

BAB II

TINAJUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Kebutuhan energi listrik semakin tinggi sejalan dengan berkembangnya zaman. Hal ini yang menuntut para ilmuwan dunia bereksperimen untuk mencari solusi dengan memanfaatkan energi alternatif terbarukan yang ekonomis, efisien dan efektif. Karena saat ini, bahan baku dalam memproduksi energi listrik masih banyak yang menggunakan sumber energi fosil. Seperti yang diketahui, energi fosil merupakan suatu energi yang bersifat non-terbarukan dan mulai mengalami kelangkaan karena penggunaannya yang terus-menerus dengan kapasitas yang besar. Faktor lain yang menyebabkan energi fosil tidak efektif digunakan saat ini yakni faktor lingkungan, dimana gas hasil pembakaran fosil dapat menyebabkan pencemaran lingkungan yang parah.

Salah satu pembangkit listrik yang menggunakan sumber energi alternatif yaitu PLTH Bayu Baru yang berada dikawasan Pantai Baru Bantul. Energi angin dan energi surya merupakan sumber energi yang digunakan pada sistem PLTH ini. Sumber energi terbarukan lebih menguntungkan dibandingkan dengan sumber energi fosil, karena sifatnya yang ramah lingkungan.

PLTH Bayu Baru merupakan hasil kerjasama dari pihak pemerintah, pihak swasta, pihak universitas dan pihak masyarakat. Pembangkit listrik ini dimanfaatkan untuk kebutuhan listrik masyarakat sekitarnya seperti warung, penerangan, perairan dan lainnya. Namun sejak diresmikan pada tahun 2011, komponen-komponen PLTH ini belum dilakukan peremajaan. Misalnya pada baterai, satu hal yang menjadi perhatian dalam pengadaannya baterai di PLTH ini merupakan baterai bekas yang diadakan oleh pihak-pihak terkait. Idealnya penggunaan baterai berjenis aki memiliki masa penggunaan selama 5 tahun, jadi seharusnya telah dilakukan pergantian aki dalam periode 2011 s/d 2018 sekarang ini, namun yang menjadi masalah utamanya yakni ketiadaan dana yang dipegang oleh pihak pengelola PLTH sehingga harus menjadi perhatian bagi pihak

pengembang (pemerintah pusat, pemerintah daerah, dinas ESDM, dan pihak-pihak terkait lainnya). Bila ditinjau ke lokasi, telah banyak komponen-komponen yang mengalami kerusakan sementara dan permanen. Kerusakan ini dapat terjadi karena pemakaian yang secara terus-menerus melebihi batas waktu pemakaian, komponen-komponen yang tidak sesuai standar, dan faktor lingkungan.

Sejalan dengan topik tugas akhir yang dikerjakan, terdapat beberapa referensi yang berkaitan dengan tugas akhir ini. Penelitian yang dilakukan oleh Syamsul Bahari seorang alumni Teknik Elektro Universitas Tanjungpura pada tahun 2015, dengan penelitian yang berjudul “*Analisa Pembangkit Listrik Tenaga Angin di Sekitar Sungai Nibung Kec. Teluk Pakedei Kabupaten Kubu Raya*”. Dimana beliau menjelaskan tentang kesulitannya warga disekitar sungai nibung dalam menerima pasokan listrik PLN, sehingga dimanfaatkan energi angin sebagai produksi energi listrik untuk penerangan warga sekitar. Penelitiannya menggunakan *software Homer* untuk mengetahui kelayakan pembangunan pembangkit listrik tenaga angin, Syamsul melakukan perbandingan generator listrik dan turbin angin dengan kapasitas yang sama untuk mengetahui jumlah NPC (*Net Present Cost*) dan COE (*Cost Of Energi*) terendah. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa turbin angin dengan kapasitas 500 watt diperoleh NPC sebesar \$3,857 dan COE \$0,314/kwh. Sedangkan untuk generator listrik 500 watt diperoleh NPC sebesar \$6,003 dan COE sebesar \$0,489/kwh. Sementara untuk turbin angin 1000 watt diperoleh NPC sebesar \$5,386, COE sebesar \$0,439/kwh dan untuk generator dengan kapasitas 1000 watt diperoleh NPC sebesar \$9,758, COE sebesar \$0,795. Sesuai dengan data beban puncak sebesar 285 watt, maka Pembangkit Listrik Tenaga Angin dengan kapasitas 500 watt memiliki potensi untuk dikembangkan di Desa Sungai Nibung.

Aji N. Pakha seorang alumni Teknik Fisika Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, dengan penelitian yang berjudul “*Evaluasi dan Optimalisasi Ukuran Komponen Penyusun Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid*”. Menjelaskan tentang menipisnya ketersediaan sumber energi fosil, sehingga menuntut para ilmuwan untuk mencari sumber energi alternatif ramah lingkungan. Aji menggunakan simulasi dengan menggunakan aplikasi homer terhadap *existing condition*, dengan

menggunakan konfigurasi pembangkit yang mendekati keadaan di lapangan. Hasil yang ditunjukkan yakni terjadi *capacity shortage* 80%. Besar daya yang mampu dihasilkan PLTH Bayu Baru yaitu 20 %, yang digunakan untuk memenuhi beban dengan daya Panel Surya sebesar 20491 kWh/tahun dan daya Turbin angin sebesar 8184 kWh/tahun.

Muhamad Habibi seorang alumni Teknik Elektro Universitas Jember, melakukan penelitian pada tahun 2013 yang berjudul “*Analisis Perbandingan Ekonomis dan Elektris pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Homer di PLTH Bantul Yogyakarta*”. Memaparkan tentang perbandingan ekonomis dan elektris pada turbin angin 1 kW dengan 10 kW, dilakukan dengan meneliti 1 unit kincir angin kapasitas 10 kW dan 10 unit kincir angin 1 kW dengan beban terpasang 600 W. Hasil dari penelitiannya menunjukkan bahwa 10 unit turbin angin dengan kapasitas 1 kW (10 x 1 kW) memiliki biaya investasi sebesar Rp. 808,975,300 dengan melalui perhitungan energi listrik yang dihasilkan sebesar 15.850 kWh dan melalui simulasi homer energi listrik yang dihasilkan sebesar 15.847 kWh. Sedangkan, 1 unit turbin angin dengan kapasitas 10 kW (1 x 10 kW) memiliki biaya investasi sebesar Rp. 507,657,000 dengan melalui perhitungan menghasilkan energi listrik sebesar 1,368 kWh dan melalui simulasi homer energi listrik yang dihasilkan sebesar 1,382 kWh. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa, 10 unit turbin angin dengan kapasitas 1 kW (10 x 1 kW) lebih efisien dari segi elektris dan ekonomis untuk ekspansi terhadap PLTH Bayu Baru.

2.2 Landasan Teori

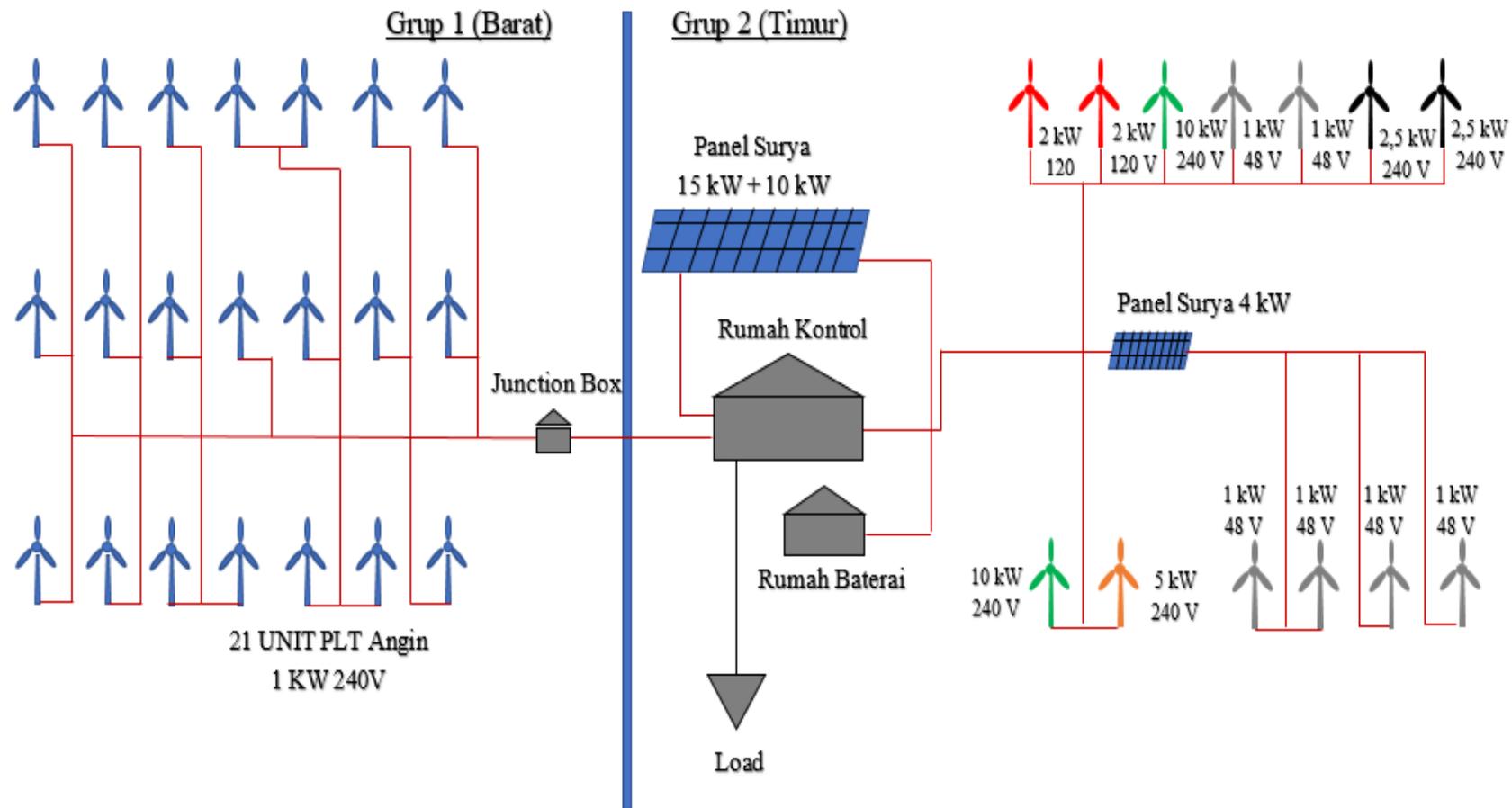
2.2.1 PLTH Pantai Baru Bantul

Umumnya Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid (PLTH) adalah pembangkit listrik yang mengsinergikan Energi Terbarukan yang berperan sebagai sumber energi utama (primer) dengan satu atau lebih sumber energi lainnya sebagai Energi Cadangan (sekunder). Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid (PLTH) pantai baru bantul merupakan sistem pembangkit yang mengsinergikan Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB) dengan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) guna memenuhi kebutuhan listrik di wilayah pantai baru bantul. Sektor ekonomi

masyarakat disekitar wilayah pantai baru bantul berkembang seiring dengan kebutuhan listrik yang terkecukupi dan terpenuhi, listrik hasil produksi PLTH ini dimanfaatkan untuk kebutuhan-kebutuhan lain sebagai pembuatan kristal es, pompa air tawar untuk pengairan, dan penerangan di warung-warung serta ruang lingkup sekitarnya. Dalam kerjasamanya PLTH pantai baru bantul melibatkan pihak-pihak Pemerintah RI, Pemerintah Kabupaten Bantul, Pihak Swasta, Pihak Perguruan Tinggi dan masyarakat sekitar.

Dalam perancangannya Instalasi PLTH ini dibagi menjadi tiga grup yakni Grup 1 (grup barat) , Grup KKP (grup tengah) dan Grup 2 (grup timur). Grup barat terdiri dari 21 unit kincir angin dengan kapasitas daya maksimal per unit sebesar 1 kW dan panel surya dengan kapasitas daya total sebesar 15 kW. Grup tengah terdiri dari 48 unit panel surya dengan kapasitas masing-masing sebedar 220 W. Sedangkan, grup timur terdiri dari 1 unit kincir angin dengan kapasitas daya maksimal sebesar 10 kW, 6 unit kincir angin dengan kapasitas daya maksimal per unit sebesar 2,5 kW, 4 unit kincir angin dengan kapasitas daya maksimal sebesar 1 kW per unitnya, sedangkan panel surya memiliki kapasitas daya total sebesar 4 kW.

Gambar 2.1 memperlihatkan instalasi dari PLTH Pantai Baru Bantul. Jenis penyimpanan listrik sementara yang digunakan yaitu aki basah dengan tegangan sebesar 240 volt dan aki kering dengan tegangan sebesar 48 volt. Aki (baterai) ditempatkan pada dua ruangan, agar dapat memisahkan antara baterai grup barat dan baterai grup timur. Sebelum menuju beban, energi listrik terlebih dahulu dikonversi menggunakan inverter yang berada pada ruang kontrol. Setelah itu energi listrik didistribusikan menuju masing-masing beban disekitar wilayah PLTH.



Gambar 2.1 Diagram Instalasi PLTH Pantai Baru Bantul

2.2.2 Energi Angin

Angin adalah udara yang bergerak dari tekanan udara yang lebih tinggi ke tekanan udara yang lebih rendah. Perbedaan tekanan udara disebabkan oleh perbedaan suhu udara akibat pemanasan atmosfer yang tidak merata oleh sinar matahari. Karena bergerak angin memiliki energi kinetik. Energi angin dapat dikonversi atau ditransfer ke dalam bentuk energi lain seperti listrik atau mekanik dengan menggunakan kincir atau turbin angin. Oleh karena itu, kincir atau turbin angin sering disebut sebagai Sistem Konversi Energi Angin (SKEA).

Salah satu jenis energi terbarukan yang berkembang saat ini adalah energi angin. Energi angin dapat dikatakan sebagai energi terbarukan yang fleksibel, bisa digunakan untuk berbagai keperluan misalnya pembangkit listrik, pemompaan air untuk irigasi, aerasi tambak perikanan dan lain-lain. Selain itu, energi angin dapat dimanfaatkan di mana-mana, baik di dataran rendah maupun dataran tinggi, bahkan bisa juga diterapkan di laut. Pemanfaatan energi angin ini diharapkan mampu mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil yang dominan digunakan saat ini.

Secara umum, Indonesia masih kurang dalam memerhatikan tenaga angin. Pada tahun 2004, kapasitas yang terpasang dari pemanfaatan tenaga angin masih sangat minim yakni hanya sebesar 0.5 MW dari 9.29 GW potensi angin yang ada (DESDM, 2005). Padahal pada saat itu kapasitas pembangkit listrik tenaga angin di dunia mengalami perkembangan yang sangat pesat dengan pertumbuhan kumulatif sampai tahun 2004 melebihi 20% per tahun. Dari kapasitas yang telah terpasang 5 GW pada tahun 1995 berkembang hampir mencapai 48 GW pada tahun 2004 yang tersebar dalam 74.400 turbin angin di sekitar 60 negara (BTM Consults ApS, 2005). Dalam menghasilkan energi listrik adapun syarat dan kondisi angin yang dapat digunakan, yaitu:

Tabel 2.1 Tingkat laju angin 10 meter di atas permukaan tanah

(Sumber: www.kincirangin.info)

Kelas	Kecepatan (m/s)	Kondisi Alam di Daratan
1	0.00 – 1.5	Angin tenang, asap lurus ke atas
2	1.6 – 3.3	Asap bergerak mengikuti arah angin
3	3.4 – 5.4	Wajah terasa ada angin, daun-daun bergoyang pelan, petunjuk arah angin bergerak
4	5.5 – 7.9	Debu jalan, kertas beterbangan, ranting pohon bergoyang
5	8.0 – 10.7	Ranting pohon bergoyang, bendera berkibar
6	10.8 – 13.8	Ranting pohon besar bergoyang, air kolam berombak kecil
7	13.9 – 17.1	Ujung pohon melengkung, hembusan angin terasa di telinga
8	17.2 – 20.7	Dapat mematahkan ranting pohon, jalan berat melawan arah angin
9	20.8 – 24.4	Dapat mematahkan ranting pohon, rumah rubu
10	24.5 – 28.4	Dapat merubuhkan pohon, menimbulkan kerusakan
11	28.5 – 32.6	Menimbulkan kerusakan parah

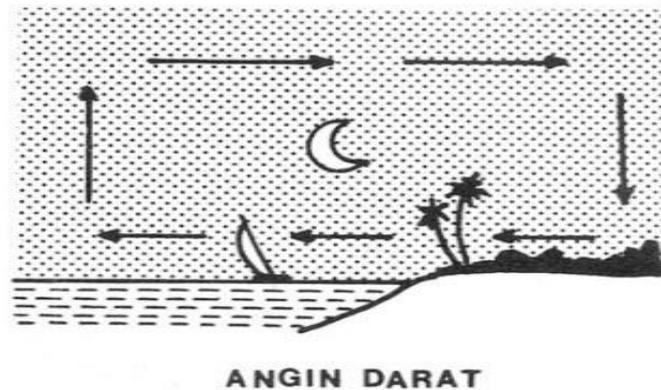
a. Jenis-Jenis Angin

Beberapa contoh jenis angin yang ada di Indonesia yakni angin darat, angin laut, angin lembah, angin gunung, angin fohn dan angin muson barat dan angin muson timur.

1. Angin Darat

Angin darat bertiup dari darat ke arah laut. Angin darat terjadi saat malam hari, karena suhu di laut saat malam hari sangat tinggi yang disebabkan air laut

menahan panas matahari saat siang hari. Udara lebih dingin karena daratan tidak mendapat pemanasan dan tidak dapat mengikat panas lebih lama dari air. Karena suhu panas tersebut, udara di lautan merenggang sehingga tekanan udara di lautan turun dan menyebabkan udara bergerak dari darat ke lautan.

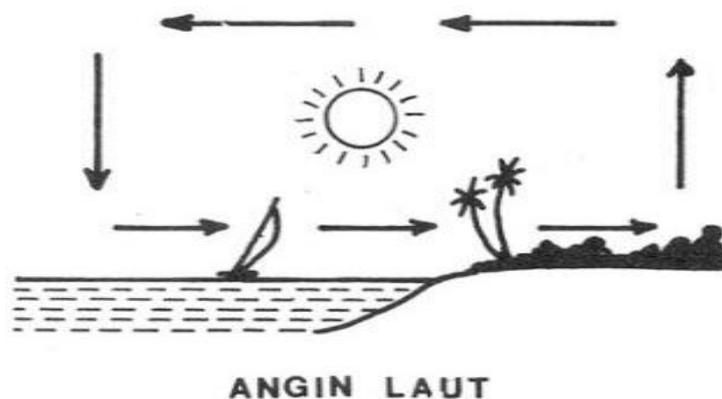


(sumber: mistamajahp.com/angin-darat-dan-angin-laut)

Gambar 2.2 Proses Terjadinya Angin Darat

2. Angin Laut

Angin yang bertiup dari laut ke darat disebut angin laut. Angin laut terjadi pada siang hari, karena suhu di darat lebih tinggi yang disebabkan pantulan matahari merenggangkan udara di daratan. Karena merenggang, udara di daratan naik sehingga tekanannya turun dan menyebabkan udara bergerak dari lautan ke daratan.

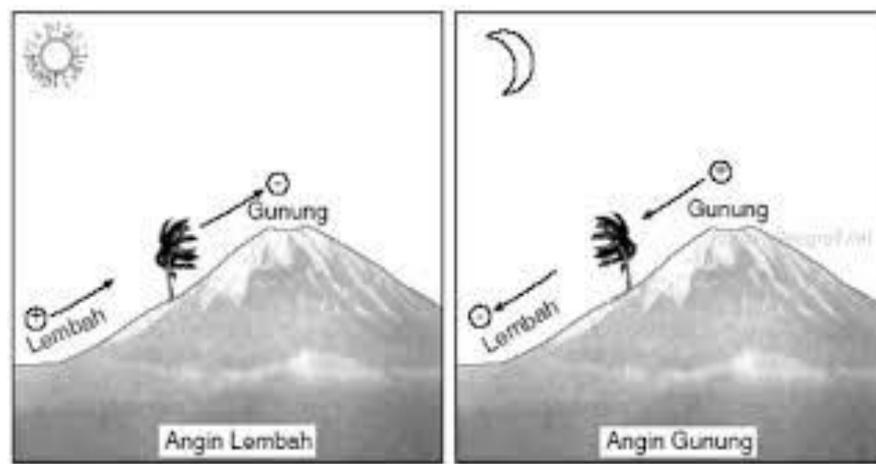


(sumber: mistamajahp.com/angin-darat-dan-angin-laut)

Gambar 2.3 Proses Terjadinya Angin Laut

3. Angin Gunung dan Angin Lembah

Perbedaan pemanasan juga terjadi dikawasan pegunungan dan lembah. Malam hari pegunungan lebih dulu terjadi penurunan suhu menjadi dingin sedangkan lembah masih dalam keadaan hangat. Udara di lembah pada malam hari lebih renggang, maka tekanan udara di lembah pun menjadi lebih rendah. Rendahnya tekanan udara di lembah menyebabkan udara yang ada di gunung bergerak turun ke lembah, proses ini disebut sebagai angin gunung. Saat siang hari pegunungan lebih dulu mendapat pemanasan dibandingkan lembah. Udara di gunung saat siang hari lebih renggang, maka tekanan udara di gunung menjadi lebih rendah. Karena rendahnya tekanan udara di gunung, maka udara yang ada di lembah bergerak naik ke gunung sehingga kejadian ini disebut sebagai angin lembah.



(sumber: konsepgeografi.net/2016/01/angin-gunung-dan-angin-lembah)

Gambar 2.4 Proses Terjadinya Angin Lembah & Angin Gunung

4. Angin *Fohn*

Angin *fohn* adalah angin yang turun di lereng pegunungan yang memiliki sifat kering dan panas. Proses angin *fohn* terjadi karena udara yang turun mendapatkan pemanasan secara dinamis yang diikuti turunnya kelembapan nisbi. Akibatnya udara yang mencapai daratan berupa udara panas dan kering.



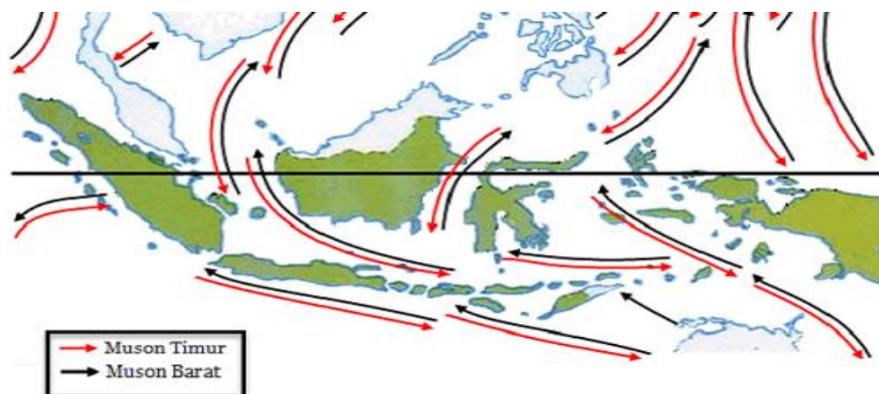
(sumber: guruips.com/2017/09/angin-darat-dan-laut-angin-lembah-dan)

Gambar 2.5 Proses Terjadinya Angin Fohn

5. Angin Muson Barat dan Angin Muson Timur

Angin monsun barat terjadi pada bulan Oktober s/d April. Bulan-bulan itu kedudukan matahari berada di belahan bumi selatan, akibatnya belahan bumi selatan suhunya lebih tinggi dari pada belahan bumi utara dan angin bertiup dari belahan bumi utara ke belahan bumi selatan.

Sedangkan angin muson timur terjadi pada bulan April s/d Oktober. Saat itu kedudukan matahari berada di belahan bumi utara. Menyebabkan benua Australia mengalami musim dingin sehingga bertekanan tinggi. Sedangkan benua Asia lebih panas, sehingga tekanannya rendah.



(sumber: referensibebas.com/2017/01/akibat-dari-adanya-angin-muson-barat)

Gambar 2.6 Proses Terjadinya Angin Muson

b. Potensi Energi Angin di Indonesia

Pemanfaatan energi angin dapat dilakukan di mana saja, daerah-daerah yang memiliki potensi energi angin yang tinggi tetap perlu diidentifikasi agar pemanfaatan energi angin ini lebih kompetitif dibandingkan dengan energi alternatif lainnya.

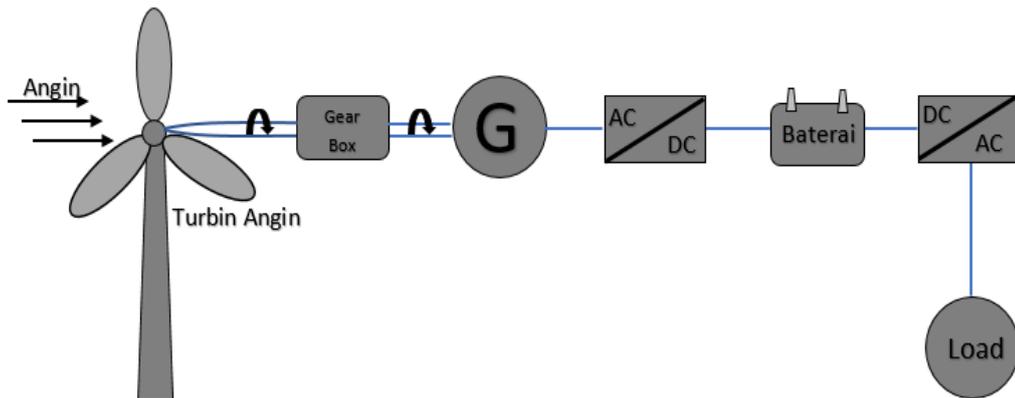
Tabel 2.2 Daerah yang memiliki potensi untuk pemanfaatan PLTB

(Sumber : LAPAN, 2006)

Kelas	Kecepatan angin (m/s)	Daya spesifik (W/m²)	Kapasitas (kW)	Lokasi
Skala kecil	2,5 – 4,0	<75	1 s/d 10	Jawa, NTT, NTB, Maluku, Sulawesi
Skala sedang	4,0 – 5,0	75 – 100	10 – 100	NTT, NTB, Sulawesi Selatan, Sulawesi Utara, selatan Jawa
Skala besar	>5,0	150	>100	Sulawesi Selatan, NTT, NTB, Selatan Jawa

2.2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB)

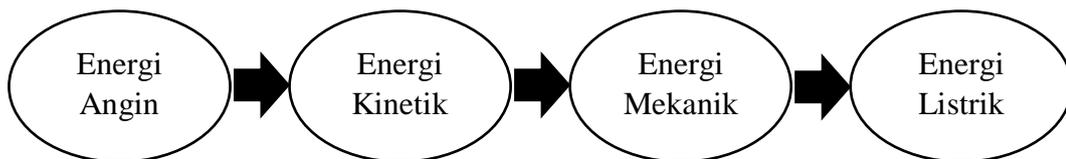
Pembangkit Listrik Tenaga Angin adalah sistem pembangkitan yang memanfaatkan energi angin untuk membangkitkan energi listrik dengan menggunakan turbin angin atau kincir angin. Sistem pembangkitan yang memanfaatkan hembusan angin sebagai sumber energi penghasil listrik merupakan sumber energi alternatif yang sangat berkembang pesat, mengingat angin merupakan salah satu energi terbarukan yang bersih, aman, ramah lingkungan dan tidak terbatas di alam.



Gambar 2.7 Skema Pembangkit Listrik Tenaga Angin

a. Prinsip Kerja PLTB

Prinsip kerja dari PLTB adalah udara yang berhembus membawa suatu bentuk energi lainnya yang dikenal sebagai energi kinetik. Energi kinetik memiliki potensi untuk diubah menjadi bentuk energi lain yang lebih bermanfaat seperti energi listrik. Untuk tujuan ini, dibutuhkan sistem yang mampu mengubah energi kinetik menjadi energi listrik yaitu turbin angin yang dihubungkan dengan sebuah generator listrik. Hembusan angin yang membawa energi kinetik ditangkap oleh baling-baling, yang menyebabkan turbin angin berputar serta menghasilkan energi lainnya yaitu energi gerak atau energi mekanik. Kemudian energi gerak yang dihasilkan turbin angin dipergunakan untuk memutar generator yang membangkitkan beda potensial, lalu menghasilkan energi listrik. Gambar 2.8 menunjukkan proses perubahan energi dapat dilihat pada diagram berikut:



Gambar 2.8 Proses Konversi Energi Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Namun ada salah satu faktor terbesar dalam pemanfaatan energi angin untuk membangkitkan energi listrik yaitu pada kenyataan bahwa angin bertiup dengan ke kuatannya yang berbeda-beda dari waktu ke waktu, kejadian ini disebut dengan faktor *intermitency*. Sewaktu-waktu angin berhembus kencang sehingga mampu membangkitkan listrik dalam jumlah yang cukup besar. Sedangkan pada saat yang lain angin berhembus terlalu lemah untuk membangkitkan listrik dalam jumlah yang cukup. Karena faktor *intermitency* inilah yang menyebabkan jumlah energi yang di bangkitkan oleh sebuah turbin angin tidak stabil dan kurang andal.

b. Kelebihan dan Kekurangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB)

Prinsipnya penggunaan pembangkit listrik tenaga angin (PLTB) memiliki kelebihan utama yang berdasarkan sifatnya yaitu sifatnya yang terbarukan. Hal ini berarti penggunaan sumber energi ini dalam skala kecil maupun skala besar tidak akan membuat sumber daya angin yang ada di bumi berkurang, lain halnya penggunaan bahan bakar fosil yang dapat habis apabila digunakan secara terus-menerus. Oleh karenanya tenaga angin dapat berkontribusi dalam ketahanan energi dunia di masa depan. Tenaga angin juga merupakan sumber energi yang ramah lingkungan, dimana penggunaannya tidak mengakibatkan polusi yang berarti ke lingkungan.

Walaupun penggunaan pembangkit listrik tenaga angin (PLTB) memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan pembangkit listrik fosil yang banyak digunakan saat ini, bukan berarti PLTB tidak memiliki kekurangan terhadap lingkungan. Akibat yang dapat terjadi dari penggunaan sumber energi angin sebagai pembangkit listrik, diantaranya adalah dampak visual, derau suara, beberapa masalah ekologi, dan keindahan.

Dampak visual biasanya merupakan hal yang paling serius dikritik. Penetapan sumber daya angin dan persetujuan untuk pengadaan ladang angin merupakan proses yang paling lama untuk pengembangan proyek energi angin. Hal ini dikarenakan dalam kasus ladang angin yang besar membutuhkan studi dampak lingkungan yang luas. Penggunaan ladang angin sebagai pembangkit

listrik membutuhkan lahan yang luas dan tidak sedikit. Selain mengganggu pandangan, akibat lain dari pemasangan barisan PLTB yaitu penggunaan lahan untuk PLTB dapat mengurangi lahan pertanian serta pemukiman. Hal ini yang membuat PLTB di daratan menjadi terbatas.

Aturan mengenai tinggi bangunan juga dapat membuat pembangunan pembangkit listrik tenaga angin jadi terhambat. Penggunaan tiang yang tinggi untuk turbin angin juga dapat menyebabkan terganggunya cahaya matahari yang masuk ke rumah-rumah penduduk. Perputaran sudu-sudu menyebabkan cahaya matahari yang berkelap-kelip dan dapat mengganggu pandangan penduduk setempat.

Efek lain akibat penggunaan turbin angin adalah terjadinya derau frekuensi rendah. Putaran dari sudu-sudu turbin angin dengan frekuensi konstan lebih mengganggu daripada suara angin pada ranting pohon. Selain derau dari sudu-sudu turbin, penggunaan gearbox serta generator dapat menyebabkan derau suara mekanis dan juga derau suara listrik. Derau mekanik yang terjadi disebabkan oleh operasi mekanis elemen-elemen yang berada dalam rumah pembangkit listrik tenaga angin.

Pengaruh ekologi yang terjadi dari penggunaan pembangkit tenaga angin adalah terhadap populasi burung dan kelelawar. Burung dan kelelawar dapat terluka atau bahkan mati akibat terbang melewati sudu-sudu yang sedang berputar. Namun dampak ini masih lebih kecil jika dibandingkan dengan kematian burung-burung akibat kendaraan, saluran transmisi listrik dan aktivitas manusia lainnya yang melibatkan pembakaran bahan bakar fosil. Dalam beberapa studi yang telah dilakukan, adanya pembangkit listrik tenaga angin ini dapat mengganggu migrasi populasi burung dan kelelawar. Pembangunan pembangkit angin pada lahan yang bertanah kurang bagus juga dapat menyebabkan rusaknya lahan di daerah tersebut.

Meskipun dampak-dampak lingkungan ini menjadi ancaman dalam pembangunan pembangkit listrik tenaga angin, namun jika dibandingkan dengan penggunaan energi fosil, dampaknya masih jauh lebih kecil. Selain itu

penggunaan energi angin dalam kelistrikan telah turut serta dalam mengurangi emisi gas buang.

2.2.4 Jenis Turbin Angin

Berdasarkan bentuknya turbin angin terbagi dalam dua jenis yaitu *Horizontal Axis Wind Turbine* dan *Vertical Axis Wind Turbine*, berikut penjelasan dari kedua jenis turbin angin tersebut:

a. *Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)*

Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) atau Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) memiliki poros rotor utama dan generator listrik berada di puncak menara. Turbin berukuran kecil diarahkan oleh sebuah baling-baling angin yang sederhana, sedangkan turbin berukuran besar pada umumnya menggunakan sebuah sensor angin yang digandengkan ke sebuah servo motor. Sebagian besar memiliki sebuah gearbox yang berfungsi untuk mengkonversi putaran kincir angin yang lambat atau cepat menjadi putaran yang stabil sesuai dengan kebutuhan generator. Karena sebuah menara menghasilkan turbulensi di belakangnya, turbin angin biasanya diarahkan melawan arah anginnya menara. Sudu-sudu turbin dibuat kaku agar mereka tidak terdorong menuju menara oleh angin berkecepatan tinggi. Sebagai tambahan, sudu-sudu itu diletakkan di depan menara pada jarak tertentu dan sedikit dimiringkan.



Gambar 2.9 Turbin Angin Sumbu Horizontal

Adapun kelebihan dan kekurangan HAWT ditunjukkan pada tabel 2.3 berikut ini:

Tabel 2.3 Kelebihan dan Kekurangan HAWT

Kelebihan	Kekurangan
<p>Laju angin yang kuat umumnya berada dikeadaan yang tinggi, menara yang tinggi membantu kincir angin untuk memperoleh akses laju angin yang lebih kuat. Di sejumlah lokasi yang memiliki geseran angin, setiap sepuluh meter lebih tinggi maka kecepatan angin yang diperoleh meningkat sebesar 20%.</p>	<ul style="list-style-type: none"> a. Menara yang tinggi serta bilah panjangnya bisa mencapai 90 meter sulit diangkut. b. HAWT yang tinggi sulit dipasang, membutuhkan Dereck yang sangat tinggi, cenderung mahal dan membutuhkan operator yang trampil. c. Kontruksi menara yang besar dibuthkan untuk menyangga sudu-sudu yang berat, gearbox, dan generator yang terletak pada <i>housing</i> (puncak menara). d. Ukurannya yang tinggi merintanggi jangkauan pandangan dan mengganggu penampilan pemandangan. e. HAWT membutuhkan mekanisme kontrol tambahan untuk membelokkan kincir ke arah angin.

b. Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)

Turbin ini dikenal juga dengan sebutan Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV) merupakan turbin yang fleksibel dalam menerima arah datangnya angin, turbin dapat menerima angin dari segala arah selain itu juga mampu bekerja pada angin dalam kecepatan yang rendah. Berbeda dengan HAWT yang memiliki poros rotor utama dan generator yang terletak di puncak menara. VAWT menopang seluruh bobot konstruksinya ditanah yakni generator,

gearbox dan komponen lainnya, hal ini dapat memudahkan dalam pemeliharaan dan meminimalkan biaya investasi. Namun, VAWT memiliki efisiensi yang lebih kecil dibandingkan dengan turbin angin sumbu horizontal. Komponen turbin angin terdiri dari rotor dengan sudu sebagai penggerak utama, generator sebagai pengubah energi mekanik menjadi energi listrik, dan sayap/ekor yang berfungsi sebagai pengubah arah dan perangkat sistem kontrol elektrik.



(Sumber: green-mechanic.com)

Gambar 2.10 Turbin Angin Sumbu Vertical

Kelebihan dan kekurangan VAWT ditunjukkan pada tabel 2.4 berikut:

Tabel 2.4 Kelebihan dan Kekurangan VAWT

Kelebihan	Kekurangan
<p>a. Tidak membutuhkan struktur menara yang besar.</p> <p>b. Bisa diletakkan lebih dekat ke tanah, membuat pemeliharaan komponen-komponennya jadi lebih mudah.</p> <p>c. VAWT memiliki kecepatan awal angin yang lebih rendah daripada HAWT yakni mulai menghasilkan listrik pada kecepatan 10 km/jam.</p>	<p>a. Tingkat efisiensi VAWT lebih kecil dibandingkan dengan HAWT.</p> <p>b. VAWT tidak mengambil keuntungan dari angin yang melaju lebih kencang dikeadaan yang lebih tinggi.</p> <p>c. Kebanyakan VAWT mempunyai torsi awal yang rendah, dan membutuhkan energi untuk mulai berputar.</p>

Lanjutan Tabel 2.4	
Kelebihan	Kekurangan
<p>d. VAWT biasanya memiliki tip speed ratio (perbandingan antara kecepatan putaran dari ujung sebuah bilah dengan laju sebenarnya angin) yang lebih rendah sehingga resiko kerusakannya kecil disaat angin berhembus sangat kencang.</p> <p>e. VAWT lebih fleksibel terhadap arah angin, posisinya tidak harus diubah jika arah angin berubah</p>	

2.2.5 Komponen-Komponen Utama Pembangkit Listrik Tenaga Angin

a. Turbin Angin (*Wind Turbine*)

Awalnya kincir angin hanyalah sebuah teknologi yang digunakan manusia untuk menumbuk biji-bijian atau memompa air, namun seiring dengan pertumbuhan zaman teknologi penggunaan kincir angin terus dikembangkan oleh manusia sebagai salah satu energi alternatif yang ramah lingkungan. Saat ini, kincir angin modern mulai banyak digunakan untuk menghasilkan energi listrik.

Kincir angin yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik disebut dengan turbin angin. Turbin angin atau *wind turbine* adalah suatu pesawat tenaga yang digerakkan oleh angin untuk memutar generator listrik dan menghasilkan energi listrik.

Prinsip dasar dari turbin angin yaitu mengkonversi energi kinetik menjadi energi mekanik (putaran). Mulanya hembusan angin ditangkap oleh sudu-sudu turbin angin yang didesain menyerupai baling-baling pesawat. Ketika angin berhembus melalui baling-baling, maka akan timbul udara bertekanan rendah di

bagian bawah dari sudu, tekanan udara yang rendah akan menarik sudu bergerak ke area tersebut. Gaya yang ditimbulkan dinamakan gaya angkat. Besarnya gaya angkat biasanya lebih kuat dari tekanan pada sisi depan baling-baling, atau yang biasa disebut tarik. Kombinasi antara gaya angkat dan tarik menyebabkan timbulnya energi mekanik dan menyebabkan turbin angin menghasilkan gerak berputar, dimana putaran tersebut yang dimanfaatkan untuk memutar generator.

Energi kinetik angin diperoleh berdasarkan sebuah benda dengan massa m , kecepatan v , maka didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$E_k = 0.5 m v^2 \dots\dots\dots(2.1)$$

Sedangkan jumlah massa yang melewati suatu tempat per unit waktu adalah :

$$m = A v \rho \dots\dots\dots(2.2)$$

dimana :

A = luas penampang (m^2)

ρ = kerapatan udara (kg/m^3)

v = kecepatan angin (m/s)

Turbin angin menurunkan kecepatannya dalam mengambil energi angin. Untuk bisa mencapai dengan tingkat efisien 100%, sebuah turbin angin harus bisa menahan kecepatan angin yang berhembus sebesar 100%, serta rotor yang digunakan dalam keadaan tersebut idealnya terbuat dari piringan solid dan dalam keadaan diam (tidak berputar sama sekali), yang didefinisikan tidak adanya energi kinetik yang akan dikonversikan. Berikut adalah persamaan besar energi angin yang bisa dikonversi menjadi daya:

$$P = \frac{1}{2} A \rho v^3 \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana:

P = daya yang dihasilkan turbin angin (Watt)

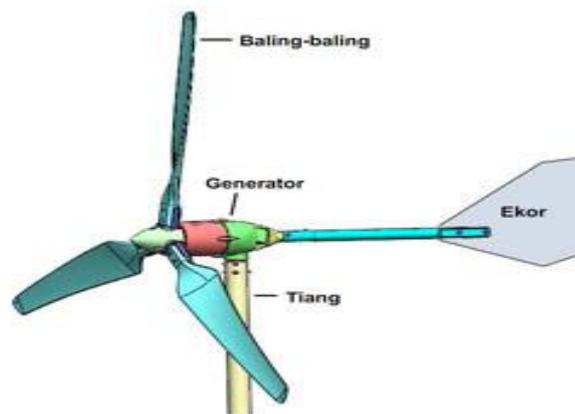
A = Luas area baling-baling (m^2)

ρ = massa jenis udara (kg/m^3)

V = kecepatan angin (m/s)

Namun, turbin angin yang berkembang hingga saat ini memiliki efisiensi tidak lebih dari 59,3% artinya energi angin maksimum yang dapat ditangkap oleh turbin angin hanya sebesar 59,3%.

Dalam desainnya turbin angin memiliki beberapa komponen utama dengan perannya masing-masing. Komponen-komponen tersebut antara lain adalah:

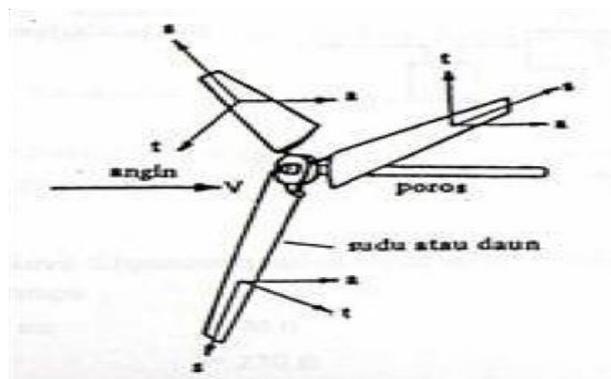


(Sumber: mit.ilearning.me)

Gambar 2.11 Struktur Turbin Angin

1. Sudu (Baling-baling)

Alat yang berfungsi untuk menerima energi kinetik dan dikonversikan menjadi energi gerak atau energi mekanik. Cara kerjanya menggunakan prinsip-prinsip aerodinamika seperti halnya pesawat.



(Sumber: eri prasetyo, 2002)

Gambar 2.12 Gaya-Gaya Angin Pada Sudu

Pada prinsipnya gaya-gaya angin yang bekerja pada sudu-sudu kincir angin terdiri atas tiga gaya yaitu :

- Gaya aksial (a) merupakan gaya yang mempunyai arah sama dengan angin, idealnya gaya ini harus ditampung oleh poros dan bantalan.
- Gaya sentrifugal (s) adalah yang meninggalkan titik tengah. Memiliki bila kipas yang bentuknya simetris, semua gaya sentrifugal menghasilkan resultan yang sama dengan nol (0).
- Gaya tangensial (t) merupakan gaya yang menghasilkan momen, dimana gaya ini bekerja tegak lurus pada radius dan yang merupakan gaya produktif.

2. Ekor

Ekor pada turbin angin berfungsi untuk mengubah posisi turbin agar sesuai dengan arah angin dan dapat memperoleh energi angin secara maksimal. Ekor juga bisa digunakan untuk melakukan penggulangan yang berfungsi untuk memperlambat putaran turbin saat terjadi angin yang memiliki batas kecepatan putaran dengan cara menekuk ekor agar arah angin tidak mendarat pada bagian samping turbin hal ini menyebabkan turbin berputar pelan karena arah angin tidak pas di tengah turbin.

3. Tower

Konstruksi yang digunakan sebagai penopang dari komponen turbin bagian atas seperti rotor, gearbox dan generator. Tower bisa dibuat dari pipa baja, beton, rangka besi. Bila tower bertambah tinggi maka energi angin yang didapat semakin besar.

4. Gearbox

Gearbox berfungsi untuk mentransfer putaran dari rotor ke generator. Namun sebelum putaran tersebut ditransfer, putaran terlebih dahulu dikonversi oleh gearbox agar sesuai dengan kebutuhan generator. Umumnya rotor kincir angin menghasilkan putaran yang rendah, sementara generator bekerja pada putaran yang tinggi.

5. Generator

Generator adalah suatu peralatan yang berfungsi untuk mengkonversi atau mengubah energi mekanik (gerak) menjadi energi listrik (elektrik) dengan perantara induksi medan magnet. Perubahan energi ini terjadi krena adanya perubahan medan magnet pada kumparan jangkar (tempat terbangkitnya tegangan pada generator).



(Sumber: new.abb.com/motors-generators/generators/generators-for-wind-turbines/)

Gambar 2.13 Generator Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Prinsip dasar generator bisa dibidang sangat sederhana, generator bekerja menggunakan hukum *Faraday*. Hukum *Faraday* menyatakan bila sebatang penghantar berada pada medan magnet yang berubah-ubah, maka pada penghantar tersebut akan timbul *Gaya Gerak Listrik (GGL)*. Kumparan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi (*exciter*) yang akan disuplai oleh arus searah, maka akan menimbulkan fluks yang besarnya tetap terhadap waktu. Kemudian pemicu gerak awal (*Prime Mover*) yang sudah terkopel dengan rotor segera dioperasikan sehingga rotor akan berputar pada kecepatan nominalnya, sesuai dengan persamaan:

$$n = f \frac{120}{p} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana:

n = kecepatan putar motor (rpm)

p = jumlah kutub rotor

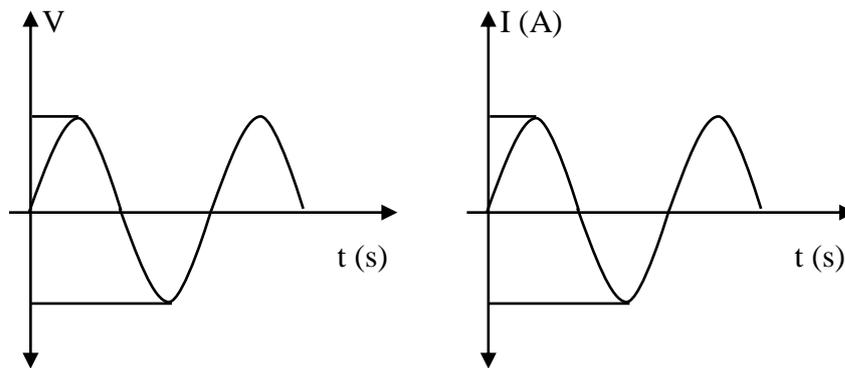
f = frekuensi (Hz)

Perputaran rotor akan memutar medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan tersebut. Medan putar yang dihasilkan pada rotor akan menginduksikan tegangan pada kumparan jangkar, sehingga akan menimbulkan putaran medan pada stator. Perputaran tersebut akan menghasilkan fluks magnetik yang besarnya tidak tetap terhadap waktu. Adanya perubahan fluks magnetik yang terjadi suatu kumparan akan menimbulkan GGL Induksi pada ujung-ujung kumparan tersebut.

Tegangan yang dihasilkan generator sangat bergantung pada besar kecepatan putaran motor, besar fluks magnetik yang timbul pada medan magnet, jumlah kawat pada kumparan yang memotong fluks dan bergantung pada konstruksi generator itu sendiri.

Berdasarkan arah arus dan tegangan, generator dibagi menjadi dua jenis yakni:

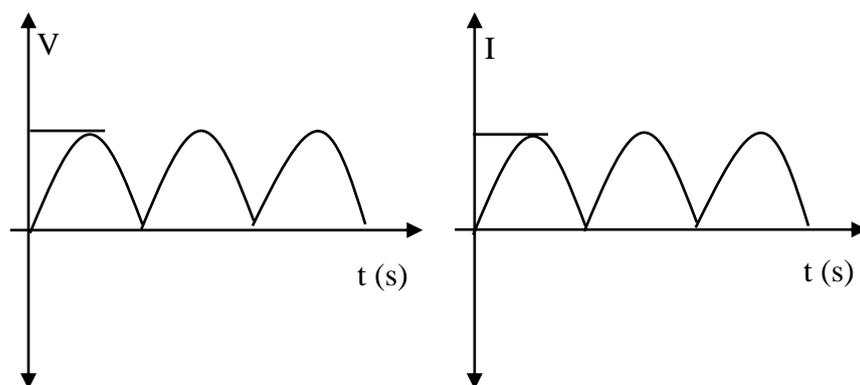
- Generator AC (*Alternating Current*) adalah generator yang menghasilkan *Gaya Gerak Listrik* (GGL) induksi bolak-balik. Arus dan tegangan listrik AC memiliki sifat yang besar nilainya berubah terhadap waktu serta mengalir dalam dua arah. Sifat tersebut dapat dilihat pada grafik berikut:



Gambar 2.14 Grafik Hubungan Antara Tegangan Dengan Waktu dan Grafik Hubungan Antara Arus Dengan Waktu Generator AC

Grafik tersebut membuktikan bahwa GGL induksi generator AC memiliki nilai yang berubah terhadap waktu, dimana gelombang yang dihasilkan berupa gelombang sempurna atau sinus.

- Generator DC (*Direct Current*) adalah generator yang menghasilkan gaya gerak listrik (GGL) induksi searah atau arus listrik searah. Berbeda dengan generator AC, sifat dari arus dan tegangan Generator DC yakni besar nilainya tetap terhadap waktu dan hanya mengalir dalam satu arah. Sifat arus dan tegangan generator DC dapat dilihat pada grafik berikut:



Gambar 2.15 Grafik Hubungan Antara Tegangan Dengan Waktu dan Grafik Hubungan Antara Arus Dengan Waktu Generator DC

Grafik tersebut membuktikan bahwa GGL induksi generator DC memiliki nilai yang tetap terhadap waktu, dimana gelombang yang dihasilkan berupa setengah gelombang.

Dua komponen utama yang menentukan jenis dan karakteristik generator yaitu rotor dan stator.

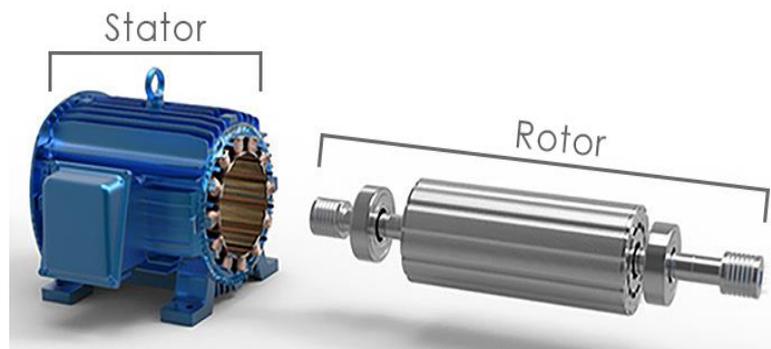
- Rotor

Rotor merupakan elemen yang berputar pada generator atau disebut juga poros generator. Elemen ini yang dihubungkan dengan alat penggerak (turbin) untuk membuat putaran pada generator. Pada rotor terdapat kutub-kutub magnet dengan lilitan-lilitan kawat yang dialiri oleh arus searah (Eksitasi).

Kumpulan medan pada rotor disuplai dengan medan arus searah atau sistem eksitasi untuk menghasilkan fluks dimana arus searah tersebut dialirkan ke rotor melalui sebuah cincin. Jadi, apabila rotor berputar maka fluks magnet yang timbul akibat arus searah tersebut akan memotong konduktor dari stator yang mengakibatkan timbulnya *Gaya Gerak Listrik* (GGL).

- Stator

Stator merupakan elemen yang diam pada generator. Struktur stator terdiri dari rangka stator, inti stator dan belitan-belitan stator (belitan jangkar). Rangka stator merupakan rumah dari semua bagian-bagian generator yang terbuat dari besi, peralatan ini berbentuk lingkaran. Inti stator merupakan bagian tengah dari stator yang terbuat dari bahan *ferromagnetic* atau besi lunak disusun berlapis-lapis tempat terbentuknya fluks magnet. Sedangkan belitan-belitan stator terbuat dari tembaga disusun melingkar sesuai alur-alur stator, belitan stator berfungsi tempat terbentuknya *Gaya Gerak Listrik* (GGL).



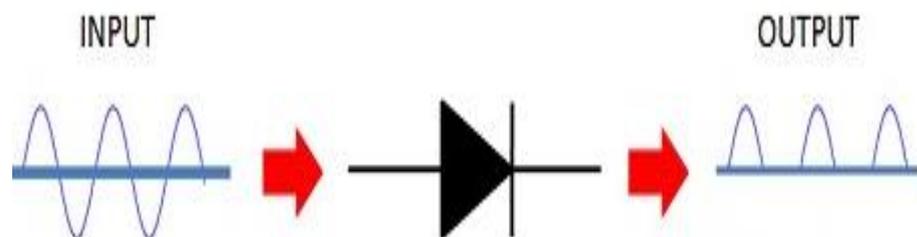
(Sumber: www.indotara.co.id/electric-motor-distributor-alat-berat-indonesia)

Gambar 2.16 Stator dan Rotor

6. Rectifier

Rectifier atau penyearah adalah suatu rangkaian yang memiliki masukan yang berupa sinyal AC dan memiliki keluaran yang berupa sinyal DC. Umumnya pembangkit listrik menggunakan generator AC, maka dibutuhkan *rectifier* untuk merubah output generator yang berbentuk AC menjadi DC. Karena baterai hanya menyimpan energi listrik dalam bentuk DC, maka output generator AC dikonversi menjadi DC agar tidak terjadi kerusakan pada baterai.

Dioda merupakan komponen utama rangkaian *rectifier*, karena karakteristik yang dimiliki dioda yang hanya akan melewatkan arus listrik menjadi satu arah serta menjaga agar tidak ada arus listrik yang mengalir dari arah sebaliknya. Karakteristik dioda dapat dilihat pada gambar 2.17 berikut ini:



(Sumber: teknikelektronika.com)

Gambar 2.17 Karakteristik Sinyal Dioda

b. Baterai

Pembangkit listrik tenaga angin tidak selamanya dapat beroperasi karena bergantung pada hembusan angin yang tidak tentu keadaannya atau selalu berubah di waktu sekarang ke waktu lainnya. Serta kincir angin hanya dapat berputar pada kecepatan angin tertentu saja. Maka diperlukan elemen penyimpan energi listrik agar dapat menggunakan energi listrik secara kontinyu. Namun, bila arus listrik yang ditimbulkan terlalu besar, maka arus listrik akan disalurkan langsung menuju jala-jala listrik setelah sebagiannya disimpan pada baterai.

Baterai adalah sebuah peralatan listrik yang didalamnya terjadi proses elektrokimia yang *reversible* dengan efisiensi yang tinggi. Maksud dari proses elektrokimia *reversible* yaitu pada baterai dapat berlangsung proses perubahan energi kimia menjadi energi listrik dan juga dapat merubah energi listrik menjadi energi kimia. Hal ini berlangsung proses pengosongan dan pengisian kembali baterai dengan cara regenerasi.

Umumnya baterai dapat digolongkan menjadi dua jenis. Pertama, baterai primer yaitu baterai yang hanya dapat digunakan hanya satu kali karena tidak dapat diisi ulang lagi. Sedangkan, baterai sekunder yaitu baterai yang dapat digunakan berulang-ulang kali, dengan cara diisi kembali setelah energinya habis terpakai.

Salah satu jenis baterai yang biasa digunakan pada penyimpanan energi pembangkit listrik yakni aki. Dalam susunannya aki terdiri dari beberapa sel, dimana setiap selnya hanya mampu menyimpan tegangan sebesar 2 volt. Misalnya dibutuhkan tegangan sebesar 8 volt maka susunannya berjumlah 4 sel. Ada dua jenis aki yang biasanya digunakan pada pembangkit listrik, antara lain:

1. Aki basah, merupakan jenis aki yang berisi cairan asam sulfat (H_2SO_4) dengan sel-selnya yang menggunakan bahan timbal (Pb). Ciri utamanya memiliki lubang dengan penutup yang berfungsi untuk mengisi air aki saat mengalami kekurangan yang diakibatkan oleh penguapan saat terjadi reaksi kimia antara sel dan air aki. Kelebihan aki jenis ini yaitu murah, mudah didapat dan dapat digunakan berulang kali bila perawatannya baik. Sedangkan kelemahannya, yaitu cairan asam sulfat yang didalamnya mudah menguap,

uap air aki jenis ini mengandung hidrogen yang mudah terbakar apabila terkena percikan api dan memiliki sifat *self-discharge* paling besar dibanding jenis aki lainnya sehingga harus dilakukan penyetruman ulang saat didiamkan terlalu lama.

2. Aki kering atau aki MF (*Maintenace Free*), adalah jenis aki yang didesain khusus agar mampu menekan tingkat penguapan air aki. Uap aki tersebut dapat mengalami kondensi sehingga dapat menjaga level air dalam kondisi ideal tanpa diperlukan pengisian air aki kembali. Kelebihan aki kering yaitu bebas perawatan karena desainnya yang kuat. Sedangkan kelemahannya yaitu masa pemakaiannya yang lebih singkat dibandingkan dengan aki basah dan relatif lebih mahal.



Gambar 2.16 Aki

Berikut syarat-syarat yang harus dipenuhi dalam pemilihan baterai :

- Sanggup menyimpan daya dalam jumlah besar.
- Daya yang tersimpan dapat dalam jumlah yang kecil maupun besar tanpa mengalami kerusakan.
- Memiliki ketahanan pakai yang kuat.
- Keluaran tegangan dari baterai harus bebas dari *noise*.

Setiap jenis baterai memiliki kapasitas yang berbeda-beda. Kapasitas yang akan menentukan jumlah energi yang dapat disimpan dan yang dapat dikeluarkan. Satuan dari kapasitas baterai yaitu *Ampere Hour* (Ah). Satuan Ah

menentukan nilai arus yang dapat dikeluarkan tiap waktunya (jam), misalnya sebuah baterai 12 V 100 Ah maka arus yang dapat diberikan yakni 100 ampere selama satu jam. Kapasitas baterai dapat ditentukan melalui persamaan berikut:

$$C_n = \frac{2 \times W \times F}{V_n} \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana:

- C_n = Kapasitas baterai (Ah)
- 2 = 1 / 0,5 (0,5 adalah besarnya *Depth of Discharge* dalam persen)
- W = Konsumsi energi harian (Wh)
- F = Jumlah hari otonomi
- V_n = Tegangan sistem (Volt)

c. Inverter

Inverter merupakan kebalikan dari *rectifier* yaitu suatu rangkaian yang memiliki masukan yang berupa sinyal DC dan memiliki keluaran berupa sinyal AC. Apabila energi yang tersimpan pada baterai ingin dialihkan menuju beban listrik AC, maka perlu menggunakan inverter sebagai rangkaian pembalik. Karena pada umumnya beban rumah tangga lebih banyak menggunakan beban AC. Berikut persamaan untuk menghitung kapasitas inverter:

$$P_{inverter} = P_{max} \times 125\% \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana:

- P_{inverter} = Daya inverter (Watt)
- P_{max} = Beban puncak (Watt)
- 125% = Kompensasi