2$ )

V = Kecepatan angin (m/s)

Sehingga persamaan menjadi,

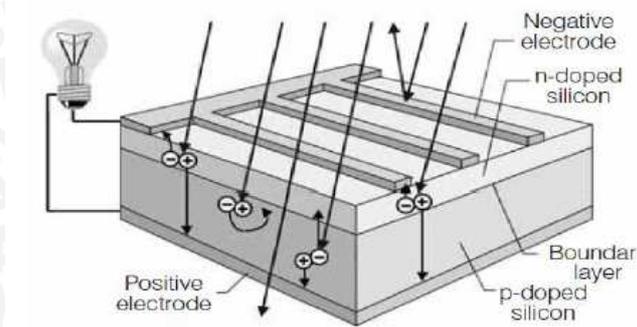
$$P = \frac{1}{2} (\rho A V) \cdot V^2 = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.3)$$

Namun energi yang dihasilkan oleh *blade/* rotor pada turbin angin harus dikalikan dengan koefisien daya ( $C_p$ ) yang biasanya dikaitkan dengan hukum Betz dengan nilai maksimum 0,59. Sehingga persamaan daya yang dihasilkan oleh rotor adalah sebagai berikut.

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot 0.59 \quad (2.4)$$

### 2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah suatu pembangkit yang mengkonversikan energi foton dari surya menjadi energi listrik. Konversi ini terjadi pada panel surya yang terdiri dari sel-sel *photovoltaic*. Sel-sel ini merupakan lapisan-lapisan tipis dari silikon (Si) murni atau bahan semikonduktor lainnya yang diproses sedemikian rupa, sehingga apabila bahan tersebut mendapat energi foton akan mengeksitasi elektron dari ikatan atomnya menjadi elektron yang bergerak bebas, dan pada akhirnya akan mengeluarkan tegangan listrik arus searah [Handini. 2010: 4].



Gambar 2.6 Proses Konversi Energi Listrik pada Panel Surya  
Sumber : Patel, 1999



Gambar 2.7 (a) PLTS Stand Alone (Mandiri), Desentralisasi. (b) PLTS Hybrid dengan Genset, Sentralisasi.

Sumber : <http://www.azetsurya.com/info.php>

PLTS memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik DC (*direct current*), yang dapat diubah menjadi listrik AC (*alternating current*) apabila diperlukan. Oleh karena itu meskipun cuaca mending, selama masih terdapat cahaya, maka PLTS tetap dapat menghasilkan listrik. PLTS pada dasarnya adalah pencatu daya, dan dapat dirancang untuk mencatu kebutuhan listrik yang kecil sampai besar, baik secara mandiri, maupun dengan dihybrid, baik dengan metode desentralisasi (satu rumah satu pembangkit) atau SHS (*solar home system*), maupun dengan metode sentralisasi (listrik didistribusikan dengan jaringan kabel) [Handini. 2010: 5].

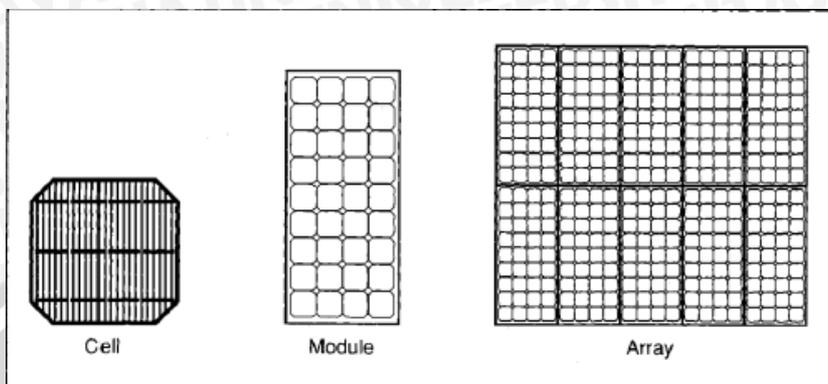
## 2.4 Komponen-Komponen PLTS

Pemanfaatan tenaga surya sebagai pembangkit tenaga listrik, umumnya terdiri dari komponen-komponen sebagai berikut :

### 2.4.1 Panel (Modul) Surya

Panel surya merupakan komponen yang berfungsi untuk mengubah energi sinar matahari menjadi energi listrik. Panel ini tersusun dari beberapa sel surya yang

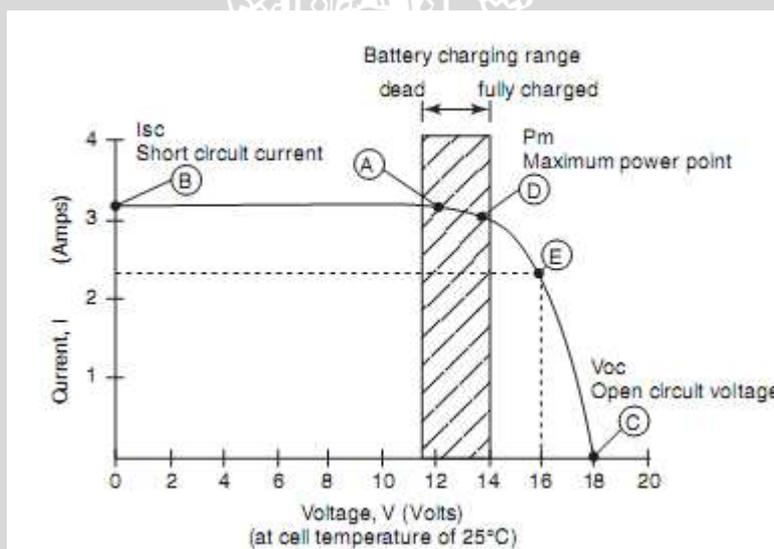
dihubungkan secara seri maupun paralel. Sebuah panel surya umumnya terdiri dari 32 sampai 40 sel surya, tergantung ukuran panel (Quaschnig, 2005). Gabungan dari panel-panel ini akan membentuk suatu *Array* seperti yang terdapat pada Gambar 2.8 dibawah.



Gambar 2.8 Hubungan Sel Surya, Panel Surya dan Array

Sumber : Patel, 1999

Karakteristik arus-tegangan sel surya ditunjukkan pada Gambar 8.9 berikut,



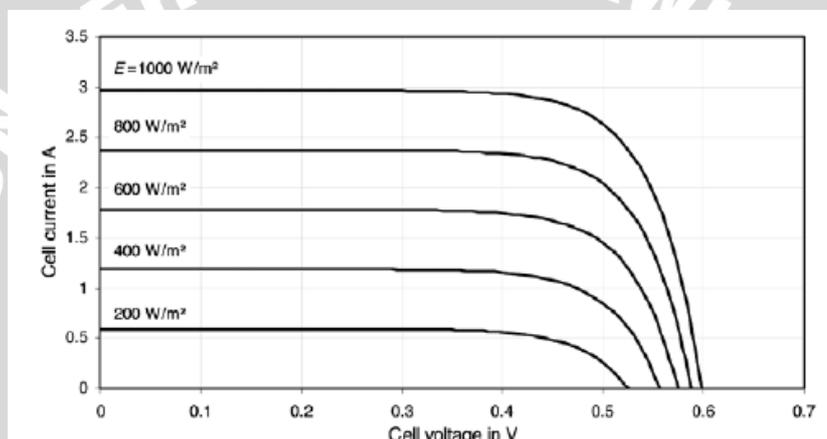
Gambar 2.9 Karakteristik Arus Tegangan dari Solar Sel

Sumber: Hankins, 2010

Pada umumnya kurva arus-tegangan dinyatakan dalam *Standar Test Conditions* (STC) 1000 W/m<sup>2</sup> radiasi (atau disebut satu matahari puncak atau *one peak sun hour*) dan pada suhu 25°. STC juga mewakili kondisi optimal dalam laboratorium. Kurva arus-tegangan terdiri dari tiga hal yang penting *Maximum Power Point* ( $V_{mp}$  dan  $I_{mp}$ ), *Open Circuit Voltage* ( $V_{oc}$ ) dan *Short Circuit Current* ( $I_{sc}$ ). Pada kurva arus-tegangan, *Maximum Power Point*  $V_{mp}$  dan  $I_{mp}$ , adalah titik operasi, dimana modul *photovoltaic* menghasilkan daya keluaran maksimum. Dengan kata lain,  $V_{mp}$  dan  $I_{mp}$  dapat diukur pada saat panel *photovoltaic* pada 25 derajat Celcius dan radiasi 1000 watt per meter

persegi diberi beban. *Open Circuit Voltage* ( $V_{oc}$ ) adalah kapasitas tegangan maksimum yang dapat dicapai pada saat tidak adanya arus. Daya keluaran modul pada saat  $V_{oc}$  ini adalah 0 watt. *Short Circuit Current* ( $I_{sc}$ ) adalah arus maksimum dari modul *photovoltaic* dalam kondisi dengan tanpa resistansi atau *short circuit*. Daya keluaran modul pada saat  $I_{sc}$  ini adalah 0 watt.

Salah satu faktor yang paling berpengaruh terhadap kinerja modul *photovoltaic* adalah intensitas radiasi matahari. Semakin besar intensitas cahaya matahari maka arus yang dihasilkan akan semakin besar. Pada gambar 2.10 terlihat bahwa semakin kecil tingkatan cahaya matahari, maka bentuk dari kurva arus-tegangan menurun. Turunnya kurva ini menunjukkan turunnya arus dan daya, sedangkan tegangan berubah oleh bermacam-macam intensitas cahaya matahari.



Gambar 2.10 Kurva Arus-Tegangan untuk Radiasi Matahari yang Berbeda

Sumber : Quaschnig, 2005

Kapasitas daya modul *photovoltaic* dapat diperhitungkan dengan memperhatikan beberapa faktor, yaitu kebutuhan energi sistem yang disyaratkan, insolasi matahari, dan faktor penyesuaian (*adjustment factor*). Faktor penyesuaian pada kebanyakan instalasi PLTS adalah 1,1. (Bien, 2008:42)

Kapasitas daya modul dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut: (Bien, 2008: 43)

$$\text{Kapasitas modul} = \frac{\text{Energi yang harus dipasang}}{\text{Jumlah jam kerja matahari}} \times \text{faktor penyesuaian} \quad (2.5)$$

Jumlah modul yang digunakan: (Papadopoulou, 2011:119)

$$\text{Jumlah modul} = \frac{\text{kapasitas modul yang dirancang}}{\text{kapasitas modul yang digunakan}} \quad (2.6)$$

#### 2.4.2 Battery Control Regulator

Battery control regulator adalah pengontrol atau otak yang bekerja dari sistim pengisian sel *photovoltaic* ke baterai. Jika baterai sudah terisi penuh maka battery

control regulator akan memutuskan arus dari sel photovoltaic. (Messenger, 2004: 76)



Gambar 2.11 Battery Control Regulator untuk Photovoltaic

Sumber: <http://www.powerbell.co.id>

Battery Control Regulator dapat dinilai oleh banyaknya arus yang dapat ditangani. Peraturan Kode Listrik Nasional mengharuskan Battery Control Regulator mampu menahan 25% dari arus untuk waktu yang terbatas. Semakin besar kapasitas Battery Control Regulator yang digunakan, maka semakin baik sistem tersebut, karena sewaktu-waktu ada ekspansi beban, tidak perlu mengganti Battery Control Regulatornya.

TAMPILAN	INDIKASI
<b>dIAG</b>	Proses diagnosa kondisi Battery
<b>noBt</b>	Kabel terminal Battery tidak terpasang atau tidak ada Battery
<b>12.60</b>	Besarnya tegangan Battery yang diukur. Contoh 12.60 Volt
<b>86.89</b>	Menunjukkan performa Battery Contoh 86.89%
<b>Err1</b>	Error 1: Performa Accu < 80% beberapa sel Battery rusak
<b>Error</b>	Kabel terminal Battery terpasang terbalik positif dan negatifnya
<b>bAd</b>	Battery sangat jelek dan sel tidak bisa menyimpan listrik (Rusak)
<b>FULL</b>	Battery sudah terisi penuh. Proses pengisian Battery selesai.

Gambar 2.12 Indikasi Battery Control Regulator

Sumber: <http://www.powerbell.co.id>

Pada Gambar 2.12 menunjukkan bagaimana tampilan pada Battery Control Regulator. Penunjukkan indikasi yang berbeda akan menentukan bagaimana Battery Control Regulator itu berfungsi dengan baik atau tidak, sehingga pengguna dimudahkan dalam penggunaan Battery Control Regulator ini.

### 2.4.3 Baterai

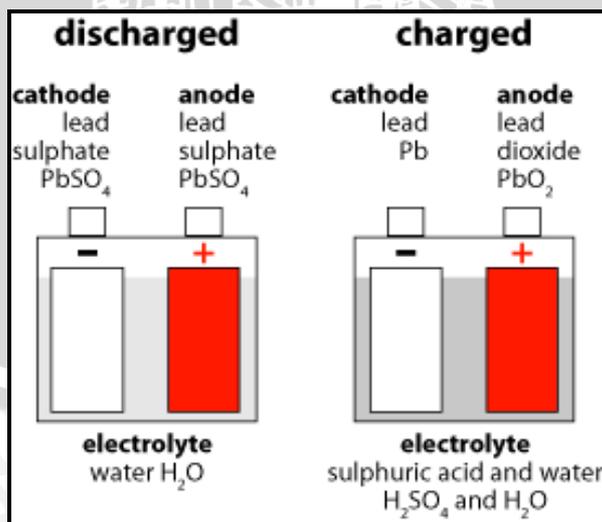
Baterai mengakumulasi kelebihan energi yang dihasilkan oleh sistem pembangkit dan menyimpannya untuk digunakan pada saat tidak ada masukan energi dari sumber lain. Kapasitas baterai untuk menyimpan energi dinilai dalam amp.jam: 1 amp dialirkan selama 1 jam = 1 amp.jam

Baterai adalah komponen sistem photovoltaic yang berfungsi menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh modul photovoltaic pada siang hari, untuk kemudian dipergunakan pada malam hari dan pada saat cuaca mendung. Baterai yang digunakan pada sistem *photovoltaic* mengalami proses siklus mengisi (*charging*) dan mengosongkan (*discharging*), tergantung pada ada tidaknya sinar matahari. (Messenger, 2004: 57)



Gambar 2.13 Contoh Baterai  
Sumber: <http://www.powerbell.co.id>

#### Cara kerja baterai



Gambar 2.14 Diagram Baterai Sesudah dan Sebelum Discharge  
Sumber: <http://www.powerbell.co.id>

Kapasitas suatu baterai menyatakan berapa lama kemampuannya untuk memberikan aliran listrik, pada tegangan tertentu yang dinyatakan dalam ampere-hour (Ah). Kapasitas baterai dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut: (Hankins, 2010: 133)

$$C = \frac{E_M}{V_B \times DOD \times \eta_{total}} \quad (2.7)$$

Keterangan :

C = kapasitas baterai (Ah)

$E_M$  = energi total yang harus disuplai modul photovoltaic (Wh)

$V_B$  = tegangan kerja baterai (volt)

DOD = Tingkat kedalaman pengosongan baterai (%)

$\eta_{total}$  = efisiensi total sistem photovoltaic (%)

#### 2.4.4 Inverter

Pemilihan Inverter tergantung pada apakah inverter akan menjadi bagian dari sistem grid-connected atau sistem yang berdiri sendiri. Kinerja inverter umumnya ditandai dalam hal nilai keluaran daya, kapasitas lonjakan, efisiensi, dan distorsi harmonik. karena efisiensi maksimum dapat dicapai dengan rate keluaran, penting untuk mempertimbangkan efisiensi kurva daya keluaran untuk inverter ketika memilih inverter. (Messenger, 2004: 83)



Gambar 2.15 Contoh Inverter  
Sumber: <http://www.powerbell.co.id>

Tegangan input inverter tergantung pada daya inverter, untuk daya kecil dari sekitar 100 W tegangannya adalah 12 atau 24 V, dan 48 V. Untuk mendapatkan daya yang lebih besar inverter dapat dihubungkan secara paralel. Untuk sistem yang besar, inverter 3-fasa sudah tersedia di pasaran. Pada umumnya inverter sengaja dirancang untuk menghubungkan sistem photovoltaic pada jaringan.

## 2.5 Keuntungan Menggunakan Sistem *Photovoltaic*

Sistem photovoltaic adalah salah satu sumber energi terbarukan yang paling menjanjikan di dunia. Dibandingkan dengan sumber-sumber terbarukan seperti batu bara, gas, minyak, dan nuklir, keuntungan yang jelas (<http://solardirect.com/pv/pv.htm>):

1. Menghasilkan energi gratis dari matahari.
2. Tidak memiliki bagian yang bergerak sehingga membutuhkan perawatan minimal.
3. Energi non-polusi mengurangi emisi, tidak berdampak langsung pada lingkungan.
4. Sel photovoltaic modular, dapat dimulai dengan sistem yang kecil dan berkembang sesuai dengan peningkatan kebutuhan.
5. Sistem memiliki umur panjang dan tahan lama (25-30 tahun).
6. Sistem koneksi grid memungkinkan pengguna untuk menjual kelebihan listrik kembali.
7. Dapat diinstal dan dioperasikan di mana saja termasuk daerah akses sulit dan lokasi terpencil.
8. Membantu melepaskan diri kita dari ketergantungan pada minyak.
9. Sel *photovoltaic* tidak mengeluarkan suara dan asap.
10. Memungkinkan penggunaan listrik di daerah terpencil di mana itu akan mahal atau tidak mungkin untuk menjalankan jaringan listrik.
11. Memiliki kekuatan listrik selama pemadaman.

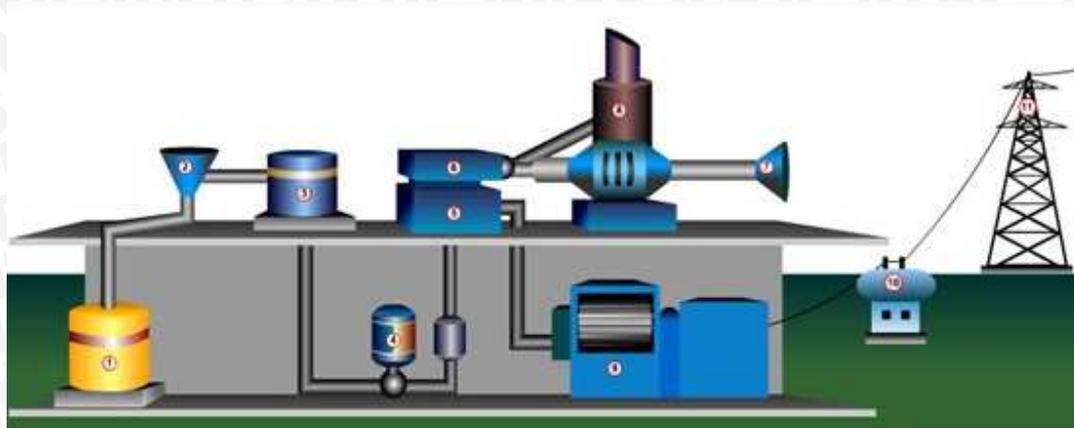
## 2.6 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)

Pembangkit listrik tenaga diesel sesuai untuk diimplementasikan pada lokasi dimana pengeluaran bahan bakar rendah, persediaan air terbatas, minyak sangat murah dibandingkan dengan semua bahan dasar yang biasa digunakan oleh mesin pembangkit dalam kapasitas kecil. Faktor-faktor yang merupakan pertimbangan pilihan yang sesuai untuk PLTD antara lain [Herlina. 2009:19] :

- Jarak dari beban dekat.
- Persediaan areal tanah dan air.
- Pengangkutan bahan bakar.
- Kebisingan dan kesulitan lingkungan.

### 2.6.1 Prinsip Kerja dan Komponen-Komponen PLTD

Bagian-bagian utama pada PLTD adalah mesin (motor) diesel dan generator. Mesin diesel adalah motor yang berfungsi menghasilkan tenaga mekanis untuk dipergunakan dalam memutar rotor generator [Herlina. 2009:19].



Gambar 2.16 Skema Pembangkit Listrik Tenaga Diesel

Sumber: <http://www.pln.co.id>

Komponen-komponen PLTD pada gambar 2.18 meliputi :

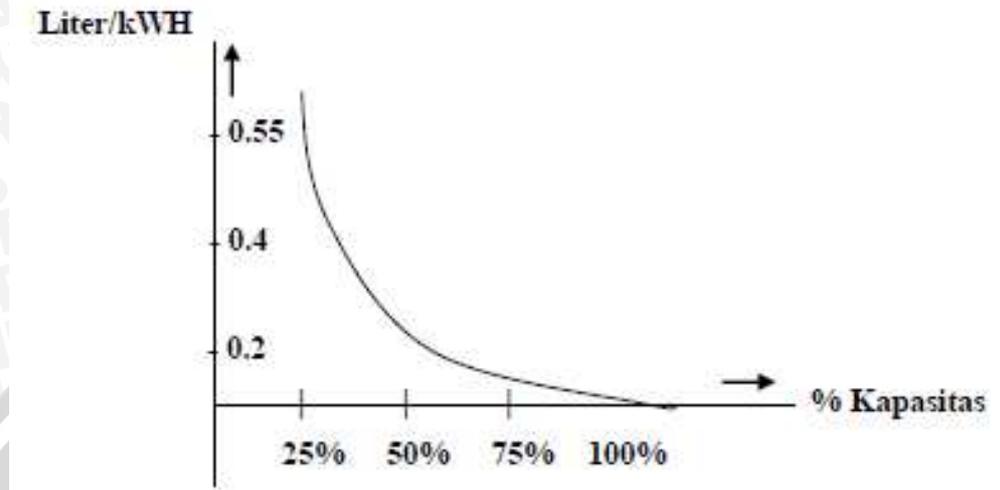
1. *Fuel Tank.*
2. *Fuel oil separator.*
3. *Daily tank.*
4. *Fuel oil booster.*
5. *Diesel motor*, digunakan untuk menghidupkan mesin diesel.
6. *Turbo charger*, menaikkan efisiensi udara yang dicampur bahan bakar.
7. *Air intake filter*, perangkat untuk mengalirkan udara.
8. *Exhaust gas silencer*, peredam dari sisa gas yang digunakan.
9. *Generator*, menghasilkan energi listrik.
10. *Pengubah utama*, alat pengubah untuk menjadi energi listrik.
11. *Jalur transmisi*, penyalur energi listrik ke konsumen.

### 2.6.2 Pemakaian Bahan Bakar Sistem PLTD

Pemakaian bahan bakar dan emisi keluaran bergantung pada hal sebagai berikut:

- Karakteristik mesin.
- Karakteristik transmisi (rasio gear, efisiensi).
- Berat tali pengekang.
- Gaya tarik aerodinamis.
- Tahanan saat mesin berputar.

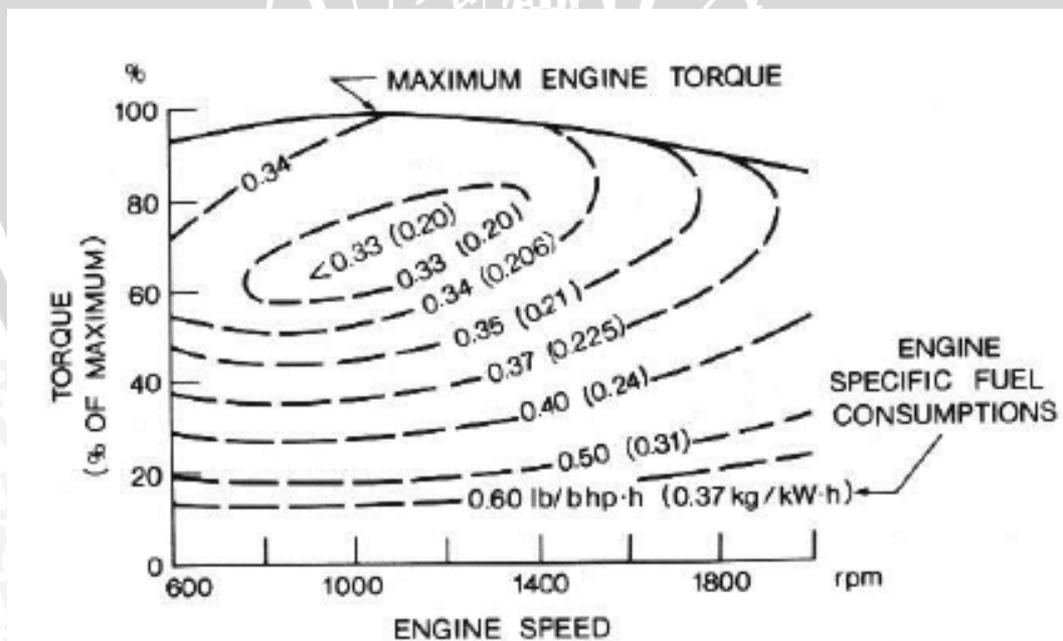
Pemakaian bahan bakar menjadi tidak efisien apabila PLTD dioperasikan dibawah 70% dari kapasitas terpasangnya. Berikut hubungan pemakaian bahan bakar dan kapasitas terpasang dari PLTD ditunjukkan pada gambar 2.19 [Trihadi. 2000: 22].



Gambar 2.17 Pemakaian Bahan Bakar Sistem PLTD

Sumber : Trihadi. 2000

Pada gambar 2.20 juga ditunjukkan hubungan antara torsi dengan kecepatan mesin pada mesin generator diesel, terlihat bahwa nilai TSFC (*Thrust Specific Fuel Consumption*) yang semakin kecil menunjukkan pemakaian bahan bakar semakin efisien (pada nilai 0.33) yaitu pada titik 70%.



Gambar 2.18 Karakteristik Pemakaian Bahan Bakar Generator-Diesel

Sumber : Duysinx. 2012

### 2.6.3 Keunggulan dan Kelemahan PLTD

Berikut ini adalah beberapa keunggulan dan kelemahan apabila menggunakan PLTD sebagai sumber pembangkitan tenaga listrik [Herlina. 2009: 21].

#### Keunggulan PLTD

- Daya listrik yang tersedia dapat disesuaikan dengan kebutuhan.
- Secara teknis lebih handal.
- Layanan purna jual relatif mudah diperoleh.
- Biaya investasi (Rp/kW) relatif murah.

#### Kelemahan PLTD

- Biaya operasi dan pemeliharaan yang mahal.
- Memerlukan transportasi penyediaan dan penyimpanan BBM.
- Menimbulkan polusi udara dan kebisingan.
- Memerlukan pemeliharaan rutin.
- Sistem operasi tidak efisien (boros) pada kondisi beban rendah.

## 2.7 Sistem Pembangkit Listrik Hibrida (PLH)

### 2.7.1 Prinsip Kerja PLH

Dalam sistem hybrid maka generator diesel merupakan komponen wajib yang harus diikutsertakan dalam sistem ini untuk membangkitkan daya selama periode dimana radiasi matahari sangat rendah atau tidak ada sama sekali, menyuplai beban puncak serta untuk mengurangi ukuran array dan battery bank. Karakteristik yang berbeda digunakan dalam membandingkan dengan kinerja generator diesel dimana hal ini termasuk konsumsi bahan bakar, kecepatan mesin, keluaran yang periodik atau kontinyu, level gangguan, dsb. Mesin berkecepatan tinggi berdampak pada pemakaian komponen mesin dengan cepat dan usia kerja yang lebih singkat. Karenanya, generator dengan kecepatan mesin antara 3000 - 3600 rpm hanya dapat digunakan untuk pemakaian singkat saja, sedangkan mesin dengan kecepatan 1500-1800 rpm dapat digunakan secara kontinyu [Bansal N.K. 1995: 829].

Pembangkit tenaga listrik dengan sistem hibrid merupakan sistem paduan yang memanfaatkan sumber energi terbarukan seperti: teknologi energi angin, PV, mikro hidro, biomassa, dan sumber energi terbarukan lainnya. Kombinasi yang paling tepat dari pemanfaatan teknologi hibrid sangat tergantung pada ketersediaan sumber daya energi setempat serta kemampuan finansial untuk investasi [Wachjoe C.K. 1999:33].

Lebih lanjut Wachjoe, C.K. (1999) menjelaskan bahwa pemanfaatan sistem energi hibrid mempunyai beberapa kelebihan seperti:

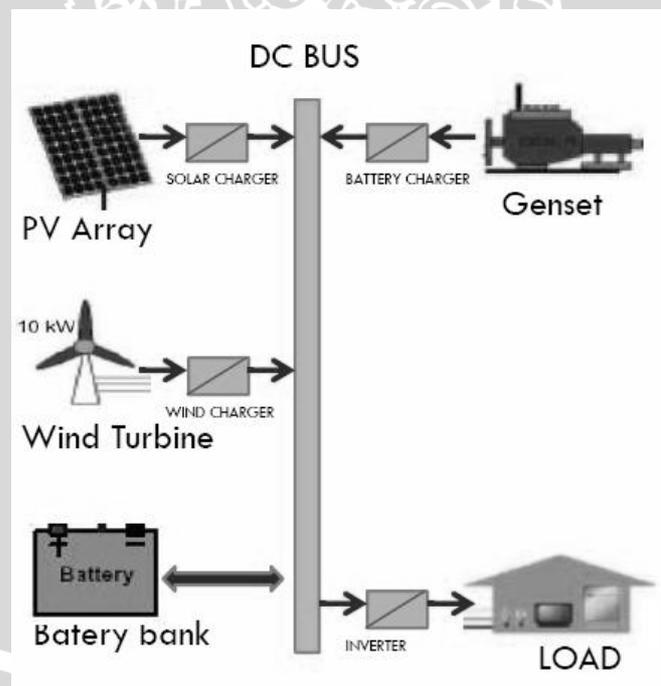
1. Pengoperasian yang lebih efisien pada setiap saat untuk sistem pembangkit
2. Efisiensi pembangkitan menjadi lebih tinggi
3. Mudah diintegrasikan dengan sistem energi terbarukan apapun
4. Ketersediaan dan kontinuitas pelayanan sangat tinggi
5. Tingkat perawatan yang rendah
6. Operator tidak perlu untuk merawat maupun memperbaiki

Selain keuntungan di atas, sistem hibrid juga sangat mudah dan fleksibel karena sistem ini dirancang dengan sistem modul. Sistem ini dapat pula dipadukan dengan sistem yang sudah mapan (seperti PLTD) dan bahkan dengan sistem interkoneksi jaringan regional maupun nasional.

## 2.7.2 Sistem Operasi PLH

### 2.7.2.1 PLH Sistem Serial

#### Prinsip Kerja PLH Sistem Serial



Gambar 2.19 PLH Sistem Serial

Sumber : Rosyid. 2008

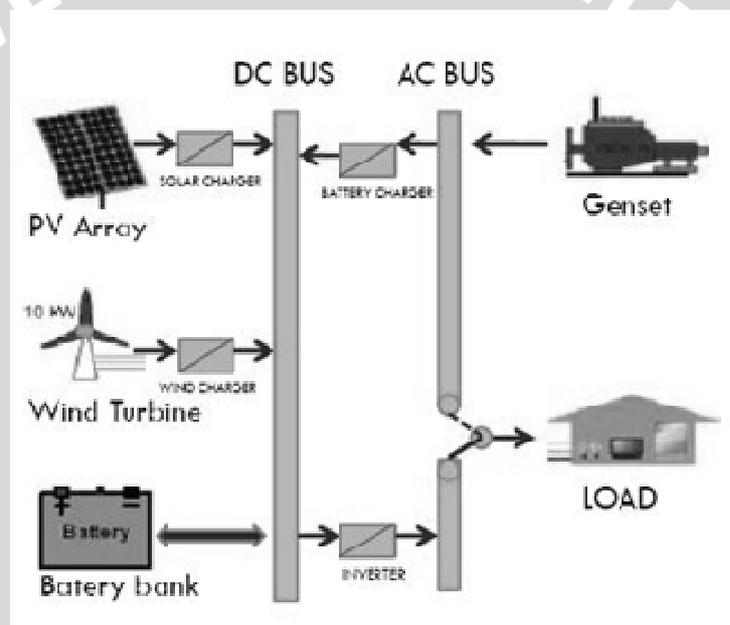
Semua pembangkit daya mensuplai daya DC ke dalam baterai, setiap komponen harus dilengkapi dengan *charge control* sendiri, untuk menjamin operasi yang handal, generator dan inverter harus didesain agar dapat melayani beban puncak. Pada sistem ini sejumlah besar energi yang dibangkitkan dilewatkan melalui baterai, siklus baterai

bank menjadi naik dan mengurangi efisiensi sistem, daya listrik dari genset di DC kan dan diubah kembali menjadi AC sebelum disuplai ke beban sehingga terjadi rugi-rugi yang signifikan.

### 2.7.2.2 PLH Sistem Tersaklar (*Switched*)

#### Prinsip Kerja PLH Sistem Tersaklar

Pada sistem PLH tersaklar (*switched*), genset dan inverter dapat beroperasi sebagai sumber AC, pada sistem yang tidak memiliki operasi paralel, genset dan sumber energi terbarukan dapat mengisi (*charging*) baterai. Pada sistem ini beban dapat langsung disuplai genset sehingga meningkatkan efisiensi total, kelebihan daya dari genset dapat digunakan untuk mengisi baterai, ketika beban rendah genset dipadamkan, beban disuplai dari energi terbarukan bersama energi yang tersimpan.

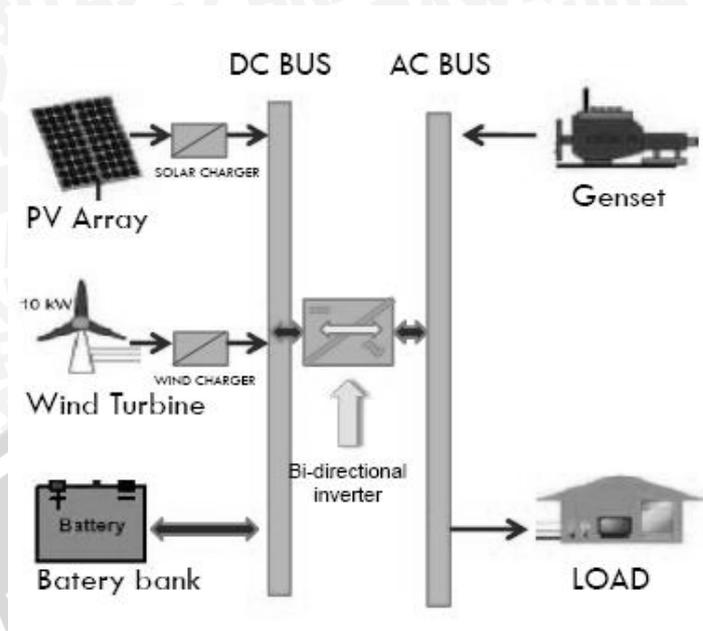


Gambar 2.20 PLH Sistem Tersaklar (*Switched*)  
Sumber : Rosyid, 2008

### 2.7.2.3 PLH Sistem Paralel

#### Prinsip Kerja PLH Sistem Paralel

Pada PLH yang menggunakan sistem ini, beban dapat disuplai baik dari genset maupun inverter secara paralel. *Bi-directional inverter* (BDI) digunakan untuk menjembatani antara baterai dan sumber AC, BDI dapat mengisi baterai dari genset (*AC-DC converter*) maupun sumber energi terbarukan, juga dapat beraksi sebagai *DC-AC converter*, sumber energi terbarukan dihubungkan pada sisi DC.



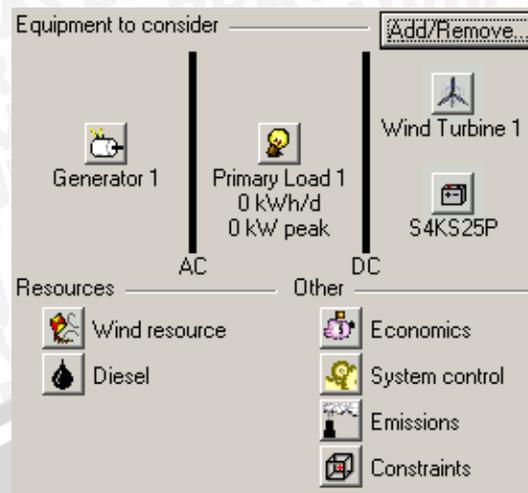
Gambar 2.21 PLH Sistem Paralel

Sumber : Rosyid. 2008

## 2.8 Software HOMER

HOMER adalah suatu model Micropower untuk mempermudah dalam mengevaluasi desain dari jaringan tunggal (*grid-off*) maupun jaringan yang terkoneksi dengan sistem (*grid-connected*). Dalam merancang sistem pembangkit harus diperhatikan mengenai konfigurasi sistem, diantaranya : komponen apa saja yang dimasukkan dalam konfigurasi sistem, berapa banyak dan berapa ukuran masing-masing komponen yang harus digunakan, seperti terlihat pada gambar 2.24. Software HOMER ini menentukan dan menghitung nilai bersih sekarang (*Net Present Cost*, NPC), biaya pembangkitan listrik (*Cost Of Electricity*, COE) dan mengoptimasi berdasarkan nilai NPC terendah [Gilman. 2005:379].

Untuk data yang digunakan, software HOMER dapat memasukkan data pembangkit, peralatan, dan sumber energi baik secara manual ataupun otomatis. Untuk pengambilan data otomatis, yaitu mengambil data yang telah disediakan pada *website* software HOMER, seperti karakteristik angin dan matahari pada daerah tertentu. Sedangkan untuk data manual bisa mengisi pada kolom data yang disediakan oleh software HOMER.



Gambar 2.22 Konfigurasi Sistem pada *Software* HOMER  
Sumber : Lilienthal, 2001

Pada gambar 2.23 dapat dilihat hasil dari perhitungan *software* HOMER, dimana kita bisa mengetahui kelebihan energi yang dihasilkan oleh konfigurasi sistem pembangkit yang kita buat, sehingga pada akhirnya diperlukan perbaikan konfigurasi untuk mengurangi kelebihan energi yang dihasilkan. Hasil NPC juga terlihat pada gambar, yaitu total biaya yang dikeluarkan untuk mengoptimalkan konfigurasi pembangkit yang dibuat.

Simulation Results																																						
System Architecture: 1 Generic 10kW 15 kW Generator 1 8 Trojan L16P		6 kW Inverter 6 kW Rectifier Cycle Charging		Total NPC: \$ 337,194 Levelized COE: \$ 0.850/kWh Operating Cost: \$ 21,614/yr																																		
Cost Summary	Cash Flow	Electrical	G10	Label	Battery   Converter   Emissions   Hourly Data																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Production</th> <th>kWh/yr</th> <th>%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Wind turbine</td> <td>8,337</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>Generator 1</td> <td>32,376</td> <td>80</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>40,712</td> <td>100</td> </tr> </tbody> </table>		Production	kWh/yr	%	Wind turbine	8,337	20	Generator 1	32,376	80	Total	40,712	100	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Consumption</th> <th>kWh/yr</th> <th>%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AC primary load</td> <td>31,025</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>31,025</td> <td>100</td> </tr> </tbody> </table>		Consumption	kWh/yr	%	AC primary load	31,025	100	Total	31,025	100	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Quantity</th> <th>kWh/yr</th> <th>%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Excess electricity</td> <td>7,462</td> <td>18.3</td> </tr> <tr> <td>Unmet electric load</td> <td>0.0000176</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>Capacity shortage</td> <td>0.00</td> <td>0.0</td> </tr> </tbody> </table>		Quantity	kWh/yr	%	Excess electricity	7,462	18.3	Unmet electric load	0.0000176	0.0	Capacity shortage	0.00	0.0
Production	kWh/yr	%																																				
Wind turbine	8,337	20																																				
Generator 1	32,376	80																																				
Total	40,712	100																																				
Consumption	kWh/yr	%																																				
AC primary load	31,025	100																																				
Total	31,025	100																																				
Quantity	kWh/yr	%																																				
Excess electricity	7,462	18.3																																				
Unmet electric load	0.0000176	0.0																																				
Capacity shortage	0.00	0.0																																				
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Quantity</th> <th>Value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Renewable fraction</td> <td>0.205</td> </tr> </tbody> </table>		Quantity	Value	Renewable fraction	0.205																															
Quantity	Value																																					
Renewable fraction	0.205																																					

Gambar 2.23 Hasil Simulasi Konfigurasi Sistem pada *Software* HOMER  
Sumber : Lilienthal, 2011

Pada intinya, *software* ini bekerja berdasarkan tiga langkah, yaitu simulasi, optimasi dan analisis sensitivitas.

- **Simulasi**

*Software* ini akan melakukan simulasi pengoperasian sistem Pembangkit Listrik Hibrida dengan membuat perhitungan keseimbangan energi selama 8.760 jam dalam kurun satu tahun. Untuk setiap jamnya, *software* HOMER membandingkan kebutuhan listrik dan panas dengan energi yang dapat dipasok oleh sistem pada jam tersebut, dan menghitung aliran energi dari dan ke setiap komponen dari sistem. Untuk sistem

dengan baterai atau generator bahan bakar, HOMER juga memutuskan kapan akan mengoperasikan generator dan mengisi atau mengosongkan baterai.

- **Optimasi**

Setelah melalui tahap simulasi, tahapan selanjutnya adalah mengoptimasi semua kemungkinan konfigurasi sistem kemudian diurutkan berdasarkan nilai bersih sekarang (*Net Present Cost*) yang digunakan untuk membandingkan pilihan desain sistem. Adapun persamaan yang digunakan HOMER untuk mengoptimasi sistem adalah sebagai berikut [Gilman. 2005: 398-415].

1. Daya keluaran *photovoltaic* :

$$P_{PV} = f_{PV} Y_{PV} \frac{I_T}{I_S} \quad (2.8)$$

Dimana  $f_{PV}$  adalah faktor penurunan daya pada PV,  $Y_{PV}$  adalah kapasitas terpasang dari PV (kW),  $I_T$  adalah besarnya radiasi matahari ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ) dan  $I_S$  besarnya adalah  $1 \text{ kW}/\text{m}^2$  dimana ini adalah *Standart Test Condition* pada PV.

2. Konsumsi bahan bakar generator :

$$F = F_0 Y_{\text{gen}} + F_1 P_{\text{gen}} \quad (2.9)$$

Dimana  $F_0$  adalah *fuel curve intercept coefficient*,  $F_1$  adalah kemiringan kurva bahan bakar,  $Y_{\text{gen}}$  adalah kapasitas terpasang generator (kW) dan  $P_{\text{gen}}$  adalah daya keluaran dari generator (kW).

3. Biaya tetap generator :

$$C_{\text{gen, fixed}} = C_{\text{om, gen}} + \frac{C_{\text{rep, gen}}}{R_{\text{gen}}} + F_0 Y_{\text{gen}} C_{\text{fuel, eff}} \quad (2.10)$$

Dimana  $C_{\text{om, gen}}$  adalah biaya O&M dalam dolar perjam,  $C_{\text{rep, gen}}$  adalah biaya *replacement* dalam dolar,  $R_{\text{gen}}$  adalah *lifetime* dari generator dalam jam,  $C_{\text{fuel, eff}}$  adalah harga bahan bakar efektif dalam dolar.

4. Biaya *salvage* masing-masing komponen :

$$S = C_{\text{rep}} \frac{R_{\text{rem}}}{R_{\text{comp}}} \quad (2.11)$$

Dimana  $C_{\text{rep}}$  biaya *replacement* dari komponen,  $R_{\text{rem}}$  sisa umur pakai dari komponen, dan  $R_{\text{comp}}$  adalah *lifetime* dari komponen.

5. *Total Net Present Cost (NPC) :*

$$C_{NPC} = \frac{C_{ann,tot}}{CRF(i, R_{proj})} \quad (2.12)$$

Dimana  $C_{ann,tot}$  total biaya tahunan, CRF adalah faktor pengembalian modal,  $i$  adalah suku bunga tahunan dan  $R_{proj}$  adalah masa proyek.

## 6. Faktor pengembalian modal :

$$CRF(i, N) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (2.13)$$

$i$  adalah suku bunga tahunan dan  $N$  adalah jumlah tahun.

7. *Cost of energy/electricity :*

$$COE = \frac{C_{ann,tot}}{E_{prim} + E_{def} + E_{grid,sales}} \quad (2.14)$$

Dimana  $C_{ann,tot}$  adalah total biaya tahunan,  $E_{prim}$  dan  $E_{def}$  masing-masing adalah total beban primer dan total beban tunda yang dipenuhi dalam satu tahun, dan  $E_{grid,sales}$  adalah jumlah energi yang dijual ke jaringan pertahun.

- **Analisis Sensitivitas**

Ketika variabel sensitivitas ditambahkan, HOMER mengulangi proses optimasi untuk setiap variabel sensitivitas yang ditentukan. Misalnya, jika ditetapkan konsumsi beban (kWh/hari) sebagai sensitivitas variabel, maka HOMER akan melakukan simulasi konfigurasi sistem untuk berbagai konsumsi beban tersebut.