

BAB II

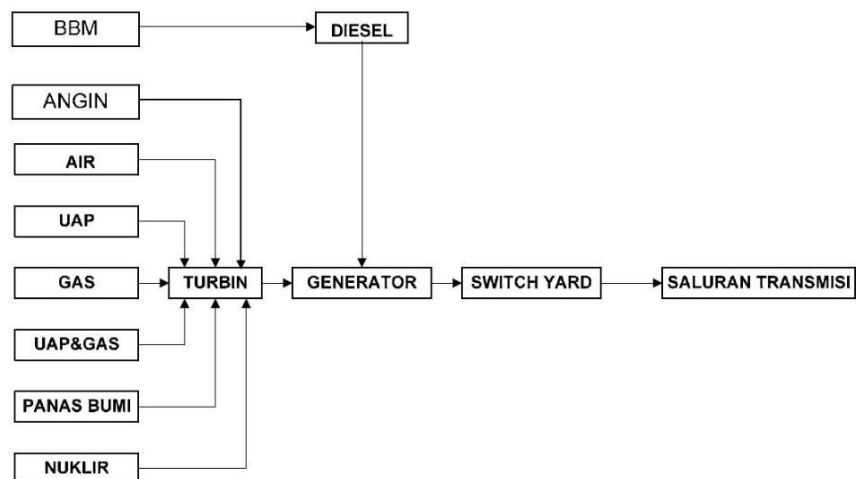
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik

Pembangkit listrik adalah bagian dari alat industri yang dipakai untuk memproduksi dan membangkitkan tenaga listrik dari berbagai sumber tenaga, seperti PLTU, PLTN, PLTA, PLTB, PLTS, PLTH dan lain-lain.

Bagian utama dari pembangkit listrik ini adalah generator, yakni mesin yang berputar yang mengubah energi mekanis menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip medan magnet dan penghantar listrik. Mesin generator ini diaktifkan dengan menggunakan berbagai sumber energi yang sangat bermanfaat dalam suatu pembangkit listrik.¹

2.2 Jenis – Jenis Pembangkit



Gambar 2.1 Jenis – Jenis Pembangkit Listrik

(sumber : BAYANGAN DALAM LUKISAN. Pengenalan Dasar Sistem Tenaga Listrik

<https://bayangandalamlukisan.wordpress.com/2011/05/06/pengenalan-dasar-sistem-tenaga-listrik/> diakses tanggal 2 juni 2019)

¹ British Electricity International (1991). *Modern Power Station Practice: incorporating modern power system practice* (edisi ke-3rd Edition (12 volume set)). Pergamon. ISBN 0-08-040510-X.

2.3 Pembangkit Tenaga Hybrid (PLTH)

Pengertian Hybrid pada umumnya adalah penggunaan dua atau lebih pembangkit listrik dengan sumber energi yang berbeda. Tujuan utama dari sistem hybrid pada dasarnya adalah suatu sistem pembangkit listrik yang memadukan beberapa jenis pembangkit listrik, pada umumnya antara pembangkit berbasis energi baru dan terbarukan.²

Sistem hybrid atau Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTH) merupakan salah satu alternatif sistem pembangkit yang tepat diaplikasikan pada daerah-daerah yang sukar dijangkau oleh sistem pembangkit besar seperti jaringan PLN atau PLTD, PLTH ini memanfaatkan *Renewable Energy* sebagai sumber utama (primer) yang dikombinasi dengan *Solar Cell* sebagai sumber energi cadangan (sekunder).

Pada PLTH, *Renewable Energy* yang digunakan ini untuk penelitian menggunakan dari energi angin, yang dikombinasikan dengan energi matahari sehingga akan menjadi suatu pembangkit yang lebih efisien , efektif dan handal untuk dapat mensuplai kebutuhan energi listrik baik sebagai penerangan rumah atau kebutuhan pendukung untuk industri kecil di daerah yang sukar di jangkau dan memanfaatkan *Renewable Energy*. Dengan adanya kombinasi dari sumber-sumber energi tersebut, diharapkan dapat menyediakan catu daya listrik yang kontinu dengan efisiensi yang paling optimal.

2.4 Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid (PLTH)

PLTH adalah suatu sistem pembangkit listrik yang memadukan beberapa jenis pembangkit listrik, pada umumnya antara pembangkit listrik berbasis energi terbarukan ada pula pembangkit listrik berbasis tenaga angin dengan tenaga matahari.

Merupakan solusi untuk mengatasi krisisnya berbahan fosil dan ketiadaan listrik di daerah terpencil, pulau- pulau kecil dan pada daerah pekotaan, umumnya terdiri atas : modul surya, turbin angin, baterai, dan peralatan kontrol yang

² Ulya. <https://ulyadays.com/pembangkit-listrik-tenaga-hybird/amp/>

reintegrasi. Tujuan PLTH ini adalah mengkombinasi keunggulan dari setiap pembangkit sekaligus menutupi kelemahan masing- masing pembangkit untuk kondisi- kondisi tertentu, sehingga secara keseluruhan sistem dapat beroperasi lebih ekonomis dan efisien. Mampu menghasilkan daya listrik secara efisien pada berbagai kondisi pembebanan.

Untuk mengetahui unjuk kerja sistem pembangkit hybrid ini, hal – hal yang perlu dipertimbangkan antara lain:

karakteristik beban pemakaian dan karakteristik pembangkitan daya khususnya dengan memperhatikan potensi energi alam yang ingin dikembangkan berikut karakteristik kondisi alam itu sendiri, seperti pergantian siang dan malam , kemudian pergantian musim dan sebagainya.

2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah peralatan pembangkit listrik yang mengubah daya matahari menjadi listrik. PLTS sering juga disebut *Solar Cell*, atau Solar Photovoltaik, atau Solar Energi. PLTS memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik. DC (*direct current*), yang dapat diubah menjadi listrik AC (*alternating current*) apabila diperlukan. Oleh karena itu meskipun mendung, selama masih terdapat cahaya, maka PLTS dapat menghasilkan listrik.³

Pembangkit Listrik Tenaga Surya pada dasarnya adalah percatuan daya (alat yang menyediakan daya), dan dapat dirancang untuk mencatu kebutuhan listrik yang kecil sampai dengan besar, baik secara mandiri, maupun dengan Hybrid (dikombinasikan dengan sumber energi lain, seperti PLTS-Genset, PLTS-Angin).

2.6 Cara Kerja PLTS

Pembangkit listrik tenaga surya konsepnya sederhana, yaitu mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik. Cahaya matahari merupakan salah satu bentuk energi dari sumber daya alam. Sumber daya alam matahari ini sudah banyak digunakan untuk memasok daya listrik di satelit komunikasi melalui sel

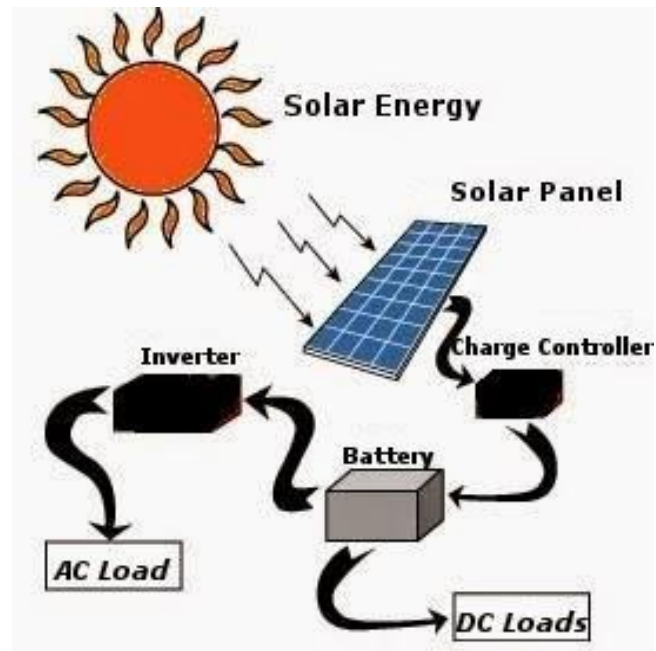
³ <http://repository.untag-sby.ac.id/982/2/BAB%20II.pdf>



surya. Sel surya ini dapat menghasilkan energi listrik dalam jumlah yang tidak terbatas langsung diambil dari matahari, tanpa ada bagian yang berputar dan tidak memerlukan bahan bakar. Sehingga sistem sel surya sering dikatakan bersih dan ramah lingkungan. Bandingkan dengan sebuah generator listrik, ada bagian yang berputar dan memerlukan bahan bakar untuk dapat menghasilkan listrik. Suaranya bising, selain itu gas yang dihasilkan dapat menimbulkan efek gas rumah kaca (*green house gas*) yang pengaruhnya dapat merusak ekosistem planet bumi kita.

Sistem sel surya yang dapat digunakan di permukaan bumi terdiri dari panel sel surya, rangkaian kontroler pengisian (*charge controller*), dan aki (baterai) 12 volt yang *maintenance free*. Panel sel surya merupakan modul yang terdiri dari beberapa sel surya yang dihubungkan seri dan paralel tergantung ukuran dari kapasitas yang diperlukan. Rangkaian kontroler pengisian aki dalam sistem sel surya merupakan rangkaian elektronik yang mengatur proses pengisian akinya. Kontroler ini dapat mengatur tegangan aki dalam selang tegangan 12 volt. Bila tegangan turun sampai 10.8 volt berarti sisa tegangan pada aki 2.2 volt, maka kontroler akan mengisi aki dengan panel surya sebagai sumber dayanya. Tentu saja proses pengisian itu akan terjadi bila berlangsung pada saat ada cahaya matahari. Jika penurunan tegangan terjadi pada malam hari, maka kontroler akan memutuskan pemasokan energi listrik. Setelah proses pengisian itu berlangsung selama beberapa jam, tegangan aki itu akan naik bila tegangan aki itu mencapai 12 volt, maka kontroler akan menghentikan proses pengisian aki itu. Rangkaian kontroler pengisian baterai, sebenarnya mudah untuk dirakit sendiri. Tapi, biasanya rangkaian kontroler ini sudah tersedia dipasaran. Memang harga kontroler itu cukup mahal kalau dibeli sebagai unit sendiri. Kebanyakan sistem sel surya itu hanya dijual dalam bentuk paket lengkap itu jelas lebih murah dibandingkan dengan bila merakit sendiri. Biasanya panel surya itu diletakkan dengan posisi lurus menghadap matahari. Padahal bumi itu bergerak mengelilingi matahari, agar dapat terserap secara maksimum sinar matahari itu harus diusahakan selalu jatuh tegak lurus pada permukaan panel surya.

Bahan sel surya sendiri terdiri dari kaca pelindung dan material *adhensive* transparan yang melindungi bahan sel surya dari keadaan lingkungan kemudian material anti-refleksi untuk menyerap lebih banyak cahaya dan mengurangi jumlah cahaya yang dipantulkan, semikonduktor P-type dan N-type (terbuat dari campuran silikon) untuk menghasilkan medan listrik, saluran awal dan saluran akhir (terbuat dari logam tipis) untuk mengirim elektron ke perabot listrik. Cara kerja sel surya sendiri sebenarnya identik dengan piranti semikonduktor dioda. Ketika cahaya bersentuhan dengan sel surya dan diserap oleh bahan semikonduktor, terjadi pelepasan elektron. Apabila elektron tersebut bisa menempuh perjalanan menuju bahan semi-konduktor pada lapisan yang berbeda, terjadi perubahan sigma gaya-gaya pada bahan. Gaya tolakan antar bahan semikonduktor, menyebabkan aliran medan magnet listrik. Dan menyebabkan elektron dapat disalurkan ke saluran awal dan akhir untuk digunakan pada perabot listrik



Gambar 2.2 Sistem Instalasi Menggunakan Solar cell

(sumber : <http://repository.untag-sby.ac.id/982/2/BAB%20II.pdf>, 2 juni 2019)



2.7 Daya Listrik

Misalkan suatu potential v dikenakan ke suatu beban dan mengalirlah arus. Energi yang diberikan ke masing-masing elektron yang menghasilkan arus listrik sebanding dengan v (beda potensial). Dengan demikian total energi yang diberikan ke sejumlah elektron yang menghasilkan total muatan sebesar dq adalah sebanding dengan $v \times dq$. Energi yang diberikan pada elektron tiap satuan waktu di definisikan sebagai daya (power) p sebesar

$$P = v \, dq/dt = v i \dots\dots\dots (2.1)$$

Daya didefinisikan sebagai laju hantaran energi listrik dalam sirkuit listrik. Satuan international daya listrik adalah Watt yang menyatakan banyaknya tenaga listrik yang mengalir per satuan waktu (joule/detik) dan dirumuskan sebagai berikut:

$$P = V \cdot I \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan :

P = adalah daya (watt atau W)

I = adalah arus (ampere atau A)

V = adalah perbedaan potensial (volt atau V).

2.8 STC (*Standart Test Condition*)

Kinerja output listrik dari silikon kristal dan modul panel surya umumnya diukur dalam kondisi uji standar (STC), memastikan perbandingan relatif dan evaluasi output dari modul panel surya yang berbeda.

STC adalah standar industri-lebar untuk menunjukkan kinerja modul panel dan menentukan suhu sel 25°C dan radiasi $1000 \text{ W} / \text{m}^2$ dengan massa udara 1,5 (AM1.5) spektrum. Ini sesuai dengan radiasi dan spektrum insiden sinar matahari pada hari yang cerah pada permukaan yang menghadap ke matahari 37° dengan matahari pada sudut $41,81^\circ$ di atas cakrawala.

Kondisi ini kira-kira mewakili matahari siang dekat musim semi dan musim gugur ekuinoks di benua Amerika Serikat dengan permukaan sel yang ditujukan langsung pada matahari. Namun, kondisi ini jarang dijumpai di dunia nyata. Pengukuran kinerja berbasis STC diterapkan dalam tes flash dari banyak produsen.

2.9 Energi Surya

Energi surya adalah energi yang didapat dengan mengubah energi panas surya (matahari) melalui peralatan tertentu menjadi sumber daya dalam bentuk lain. Energi surya menjadi salah satu sumber pembangkit daya selain air, uap, angin, biogas, batu bara, dan minyak bumi.⁴

Teknik pemanfaatan energi surya mulai muncul pada tahun 1819, ditemukan oleh A.C. Becquerel. Dalam penggunaan kristal silikon yaitu untuk mengkonversikan radiasi matahari, namun sampai tahun 1955 metode ini belum banyak dikembangkan. Selama kurun waktu lebih dari satu abad itu, sumber energi yang banyak digunakan adalah minyak bumi dan batu bara. Upaya pengembangan kembali cara memanfaatkan energi surya baru muncul lagi pada tahun 1958. Sel silikon yang dipergunakan untuk mengubah energi surya menjadi sumber daya mulai diperhitungkan sebagai metode baru, karena dapat digunakan sebagai sumber daya bagi satelit luar angkasa.

2.10 Panel Surya

Panel Surya adalah alat yang terdiri dari sel surya yang mengubah cahaya menjadi listrik, yaitu disebut surya atas matahari atau “sol” karena matahari merupakan sumber cahaya terkuat yang dapat dimanfaatkan. Panel Surya sering kali disebut fotovoltaik, fotovoltaik dapat diartikan sebagai “cahaya-listrik”. Sel Surya atau sel PV bergantung pada efek fotovoltaik untuk menyerap energi matahari dari penyebab arus mengalir antara dua lapisan bermuatan yang berlawanan.

⁴ <http://repository.untag-sby.ac.id/982/2/BAB%20II.pdf>

Jumlah penggunaan panel surya di porsi pemroduksian listrik dunia sangat kecil, tertahan oleh biaya tinggi per wattnya dibandingkan dengan bahan bakar fosil-dapat lebih tinggi sepuluh kali lipat, tergantung keadaan. Mereka telah menjadi rutin dalam beberapa aplikasi yang terbatas seperti, menjalankan “buoy” atau alat di gurun dan area terpencil lainnya, dan dalam eksperimen mereka telah digunakan untuk memberikan tenaga untuk mobil balap dalam kontes seperti Tantangan surya dunia di Australia.

Jenis panel surya :

1. *Polycrystalline*

Merupakan panel surya yang memiliki susunan kristal acak. Tipe *polycrystalline* memerlukan luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan jenis *monocrystalline* untuk menghasilkan daya listrik yang sama, akan tetapi dapat menghasilkan listrik pada saat mendung.



Gambar 2.3 Panel Surya *Polycrystalline*

(sumber :<http://repository.untag-sby.ac.id/982/2/BAB%20II.pdf>, 2 juni 2019)

2. *Monocrystalline*

Merupakan panel surya yang paling efisien, menghasilkan daya listrik persatuan luas yang paling tinggi. Memiliki efisiensi sampai dengan 24%. Kelemahan dari panel ini adalah tidak akan berfungsi baik ditempat yang cahaya matahari kurang (teduh), efisiensinya akan turun drastis dalam cuaca berawan.



Gambar 2.4 Panel surya *Monocrystalline*

(sumber : <http://repository.untag-sby.ac.id/982/2/BAB%20II.pdf>, 2 juni 2019)

3. Panel Surya *Amorf*

Panel Surya *Amorf* Adalah tidak benar-benar kristal, tetapi lapisan tipis silicon diendapkan pada bahan dasar seperti logam atau gelas untuk membuat panel surya. Amorf paduan dari silikon dan karbon (*amorf* silikon karbida juga dihidrogenasi, $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{H}$) adalah varian yang menarik. Pengenalan atom karbon menambahkan ekstra derajat kebebasan untuk mengontrol sifat-sifat materi. Film ini juga bisa dibuat transparan untuk cahaya tampak.

Peningkatan konsentrasi karbon dalam paduan memperlebar kesenjangan elektronik antara konduksi dan valensi band (juga disebut “gap optik” dan celah pita). Hal ini berpotensi dapat meningkatkan efisiensi cahaya dari sel surya yang dibuat dengan *amorf* karbida lapisan *silicon*. Disisi lain, sifat elektronik sebagai semikonduktor (terutama mobilitas elektron), yang terpengaruhi oleh isi

meningkatnya karbon dalam paduan, karena gangguan meningkat pada jaringan atom.



Gambar 2.5 Panel Surya *Amorf*

(sumber : <http://repository.untag-sby.ac.id/982/2/BAB%20II.pdf> , 2 juni 2019)

Beberapa studi ditemukan dalam literatur ilmiah, terutama menyelidiki efek parameter deposisi pada kualitas elektronik, tetapi aplikasi praktis dari karbida silikon amorf pada perangkat komersial masih kurang.

2.11 *Photovoltaic*

Photovoltaic berasal dari bahasa Yunani, foto yang artinya cahaya dan voltaik yang artinya listrik. Dinamakan oleh fisikawan Italia yang bernama volta setelah satuan pengukuran volt yang ditetapkan. Istilah ini digunakan di negara Inggris sejak tahun 1849.⁵

Photovoltaic terdiri dari lapisan semikonduktor tipe-p yaitu bahan semikonduktor yang didalamnya terdapat hole sebagai pembawa muatan mayoritasnya dan lapisan semikonduktor tipe-n memiliki elektron sebagai pembawa muatan mayoritasnya. Keduanya didapat dari hasil pen-dopingan semikonduktor yang sama dengan bahan doping yang berbeda. Kedua lapisan ini merupakan lapisan pembentuk fotovoltaiik.

Dalam *Photovoltaic* terdapat medan listrik. Medan listrik ini terdapat didaerah depletion layer. Tegangan yang dihasilkan oleh fotovoltaiik sangat bergantung terhadap besarnya medan listrik dan dengan fungsi muatan total yang

⁵ <http://repository.untag-sby.ac.id/982/2/BAB%20II.pdf>



ada di dalam fotovoltaiik sangat tergantung terhadap jarak antara batas bertemunya kedua lapisan dengan batas terjauh dari depletion layer.

Foton pada cahaya yang diserap fotovoltaiik menyebabkan electron-electron tereksitasi. Hasilnya terdapat fotogenerasi dari pembawa , muatan yang berada didalam lapisan semikonduktor tipe-p dan tipe-n fotovoltaiik. Arus yang dihasilkan adalah arus *direct current* (DC), yang dihasilkan oleh fotovoltaiik adalah.

$$i = e \left(\exp \frac{e.v}{kT} - 1 \right) \left(\frac{n o D e t}{L_e^2} + \frac{P o D h}{L_e} \right) - e.g \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan :

g = elektron dan hole/satuan luas

v = tegangan p dan n

k = konstanta Boltzam

T = temperatur fotovoltaiik

L = panjang difusi electron dan lubang

D = konstanta difusi elektron dan lubang

Dengan g adalah banyaknya pasangan elektron dan holes per satuan luas dam V adalah nilai tegangan pada sambungan antara lapisan p dan n, e adalah muatan elementer pada fotovoltaiik. K adalah konstanta Boltzman. T adalah temperatur lapisan fotovoltaiik, L adalah panjangnya difusi dari elektron dan lubang, D adalah konstanta difusi elektron dan lubang, n dan p merupakan nilai konsentrasi permukaan sebagai pembawa muatan minoritas.

Tegangan yang dihasilkan oleh fotovoltaiik bergantung pada medan listrik pada daerah *depletion layer*, medan listrik ini terjadi akibat interaksi muatan-muatan yang berada didalamnya. Sehingga definisi dari tegangan yang dihasilkan adalah.

$$V = \left(\frac{e}{2 \Sigma o \Sigma r} \right) (N D d n^2 + N A d p^2) \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan :

V = tegangan



e = besar muatan

ND dan NA = atom donor dan atom akseptor

dp dan dn = lapisan tipe-n dan tipe-p

2.12 Modul Sel Surya

Modul sel surya adalah sekumpulan modul yang saling dihubungkan secara seri, paralel atau kombinasi keduanya untuk memperoleh suatu nilai tegangan, arus, dan daya tertentu.

Jumlah modul yang dihubungkan paralel ditentukan oleh nilai tegangan yang dibutuhkan, sedangkan untuk menentukan nilai arus dilakukan pemasangan seri

$$I_s = \frac{V_{IMV}}{V_{MF}} \dots\dots\dots (2.5)$$

Keterangan:

J_s = jumlah seri modul PV

V_{INV} = tegangan masukan inverter (Volt)

V_{MF} = tegangan maksimum modul PV (Volt)

Sehingga tegangan modul sel surya (V_{GPV}) adalah:

$$v_{GPV} = J_s \cdot V_{MF} \dots\dots\dots (2.6)$$

Untuk memperoleh daya total sebesar P_{GPV} , maka dibutuhkan jumlah string,

$$I_p = \frac{P'_{GPV}}{G_{GV} \cdot I_{MF}} \dots\dots\dots (2.7)$$

Keterangan:

J_p = jumlah string modul PV

P'_{GPV} = daya modul sel surya (Watt)

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

I_{MF} = arus maksimum modul PV (ampere)

$$I_p = I_s : I_b \dots\dots\dots(2.8)$$

I_p = lama pemakaian (Jam)

I_s = arus sumber (Amp)

I_b = arus beban (Amp)

2.13 Analisa Energi Solar

Photovoltaic pada umumnya mempunyai hambatan parasitik seri dan hambatan shunt yang berpengaruh pada penurunan efisiensi.

Persamaan model diode tunggal yang digunakan untuk menggambar arus operasional yang dihasilkan modul PV dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$I = I_0 \left(\exp \left(\frac{V+IR_s}{N_s n_t V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}}$$

$$= I_L - I_0 \left(\exp \left(\frac{V+IR_s}{mV_t} \right) - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dengan I_L arus yang dibangkitkan cahaya (A), I_0 arus jenuh balik pada sambungan diode p-n (A), R, hambatan seri pada sel PV (ohm), R_{sh} hambatan *shunt* se PV (ohm), N_s jumlah sel yang tersusun seri, n_1 aktor ideal diode dan $m=N_s N_1$ parameter tunggal dan V_t tegangan ternal (v) yang dinyatakan sebagai berikut :

Dengan T_c temperatur sel (K), k konstanta Boltzmann (JK^{-1}) dan q muatan elektron (C), hambatan shunt atau hambatan paralel menunjukkan arus yang bocor pada sambungan p-n dioda.

2.14 Sel Surya

Sel Surya atau *Solar Cell* adalah suatu perangkat atau komponen yang dapat mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip efek *Photovoltaic*. Yang dimaksud dengan Efek *Photovoltaic* adalah suatu fenomena dimana munculnya tegangan listrik karena adanya hubungan atau kontak dua elektroda yang dihubungkan dengan sistem padatan atau cairan saat mendapatkan energi cahaya. Oleh karena itu, Sel Surya atau *Solar Cell* sering



disebut juga dengan Sel *Photovoltaic* (PV). Efek *Photovoltaic* ini ditemukan oleh Henri Becquerel pada tahun 1839.⁶

2.15 *Charge Controller*

Solar Charge Controller adalah peralatan elektronik yang digunakan untuk mengatur arus searah yang diisi ke baterai dan diambil dari baterai ke beban. *Solar charge controller* mengatur *overcharging* (kelebihan pengisian karena batere sudah 'penuh') dan kelebihan voltase dari panel surya / *solar cell*. Kelebihan voltase dan pengisian akan mengurangi umur baterai.⁷

Full charge dan low voltage cut.

Seperti yang telah disebutkan di atas *solar charge controller* yang baik biasanya mempunyai kemampuan mendeteksi kapasitas baterai. Bila baterai sudah penuh terisi maka secara otomatis pengisian arus dari panel surya / *solar cell* berhenti. Cara deteksi adalah melalui monitor level tegangan baterai. *Solar charge controller* akan mengisi baterai sampai level tegangan tertentu, kemudian apabila level tegangan *drop*, maka baterai akan di isi kembali.

Solar Charge Controller biasanya terdiri dari : 1 input yang terhubung dengan *output panel surya / solar cell*, 1 output yang terhubung dengan baterai dan 1 output yang terhubung dengan beban (*load*). Arus listrik DC yang berasal dari baterai tidak mungkin masuk ke panel sel surya karena biasanya ada '*diode protection*' yang hanya melewatkan arus listrik DC dari panel surya ke baterai, bukan sebaliknya.

⁶ <http://repository.untag-sby.ac.id/982/2/BAB%20II.pdf>

⁷ <http://repository.untag-sby.ac.id/982/2/BAB%20II.pdf>

2.16 Cara Kerja Charge Controller

Charge controller, adalah komponen penting dalam pembangkit listrik tenaga surya. *Charge controller* berfungsi untuk :

1. *Charging mode* : Mengisi baterai (kapan baterai diisi, menjadi pengisian kalau baterai penuh), dalam *charging mode*, umumnya baterai diisi dengan *metode three stage charging*:
 - a) *Fase bulk* : baterai akan *di-charge* sesuai dengan teganan setup (*bulk* - antara 14.4 - 14.6 Volt) dan arus diambil secara maksimum dari panel surya. Pada saat baterai sudah pada tegangan setup (*bulk*) dimulailah *fase absorption*.
 - b) *Fase absorption* : pada fase ini, tegangan baterai akan dijaga sesuai dengan tegangan *bulk*, sampai *solar charge controller* timer (umumnya satu jam) tercapai, arus yang dialirkan menurun sampai tercapai kapasitas dari baterai.
 - c) *Fase float* : baterai akan dijaga pada tegangan *float setting* (umumnya 13.4 – 13.7 Volt). Beban yang terhubung ke baterai dapat menggunakan arus maksimum dari panel surya pada stage ini.
2. *Operation mode* : Penggunaan baterai ke beban (pelayanan baterai ke beban diputuskan kalau baterai sudah mulai kosong “kosong”). Pada metode ini, baterai akan melayani beban. Apabila ada *over-discharge* ataupun *over-load*, maka baterai akan dilepaskan dari beban.

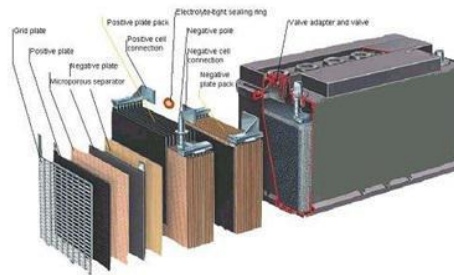
Kedua komponen hal ini berguna untuk mencegah kerusakan dari sebuah baterai.

2.16 Baterai

Baterai merupakan sebuah peralatan yang dapat mengubah energi Baterai listrik adalah alat yang terdiri dari 2 atau lebih sel elektrokimia yang mengubah energi kimia yang tersimpan menjadi energi listrik. Tiap sel memiliki kutub positif (katoda) dan kutub negatif (anoda). Kutub yang bertanda positif menandakan bahwa memiliki energi potensial yang lebih tinggi daripada kutub

bertanda negatif. Kutub bertanda negatif adalah sumber elektron yang ketika disambungkan dengan rangkaian eksternal akan mengalir dan memberikan energi ke peralatan eksternal. Ketika baterai dihubungkan dengan rangkaian eksternal, elektrolit dapat berpindah sebagai *ion* didalamnya, sehingga terjadi reaksi kimia pada kedua kutubnya. Perpindahan *ion* dalam baterai akan mengalirkan arus listrik keluar dari baterai sehingga menghasilkan kerja. Meski sebutan baterai secara teknis adalah alat dengan beberapa sel, sel tunggal juga umumnya disebut baterai.⁸

Baterai untuk *solar cell* sendiri mempunyai dua tujuan penting dalam sistem fotovotai; pertama adalah untuk memberikan daya listrik kepada sistem ketika daya tidak disediakan oleh array panel – panel surya, kedua adalah untuk menyimpan kelebihan daya yang ditimbulkan oleh panel – panel setiap kali daya itu melebihi beban.



Gambar 2.6 Baterai untuk Sel Surya

(sumber : <http://repository.untag-sby.ac.id/982/2/BAB%20II.pdf>, 2 juni 2019)

2.1 & State of Charge

SOC didefinisikan sebagai rasio total kapasitas energi yang dapat digunakan dari sebuah baterai dengan kapasitas baterai seluruhnya. SOC menggambarkan energi yang tersedia dan dituliskan dalam presentase sesuai beberapa referensi, terkadang dianggap sebagai nilai kapasitas dari baterai. Cara mengukur SOC dari baterai dapat dilakukan dengan 3 cara yaitu:

1. Pengukuran secara langsung, dapat dilakukan jika baterai dapat *discharge* pada nilai yang konstan dan pengukuran

⁸ <http://repository.untag-sby.ac.id/982/2/BAB%20II.pdf>

2. Pengukuran *Specific Gravity* (SG), cara ini bergantung pada perubahan pengukuran dari berat bahan kimia aktif.
3. Perkiraan SOC berdasarkan tegangan, dengan mengukur tegangan sel baterai sebagai dasar untuk perhitungan SOC atau sisa kapasitas. Hasil dapat berubah tergantung pada level tegangan nyata, suhu, nilai discharge, dan umur sel.

2.19 Inverter

Inverter adalah sebuah alat yang mengubah listrik DC (*Direct Current*) dari baterai atau panel sel surya menjadi AC (*Alternating Current*). Penggunaan inverter dari dalam Pembangkit Tenaga Listrik (PLTS) adalah untuk perangkat yang menggunakan AC (*Alternating Current*), misalnya untuk penerangan peralatan elektronik seperti komputer, peralatan komunikasi, TV, dll. Inverter dapat digunakan di rumah dan semua tempat yang memerlukan energi (listrik) cadangan untuk mengganti listrik PLN.⁹

Inverter digunakan ketika peralatan Anda memerlukan daya AC. Inverter memotong dan membalikkan arus DC untuk membangkitkan gelombang segi empat yang nantinya disaring menjadi gelombang sinus yang disesuaikan dan menghapus harmonik yang tidak diinginkan. Sangat sedikit inverter yang menyediakan gelombang sinus yang murni sebagai output. Kebanyakan model yang tersedia dipasar menciptakan apa yang diketahui sebagai “gelombang sinus yang termodifikasi”, karena output tegangan mereka bukanlah sinusoid yang murni. Ketika kita memikirkan efisiensi, gelombang sinus yang termodifikasi berkinerja lebih baik dari pada inverter sinusoidal yang murni.

⁹ <http://repository.untag-sby.ac.id/982/2/BAB%20II.pdf>



Gambar 2.7 Inverter

(sumber : <http://repository.untag-sby.ac.id/982/2/BAB%20II.pdf>, 2 juni 2019)

Ketahui bahwa tidak semua peralatan akan menerima gelombang sinus yang termodifikasi sebagai tegangan output. Secara umum, beberapa printer laser tidak akan bekerja dengan gelombang sinus inverter yang termodifikasi. Mesin akan tetap berfungsi, tetapi mereka mungkin memakan lebih banyak daya daripada jika mereka diberi input dengan gelombang sinus murni. Selain ini, power supply DC cenderung semakin memanas, dan pengeras audio dapat mengeluarkan bunyi berdengung.

2.19 Beban

Beban merupakan suatu peralatan yang mengkonsumsi daya yang dihasilkan oleh sumber daya. Beban ini misalnya seperti lampu, kipas, alat elektronik dll. Pada keseluruhan sistem, total daya adalah jumlah semua daya aktif dan reaktif yang dipakai oleh peralatan yang menggunakan energi listrik. Jadi dalam penggunaan rumah tangga, total beban listrik adalah total semua daya yang dikonsumsi oleh peralatan listrik tersebut yang aktif, karena dalam kondisi mati peralatan tentu tersebut tidak menggunakan daya listrik.¹⁰

2.20 Suhu Panas dari Matahari

Matahari adalah sumber energi bagi kehidupan. Matahari memiliki banyak manfaat dan peran yang sangat penting bagi kehidupan seperti:

1. Panas Matahari memberikan suhu yang pas untuk kelangsungan

¹⁰ <http://repository.untag-sby.ac.id/982/2/BAB%20II.pdf>

hidup organisme di Bumi. Bumi juga menerima energi Matahari dalam jumlah yang pas untuk membuat airtetap berbentuk cair, yang mana merupakan salah satu penyokong kehidupan. Selain itu panas Matahari memungkinkan adanya angin, siklus hujan, cuaca, dan iklim.

2. Cahaya Matahari dimanfaatkan secara langsung oleh tumbuhan berklorofil untuk melangsungkan fotosintesis, sehingga tumbuhan dapat tumbuh serta menghasilkan oksigen dan berperan sebagai sumber pangan bagi hewan dan manusia. Makhluk hidup yang sudah mati akan menjadi fosil yang menghasilkan minyak Bumi dan batu bara sebagai sumber energi. Hal ini merupakan peran dari energi Matahari secara tidak langsung

3. Pembangkit listrik tenaga Matahari adalah moda baru pembangkit listrik dengan sumber energi terbarukan. Pembangkit listrik tenaga Matahari adalah moda baru pembangkit listrik dengan sumber energi terbarukan. Panas yang ditangkap kemudian digunakan untuk menghasilkan uap panas bertekanan, yang akan dipakai untuk menjalankan turbin sehingga energi listrik dapat dihasilkan. Prinsip panel surya adalah penggunaan sel surya atau Sel *photovoltaic* yang terbuat dari silikon untuk menangkap sinar Matahari. Sel surya sudah banyak dipakai untuk kalkulator tenaga surya. Panel surya sudah banyak dipasang di atap bangunan dan rumah di daerah perkotaan untuk mendapatkan listrik dengan gratis.

2.21 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu / Angin (PLTB) merupakan pembangkit listrik yang menggunakan energi angin dan merubahnya ke energi listrik. Angin akan memutar sudut turbin, kemudian memutar sebuah poros yang dihubungkan dengan generator, lalu menghasilkan listrik. Listrik dialirkan melalui kabel transmisi dan didistribusikan ke rumah-rumah, kantor, sekolah, dan sebagainya. Pembangkit listrik tenaga angin membutuhkan baterai untuk menunjang kontinuitas penyaluran daya dari pembangkit ke beban, karena perubahan kecepatan angin bisa terjadi setiap waktu. Oleh sebab itu diperlukan baterai untuk

menyimpan energi listrik yang pengisiannya dilakukan oleh pembangkit listrik tenaga angin tersebut. Gambar 2.2 menunjukkan rangkaian pembangkit listrik tenaga angin.¹¹



Gambar 2.8 Komponen PLTB skala rumahan

(sumber : LEGENDA. Pembangkit Listrik memanfaatkan Tenaga angin

<https://sanfordlegenda.blogspot.com/2013/09/Pembangkit-listrik-memanfaatkan-tenaga-angin.html>, 4 juni 2019

Gambar 2.8 menggambarkan komponen PLTB, komponen – komponen tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Turbin angin dan Generator, atau kincir angin berfungsi sebagai penggerak generator yang digerakkan oleh tenaga angin, kemudian generator berfungsi untuk menghasilkan listrik.
2. *Controller*, *controller* pada PLTB ini berfungsi untuk mengatur pengisian daya ke baterai.
3. Baterai, berfungsi untuk menjaga kontinuitas penyaluran daya.
4. *Inverter*, *inverter* berfungsi untuk mengubah arus DC ke arus bolak balik untuk menyuplai beban.

2.22 Kecepatan Angin

Hal yang biasanya dijadikan patokan untuk mengetahui potensi angin adalah kecepatannya. Biasanya yang menjadi masalah adalah kestabilan kecepatan angin. Sebagaimana diketahui, kecepatan angin akan berfluktuasi terhadap waktu dan

¹¹ <http://digilib.unila.ac.id/14243/20/15.Bab%202.pdf>

tempat. Misalnya di Indonesia, kecepatan angin pada siang hari bisa lebih kencang dibandingkan malam hari. Pada beberapa lokasi bahkan pada malam hari tidak terjadi gerakan udara yang signifikan, untuk situasi seperti ini, perhitungan rata – rata dapat dilakukan dengan catatan pengukuran angin secara kontinyu. Udara yang bergerak terlalu dekat dengan permukaan tanah, kecepatan angin diperoleh akan kecil sehingga daya yang dihasilkan sangat sedikit. Semakin tinggi akan semakin baik. Pada keadaan ideal, untuk memperoleh kecepatan angin di kisaran 5 – 7 m/s, umumnya di perlukan ketinggian 5 - 12 m.¹²

Faktor lain yang perlu diperhatikan untuk turbin angin konvensional adalah desain baling baling. Untuk baling baling yang besar (misalnya dengan diameter 20), kecepatan angin pada ujung baling baling bagian atas kira – kira 1,2 dari kecepatan angin ujung baling baling bagian bawah. Artinya ujung baling baling pada saat diatas akan terkena gaya dorong yang lebih besar dari pada saat di bawah. Hal ini diperhatikan pada saat mendesain kekuatan baling baling dan tiang (menara) khususnya pada turbin angin yang lebih besar, jika kecepatan angin di baling baling atas dan dibawah berbeda secara signifikan.

Perlu diperhitungkan selanjutnya adalah pada kecepatan angin berapa turbin angin dapat menghasilkan daya optimal. Kecepatan angin juga di pengaruhi oleh kontur dari permukaan. Di daerah perkotaan dengan banyak rumah, apartemen dan perkantoran bertingkat, kepadatan (porositas) di permukaan bumi akan menyebabkan angin mudah bergerak atau tidak.

2.23 Energi Kinetik Angin

Energi kinetis atau energi gerak (disebut juga energi kinetik) adalah energi yang dimiliki oleh sebuah benda karena gerakannya. Energi kinetik sebuah benda didefinisikan sebagai usaha yang dibutuhkan untuk menggerakkan sebuah benda dengan massa tertentu dari keadaan diam hingga mencapai kecepatan tertentu. Energi kinetik sebuah benda sama dengan jumlah usaha yang di perlukan untuk menyatakan kecepatan dan rotasinya , dimulai keadaan diam.¹³

¹² http://digilib.mercubuana.ac.id/manager/n!@file_skripsi/Isi288822584184_7.pdf

¹³ Nursuhud, Djati dan Astu Pudjanarsa., 2008. Mesin Konversi Energi. Yogyakarta: Penerbit Andi.

Tabel 2.1 Tingkat Kecepatan Angin 10 Meter di Atas Permukaan Tanah

(sumber : <http://eprints.polsri.ac.id/3409/3/3.BAB%20II.pdf>, 12 juli 2019)

Tingkat Kecepatan Angin 10 Meter di Atas Permukaan Tanah		
Kelas angin	Kecepatan angin m/d	Kondisi Alam di Daratan
1	0.00 – 0.02	_____
2	0.3 – 1.5	Angin tenang, Asap lurus ke atas
3	1.6 – 3.3	Asap bergerak mengikuti arah angin
4	3.4 – 6.4	Wajah terasa ada angin, daun-daun bergoyang pelan, petunjuk arah angin bergerak
5	5.5 – 7.9	Debu jalan, Kertas berterbangan, Ranting pohon bergoyangan
6	9.0 – 10.7	Ranting pohon bergoyang, Bendera berkibar
7	10.8 – 13.8	Ranting pohon besar bergoyang, Air plumpang berombak kecil
8	13.9 – 17.1	Ujung pohon melengkung, Hembusan angin terasa ditelinga
9	17.2 – 20.7	Dapat mematahkan ranting pohon, Jalan berat melawan arah angin
10	20.8 – 24.4	Dapat mematahkan ranting pohon, Rumah rubuh
11	24.5 – 28.4	Dapat meruntuhkan pohon, Menimbulkan kerusakan
12	28.5 – 32.6	Menimbulkan kerusakan parah
13	32.7 – 35.9	Tornado

Tabel 2.2 Tabel Kondisi Angin

(sumber : <http://eprints.polsri.ac.id/3409/3/3.BAB%20II.pdf>, 12 juli 2019)

Tabel Kondisi Angin			
Kelas Angin	Kecepatan Angin m/d	Kecepatan Angin km/jm	Kecepatan Angin knot/jam
1	0.3 – 1.5	1 – 5.4	0.58 – 2.92
2	1.6 – 3.3	5.5 – 11.9	3.11 – 6.42
3	3.4 – 5.4	12.0 – 19.5	6.61 – 10.5
4	5.5 – 7.9	19.6 – 28.5	10.7 – 15.4
5	8.0 – 10.7	28.6 – 38.5	15.6 – 20.8
6	10.8 – 13.8	38.6 – 49.7	21 – 26.8
7	13.9 – 17.1	49.8 – 61.5	27 – 33.3
8	17.2 – 20.7	61.6 – 74.5	33.5 – 40.3
9	20.8 – 24.4	74.6 – 87.9	40.5 – 47.5
10	24.5 – 28.4	88.0 – 102.3	47.7 – 55.3
11	28.5 – 32.6	102.4 – 117.0	55.4 – 63.4
12	> 32.6	> 118	63.4

Sebagaimana diketahui menurut fisika kinetik energy kinetic dari sebuah benda bermassa (m) dan kecepatan (v) adalah $E = 0,5 mv^2$. Rumus tersebut berlaku juga untuk angin yang merupakan udara bergerak

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana : E = Energi (joule)

M = Massa udara (kg)

V = kecepatan angin (m/v)

Bilamana suatu “blok” yang mempunyai penampang $A m^2$, dan bergerak dengan kecepatan v m/s, maka jumlah aliran massa yang melewati suatu tempat adalah

$$m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \dots\dots\dots(2.11)$$



Dimana : A = Luas penampang (m^2)

ρ = Kepadatan angin (m/s)

$$P_{\text{angin}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana = $P_{\text{angin}} = \text{Dayaangin (W)}$

2.24 Energi Kinetik Sebagai Fungsi dari Kecepatan Angin

Energi kinetik angin yang dapat masuk ke dalam area efektif turbin angin dapat dihitung berdasarkan persamaan 2.4 berikut :

P =

$$\frac{mv^2}{2} \cdot \frac{(\rho Av)v^2}{2} \cdot \frac{\rho Av^2}{2} \dots\dots\dots(2.13)$$

2.25 Turbin Angin

Turbin angin atau dalam bahasa sederhana kincir angin merupakan turbin yang digerakkan oleh angin, yaitu udara yang bergerak diatas permukaan bumi. Penggunaan turbin angin terus mengalami perkembangan guna memanfaatkan energi angin secara efektif, terutama pada daerah-daerah dengan aliran angin yang relatif tinggi sepanjang tahun. Sebagai pembangkit listrik, turbin angin telah digunakan di Denmark sejak tahun 1890. Dalam beberapa dekade terakhir ini, kekhawatiran akan habisnya energi fosil telah mendorong pengembangan dan penggunaan turbin angin secara meluas dalam mengakomodasi kebutuhan listrik masyarakat dengan prinsip konversi energi. Pada saat ini, angin merupakan salah satu sumber energi dengan perkembangan relatif cepat dibanding sumber energi lainnya. Walaupun demikian sampai saat ini pembangunan turbin angin masih belum dapat menyaingi pembangkit listrik konvensional (misal: PLTD atau PLTU). Pengkajian potensi angin pada suatu daerah dilakukan dengan cara mengukur serta menganalisa kecepatan maupun arah angin. Dasar dari alat untuk merubah energi angin adalah kincir angin. Meskipun masih terdapat susunan dan perencanaan yang beragam, biasanya kincir angin digolongkan menjadi dua tipe

(horisontal dan vertikal).¹⁴

Sesuai dengan ketentuan Betz, sebuah turbin angin yang ideal akan mengubah 16/27(59%) dari energi angin yang dihasilkan oleh angin. Akan tetapi dalam prakteknya daya turbin yang didapat lebih kecil karena terdapat beberapa faktor.

Daya turbin angin tersebut merupakan hasil kali dari daya angin dengan *coefficient performance* (C_p). Adapun rumus daya turbin adalah sebagai berikut:

$$P_{Turbin} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^2 C_p (\lambda, \beta) \dots \dots \dots (2.14)$$

- Dimana :
- P_{Turbin} = daya turbin (watt)
 - C_p = koefisien performa
 - λ = tip speed ratio
 - β = sudut – sudut ($^{\circ}$)

2.26 Jenis Turbin Angin

1. Turbin Angin Sumbu *Horizontal*

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 ke sebuah servo motor. Sebagian besar memiliki sebuah gearbox yang mengubah perputaran kincir yang pelan menjadi lebih cepat berputar karena sebuah menara menghasilkan turbulensi di belakangnya, turbin biasanya diarahkan melawan arah anginnya menara. Bilah-bilah turbin dibuat kaku agar mereka tidak terdorong menuju menara oleh angin berkecepatan tinggi. Sebagai tambahan, bilah-bilah itu diletakkan di depan menara pada jarak tertentu dan sedikit dimiringkan. Karena turbulensi menyebabkan kerusakan struktur menara, dan realibilitas begitu penting, sebagian besar Turbin Angin Sumbu Horizontal merupakan mesin *upwind* (melawan arah angin). Meski

¹⁴ Ikhwaniul Ikhsan. 2011. Analisa Pengaruh Pembebanan Terhadap Kinerja Kincir Angin Tipe Propeller Pada Wind Tunnel Sederhana. <http://repository.unhas.ac.id/>

memiliki permasalahan turbulensi, mesin *downwind* (menurut arah angin) dibuat karena tidak memerlukan mekanisme tambahan agar mereka tetap sejalan dengan angin, dan karena di saat angin berhembus sangat kencang, bilah – bilahnya bisa ditekuk sehingga mengurangi wilayah tiupan mereka dan dengan demikian juga mengurangi resistensi angin dari bilah-bilah itu.¹⁵

2. Kelebihan Turbin Angin Sumbu *Horizontal*

Dasar menara yang tinggi membolehkan akses ke angin yang lebih kuat di tempat-tempat yang memiliki geseran angin (perbedaan antara laju dan arah angin) di 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%.

3. Kelemahan Turbin Angin Sumbu *Horizontal*

1. Menara yang tinggi serta bilah yang panjangnya bisa mencapai 90 meter sulit diangkut. Diperkirakan besar biaya transportasi bisa mencapai 20% dari seluruh biaya peralatan turbin angin.
2. Turbin Angin Sumbu *Horizontal* yang tinggi sulit dipasang, membutuhkan derek yang sangat tinggi dan mahal serta para operator yangampil.
3. Konstruksi menara yang besar dibutuhkan untuk menyangga bilah-bilah yang berat, gearbox, dan generator.
4. Turbin Angin Sumbu *Horizontal* yang tinggi bisa memengaruhi radar airport.
5. Ukurannya yang tinggi merintang jangkauan pandangan dan mengganggu penampilan lanskap.
6. Berbagai varian *downwind* menderita kerusakan struktur yang disebabkan oleh turbulensi.
7. Turbin Angin Sumbu *Horizontal* membutuhkan mekanisme *control yaw* tambahan untuk membelokkan kincir ke arah angin.

4. Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin angin sumbu vertikal/tegak (*TASV*) memiliki poros/sumbu rotor

¹⁵ https://id.wikipedia.org/wiki/Turbin_angin



utama yang disusun tegak lurus. Kelebihan utama susunan ini adalah turbin tidak harus diarahkan ke angin agar menjadi efektif. Kelebihan ini sangat berguna di tempat - tempat yang arah anginnya sangat bervariasi. Turbin Angin Sumbu Vertikal mampu mendayagunakan angin dari berbagai arah. Dengan sumbu yang vertikal, generator serta *gearbox* bisa ditempatkan di dekat tanah, jadi menara tidak perlu menyokongnya dan lebih mudah diakses untuk keperluan perawatan. Tapi ini menyebabkan sejumlah desain menghasilkan tenaga putaran yang berdenyut. *Drag* (gaya yang menahan pergerakan sebuah benda padat melalui fluida (zat cair atau gas) bisa saja tercipta saat kincir berputar. Karena sulit dipasang di atas menara, turbin sumbu tegak sering dipasang lebih dekat ke dasar tempat ia diletakkan, seperti tanah atau puncak atap sebuah bangunan. Kecepatan angin lebih pelan pada ketinggian yang rendah, sehingga yang tersedia adalah energi angin yang sedikit. Aliran udara di dekat tanah dan obyek yang lain mampu menciptakan aliran yang bergolak, yang bisa menyebabkan berbagai permasalahan yang berkaitan dengan getaran, diantaranya kebisingan dan bearing wear yang akan meningkatkan biaya pemeliharaan atau mempersingkat umur turbin angin. Jika tinggi puncak atap yang dipasangi menara turbin kira-kira 50% dari tinggi bangunan, ini merupakan titik optimal bagi energi angin yang maksimal dan turbulensi angin yang minimal.

5. Kelebihan Turbin Angin Sumbu Vertikal

1. Tidak membutuhkan struktur menara yang besar.
2. Karena bilah - bila rotasinya vertikal, tidak dibutuhkan mekanismenya.
3. Sebuah Turbin Angin Sumbu Vertikal bisa diletakkan lebih dekat ke tanah, membuat pemeliharaan bagian-bagiannya yang bergerak jadi lebih mudah.
4. Turbin Angin Sumbu Vertikal memiliki sudut airfoil (bentuk bilah sebuah baling-baling yang terlihat secara melintang) yang lebih tinggi, memberikan keaerodinamisan yang tinggi sembari mengurangi *drag* pada tekanan yang rendah dan tinggi memberikan keaerodinamisan yang tinggi sembari mengurangi *drag* pada tekanan yang rendah dan tinggi.



5. Desain Turbin Angin Sumbu Vertikal berbilah lurus dengan potongan melintang berbentuk kotak atau empat persegi panjang memiliki wilayah tiupan yang lebih besar untuk diameter tertentu daripada wilayah tiupan berbentuk lingkarannya Turbin Angin Sumbu *Horizontal*.
6. Turbin Angin Sumbu Vertikal memiliki kecepatan awal angin yang lebih rendah dari pada Turbin Angin Sumbu Horizontal. Biasanya Turbin Angin Sumbu Vertikal mulai menghasilkan listrik pada 10 km/jam (6 m.p.h.).
7. Turbin Angin Sumbu Vertikal biasanya memiliki *tip speed ratio* (perbandingan antara kecepatan putaran dari ujung sebuah bilah dengan laju sebenarnya angin) yang lebih rendah sehingga lebih kecil kemungkinannya rusak di saat angin berhembus sangat kencang.
8. Turbin Angin Sumbu Vertikal bisa didirikan pada lokasi-lokasi dimana struktur yang lebih tinggi dilarang dibangun.
9. Turbin Angin Sumbu Vertikal yang ditempatkan di dekat tanah bisa mengambil keuntungan dari berbagai lokasi yang menyalurkan angin serta meningkatkan laju angin (seperti gunung atau bukit yang puncaknya datar dan puncak bukit).
10. Turbin Angin Sumbu Vertikal tidak harus diubah posisinya jika arah angin bembah.
11. Kincir pada Turbin Angin Sumbu Vertikal mudah dilihat dan dihindari burung.

6. Kekurangan Turbin Angin Sumbu Vertikal

1. Kebanyakan Turbin Angin Sumbu Vertikal memproduksi energi hanya 50% dari efisiensi Turbin Angin Sumbu Horizontal karena drag tambahan yang dimilikinya saat kincir berputar.
2. Turbin Angin Sumbu Vertikal tidak mengambil keuntungan dari angin yang melaju lebih kencang di elevasi yang lebih tinggi.
3. Kebanyakan Turbin Angin Sumbu Vertikal mempunyai torsi awal yang rendah, dan membutuhkan energi untuk mulai berputar.
4. Sebuah Turbin Angin Sumbu Vertikal 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.

2.26 Generator

Ini adalah salah satu komponen terpenting dalam pembuatan sistem turbin angin. Generator ini dapat mengubah energi gerak menjadi energi listrik. Prinsip kerjanya dapat dipelajari dengan menggunakan teori medan elektromagnetik. Singkatnya, (mengacu pada salah satu cara kerja generator) poros pada generator dipasang dengan material ferromagnetik permanen. Setelah itu disekeliling poros terdapat stator yang bentuk flisisnya 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 untuk akhirnya digunakan oleh masyarakat. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh generator ini berupa AC (*alternating current*) yang memiliki bentuk gelombang kurang lebih *sinusoidal*.¹⁶

2.27 Daya Generator¹⁷

Daya generator yang dikopel langsung dengan turbin dapat dihitung dengan menggunakan rumus daya pada rangkaian listrik pada umumnya. Perhitungan daya juga dapat dilakukan dengan menggunakan harga dari tegangan maksimum dan arus maksimum pada gelombang sinusoidal keluaran generator yang tersebut.

$$P = V \times I \dots\dots\dots(2.15)$$

$$V = V_p - p / \sqrt{3} \dots\dots\dots(2.16)$$

$$V = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots(2.17)$$

$$V = I_m / \sqrt{2} \dots\dots\dots(2.18)$$

¹⁶ https://id.wikipedia.org/wiki/Turbin_angin

¹⁷ Suryatmo, F. 2014. Dasar-Dasar Teknik Listrik. Jakarta : Rineka Cipta



- Dimana : V = Tegangan (V)
- I = Arus (A)
- V_{p-p} = Tegangan Phasa ke Phasa (V)
- V_m = Tegangan Maksimum Pada Gelombang Sinusoidal (V)
- I_m = Arus Maksimum Pada Gelombang Sinusoidal (I)

Hukum Ohm pertama kali diperkenalkan oleh seorang fisikawan Jerman yang bernama Georg Simon Ohm (1789-1854) pada tahun 1825. Georg Simon Ohm mempublikasikan Hukum Ohm tersebut pada karya tulis yang berjudul “*The Galvanic Circuit Investigated Mathematically*” pada tahun 1827. Bunyi Hukum Ohm yaitu besar arus listrik (I) yang mengalir melalui sebuah penghantar atau konduktor akan berbanding lurus dengan beda potensial/tegangan (V) yang diterapkan kepadanya dan berbanding terbalik dengan hambatannya (R). Secara matematis, Hukum Ohm dapat dirumuskan menjadi persamaan seperti dibawah ini:

$$I \times R = V \dots\dots\dots(2.19)$$

- Dimana : V = Tegangan (V)
- I = Arus (A)
- R = Tahanan (Ω)

Torsi dari turbin dapat dihitung dengan rumus :

$$T = P_e / \omega \quad I \times T \dots\dots\dots(2.20)$$

$$\omega = 2\pi n / 60 \quad I \times \omega \dots\dots\dots(2.21)$$

- Dimana : P_e = Daya listrik pada beban (watt)
- T = Torsi generator
- ω = Omega (rad/s)
- n = Putaran permenit (RPM)

2.28 Rectifier-inverter

Rectifier berarti penyearah. Rectifier dapat menyearahkan gelombang sinusoidal (AC) yang dihasilkan oleh generator menjadi gelombang DC. Inverter berarti pembalik. Ketika dibutuhkan daya dari penyimpan energi (Aki/lainnya) maka catu yang dihasilkan oleh aki akan berbentuk gelombang DC. Karena kebanyakan kebutuhan rumah tangga menggunakan catu daya AC, maka



diperlukan inverter untuk mengubah gelombang DC yang dikeluarkan oleh aki menjadi gelombang AC, agar dapat digunakan oleh rumah tangga.¹⁸

¹⁸ <http://eprints.polsri.ac.id/3409/3/3.BAB%20II.pdf>