



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Angin

Pada dasarnya energi angin terjadi karena ada perbedaan suhu antara udara panas dan udara dingin. Indonesia yang dilewati khatulistiwa merupakan daerah yang panas, maka udaranya menjadi panas, mengembang dan menjadi ringan, bergerak ke arah kutub yang lebih dingin. Sebaliknya di daerah kutub yang dingin, udaranya menjadi dingin dan turun ke bawah. Dengan demikian perputaran udara terjadi berupa perpindahan udara dari Kutub Utara ke Garis Khatulistiwa, dan sebaliknya. Pada prinsipnya bahwa angin terjadi karena adanya perbedaan suhu udara pada beberapa tempat di muka bumi. Oleh karena itu, Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki sumber energi angin yang baik.¹¹

Angin adalah udara yang bergerak dari daerah yang bertekanan tinggi ke daerah yang bertekanan rendah, atau dari daerah yang bersuhu rendah ke daerah yang bersuhu tinggi. Udara yang panas di suatu tempat di permukaan bumi akan mengalami pengembangan atau pemuaiian sehingga tekanan udara menjadi lebih rendah dibandingkan sekitarnya. Udara yang lebih dingin dan bertekanan lebih tinggi di tempat lain akan bergerak menuju daerah ini untuk mengisi kekosongan yang ada (Pusat Ilmu Geografi Indonesia, t.thn.).

Angin, yang disebabkan oleh gerakan molekul udara di atmosfer, berasal dari energi matahari. Sekitar 2% dari sinar matahari yang mengalir ke bumi diubah menjadi tenaga angin, yang mana hasil akhirnya berubah menjadi panas dikarenakan gesekan dengan lapisan batas atmosfer. Radiasi matahari memanaskan di berbagai tempat di bumi dengan kecepatan yang berbeda pada siang dan malam hari, hal ini menyebabkan berbagai bagian atmosfer memanaskan dalam waktu yang

¹¹ Izzuddin Robbany, Skripsi: " *Simulasi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Pada Plth Bayu Baru Bantul D.I. Yogyakarta* "(Yogyakarta : Universitas Indonesia, 2018)



berbeda. Udara panas menaik dan udara yang lebih sejuk tertarik untuk menggantikannya, sehingga menyebabkan terjadinya angin.¹⁰

Energi angin (*wind energy*) merupakan sumber energi yang juga dapat dikatakan berasal dari energi matahari melalui radiasi panas matahari melalui radiasi panas matahari di permukaan bumi yang berbeda-beda sehingga menimbulkan perbedaan temperatur dan rapat massa udara di permukaan bumi yang mengakibatkan terjadinya perbedaan tekanan hingga kemudian menjadi aliran udara. Aliran udara tersebut dapat dipercepat dengan adanya perputaran bumi pada porosnya dengan kecepatan putar konstan.⁴ Energi angin merupakan energi kinetik atau energi dari gerakan.

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana:

E_k = Energi Kinetik (Joule)

m = Masa udara (kg)

v = Kecepatan (m/s)

Energi kinetik angin pada dasarnya gerakan atau gerakan molekul udara, meskipun udara nya kecil, namun kecepatan dan area menyapu yang diberikan angin cukup besar untuk menciptakan energi yang cukup besar.

2.2 Jenis – jenis Energi Angin

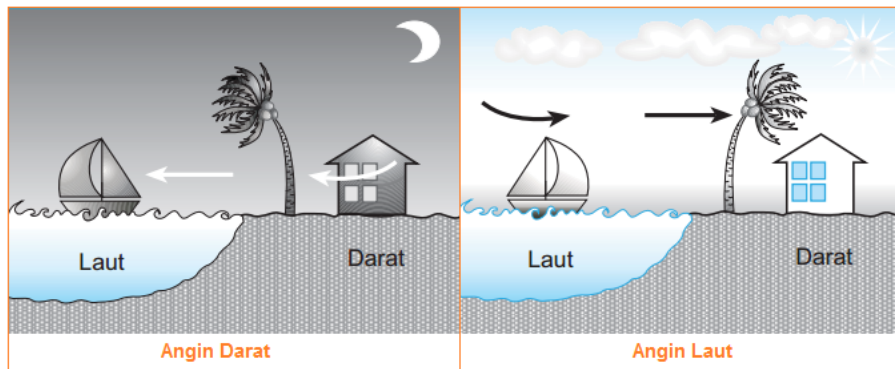
1. Angin Darat dan Angin Laut

Angin darat dan angin laut terjadi akibat adanya perbedaan sifat antara daratan dan lautan dalam menyerap dan melepaskan energi panas matahari (Gambar 2.1). Daratan menyerap dan melepas energi panas lebih cepat daripada lautan. Angin darat terjadi ketika pada malam hari energi panas yang diserap permukaan bumi

¹⁰Reza hamulian, *Perancangan Bilah Horizontal Axis Wind Turbine Tipe Taperless dengan Airfoil Naca 4412 dengan Daya 500 Watt* (Padang : Universitas Bung Hatta, 2021)

⁴ Nursuhud, Djati dan Astu Pudjanarsa, *Mesin Konversi Energi* (Yogyakarta: Penerbit Andi, 2013), hlm. 37.

sepanjang hari akan dilepas kan lebih cepat oleh daratan (udara dingin) Sementara itu, di lautan energi panas sedang dalam proses dilepaskan ke udara.



(a)

(b)

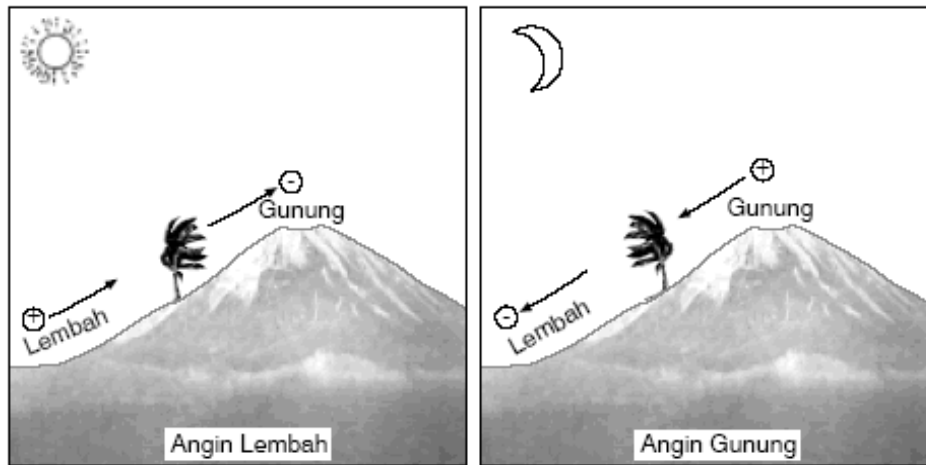
Gambar 2.1 Sirkulasi Terjadinya Angin Darat dan Laut

Gerakan konvektif tersebut menyebabkan udara dingin dari daratan bergerak menggantikan udara yang naik di lautan sehingga terjadi aliran udara dari darat ke laut. Angin darat terjadi pada tengah malam dan dini hari. Adapun angin laut terjadi ketika pada pagi hingga menjelang sore hari, daratan menyerap energi panas lebih cepat dari lautan sehingga suhu udara di darat lebih panas daripada di laut. Akibatnya udara panas di daratan akan naik dan digantikan udara dingin dari lautan Maka terjadilah aliran udara dari laut ke darat. Angin laut terjadi pada sore dan malam hari.⁴

2. Angin Gunung dan Angin Lembah

Angin lembah terjadi ketika matahari terbit, di mana puncak gunung merupakan daerah yang pertama kali mendapat panas dan sepanjang hari selama proses tersebut, bagian lereng gunung mendapat energi panas lebih banyak daripada lembah, sehingga menyebabkan perbedaan suhu antara keduanya. Udara panas dari lereng gunung naik dan diganti kan dengan udara dingin dari lembah. Akibatnya terjadi aliran udara dari lembah menuju gunung. Adapun pada sore hari lembah akan melepaskan energi panas dan puncak gunung yang telah mendingin akan mengalirkan udara ke lembah Aliran udara tersebut dinamakan angin gunung

³ Hamdi, *Energi Terbarukan* (Jakarta : Kencana, 2016) , hlm.148



(a)

(b)

Gambar 2.2 Angin Lembah dan Angin Laut

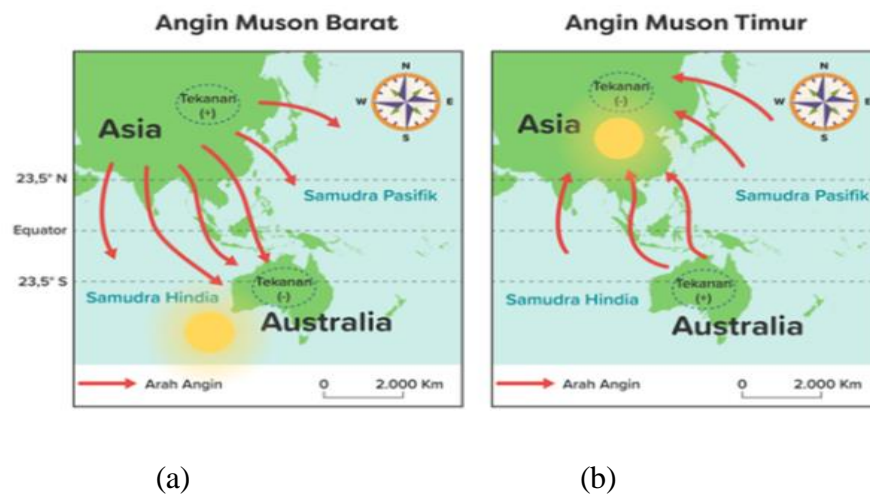
3. Angin Ribut/Puyuh

Angin ribut biasa juga dikenal dengan puting beliung, yaitu angin kencang yang datang secara tiba-tiba, mempunyai pusat, bergerak melingkar seperti spiral hingga menyentuh permukaan bumi dan menghilang dalam waktu singkat (3-5 menit). Kecepatan angin rata-ratanya berkisar antara 30-40 knot. Angin ini berasal dari awan Cumulonimbus (Cb) yaitu awan yang bergumpal berwarna abu-abu gelap dan menjulang tinggi. Namun tidak semua awan Cumulonimbus menimbulkan puting beliung. Puting beliung dapat terjadi di mana saja, di darat maupun di laut dan jika terjadi di laut durasinya lebih lama daripada di darat. Angin ini lebih sering terjadi pada siang atau sore hari, terkadang pada malam hari dan lebih sering terjadi pada peralihan musim (pancaroba). Luas daerah yang terkena dampaknya sekitar 5-10 km, karena itu bersifat sangat lokal.

4. Angin Periodik

Angin monsun (minimal tiga bulan) antara periode yang satu dan yang lainnya. Angin monsun di Indonesia dibagi dua, yaitu pertama, angin monsun Asia yaitu angin yang berasal dari daratan Asia menuju wilayah Indonesia dengan membawa uap air lebih banyak dari biasanya, sehingga sebagian wilayah Indonesia bagian selatan Khatulistiwa sering hujan. Kedua, angin monsun

Australia, angin ini berhubungan dengan angin timur yaitu angin yang berasal dari daratan Australia, maka belahan bumi selatan akan mempunyai suhu yang panas dan tekanan udara yang tinggi maka pergerakan angin dari belahan bumi selatan menuju belahan bumi utara.



Gambar 2.3 Persebaran Angin Monsun

5. Angin Fohn

Angin Fohn adalah angin yang bertiup pada suatu wilayah dengan temperatur yang berbeda. Angin Fohn terjadi karena ada gerakan massa udara yang naik pegunungan yang tingginya lebih dari 200 meter di satu sisi lalu turun di sisi lain. Angin fohn yang jatuh dari puncak gunung bersifat panas dan kering. Biasanya angin ini bersifat panas merusak dan dapat menimbulkan korban. Tanaman yang terkena angin ini bisa mati dan manusia yang terkena angin ini bisa turun daya tahan tubuhnya terhadap serangan penyakit.³

2.3 Potensi Energi Angin di Indonesia

Indonesia adalah suatu negara yang dikaruniai potensi alam yang begitu besar, salah satunya potensi energi angin yang tersebar hampir di seluruh wilayah Indonesia. Gambar 2.4 menunjukkan peta potensi energi angin di Indonesia. Berdasarkan hasil pemetaan distribusi kecepatan angin, didapat kecepatan angin yang tinggi (6 - 8 m/s) di *onshore* terjadi di pesisir selatan pulau Jawa, Sulawesi

³Ibid, hlm.150.

Selatan, Maluku, dan NTT. Sementara kecepatan angin di daerah *offshore* menunjukkan angka lebih dari 8 m/s terjadi di *Offshore* Banten, *offshore* Sukabumi, *offshore* Kupang, *offshore* Pulau Wetar, dan *offshore* Kab Jeneponto, dan *offshore* Kab Kepulauan Tanimbar. Kecepatan angin maksimum terjadi pada periode Juni, Juli, Agustus (JJA) saat terjadi monsun Australia sedangkan minimum terjadi pada periode Maret, April, dan Maret (MAM) saat peralihan monsun Asia ke monsun Australia.¹²

Berdasarkan hasil pemetaan LAPAN (Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional) di 120 lokasi yang ada di Indonesia, didapatkan beberapa daerah yang memiliki kecepatan angin diatas 5 m/detik. Daerah-daerah tersebut adalah Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan dan Pantai Selatan Jawa. Angin dengan kecepatan ini tergolong berskala menengah dengan potensi kapasitas 10 hingga 100 kW.



Gambar 2.4 Peta Potensi Energi Angin Indonesia 2020

Tim Lentera Angin Nusantara (LAN) mengadakan pengujian potensi energi angin dan juga turbin angin di Pantai Cipatujah, Tasikmalaya-Jawa Barat sejak Januari 2012. Berdasarkan hasil pengujian didapatkan bahwa kecepatan angin di

¹²Esdm, "Potensi Energi Angin di Indonesia," P3tKEBTKE, 20 April 2022, <https://p3tkebt.esdm.go.id/pilot->

atas 3 m/s pada ketinggian 5 meter berhembus selama 2510 jam atau sekitar 104 hari dengan rata-rata energi per harinya sebesar 490 Wh (LAN, 2012).

Berdasarkan kriteria turbin angin seperti TSD-500 dibutuhkan angin berkecepatan minimal 3 m/s untuk mulai berproduksi (LAN, 2012). Daerah yang memiliki kecepatan rata-rata angin di atas 3 m/s banyak ditemui pada pesisir Selatan Jawa, Sumatera, dan pulau bagian timur Indonesia. Dalam menentukan energi angin di suatu daerah bukan hanya dengan mengetahui kecepatan angin rata-rata pada daerah tersebut karena kecepatan angin sangat fluktuatif setiap waktunya, melainkan perhitungan lama/durasi kecepatan angin tersebut berhembus setiap harinya sehingga dapat diketahui besar energinya (LAN, 2014). Hal-hal yang mempengaruhi kecepatan angin disuatu daerah adalah:¹⁵

1. Relief permukaan bumi

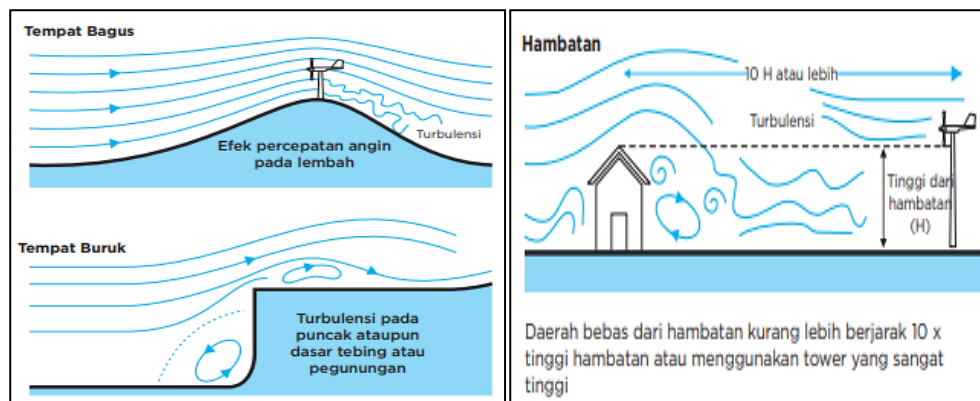
Relief yang tidak rata dapat menjadi penghambat bagi aliran angin

2. Gradien barometris

Perbedaan tekanan udara dari dua isobar yang jaraknya 111 km. Semakin besar gradien barometrisnya, maka semakin cepat tiupan anginnya.

3. Ketinggian tempat

Semakin tinggi lokasinya maka semakin kencang pula angin yang bertiup



Gambar 2.5 Hambatan Aliran Angin

¹⁵ Mukhammad Ulinnuha, Faktor Yang Mempengaruhi Kecepatan Angin (<https://tester-uji.com/>, diakses pada 25 April 2022)



4. Panjang siang dan malam

Angin bertiup lebih cepat pada siang hari dibandingkan pada malam hari. Hal ini berkaitan dengan angin darat dan angin laut.

5. Letak lintang

Berkaitan dengan posisi matahari. Di daerah lintang tinggi sedikit mendapatkan sinar matahari sehingga suhu udaranya lebih dingin.

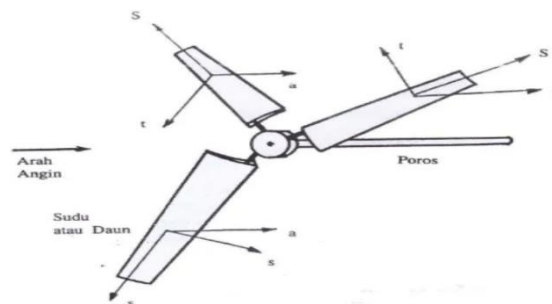
2.4 Syarat Angin Untuk PLTB³

Ada banyak jenis angin, namun tidak semua jenis angin dapat digunakan untuk memutar turbin PLTB. Klasifikasi dan kondisi angin yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik ditunjukkan pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2.

Tabel 2.1 Kondisi Angin

Tabel Kondisi Angin			
Kelas Angin	Kecepatan Angin (m/d)	Kecepatan Angin (km/jam)	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

³Hamdi, Op.cit., hal 143



Gambar 2.6 Kincir Angin dengan Sudu

Gaya-gaya angin yang bekerja pada sudut-sudut kincir pada dasarnya terdiri atas tiga komponen, sebagai berikut :

1. Gaya aksial (a), yang mempunyai arah sama dengan arah angin dan gaya ini harus ditampung oleh poros dan bantalan.
2. Gaya sentrifugal (s), yang meninggalkan titik tengah, bila kipas bentuknya simetris maka semua gaya sentrifugal akan saling meniadakan atau resultannya sama dengan nol.
3. Gaya tangensial (t), menghasilkan momen, yang bekerja tegak lurus pada radius dan yang merupakan gaya produktif.³

Tabel 2.2 Tingkatan Kecepatan Angin 10 Meter di Atas Permukaan Tanah

Kelas	Kecepatan	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 ~ 5,4	Wajah terasa ada angin, daun bergoyang pelan, petunjuk arah angin bergerak
5.	5,5 ~ 7,9	Debu jalan, kertas beterbangan, ranting pohon bergoyang
6.	8,0 ~ 10,7	Ranting pohon bergoyang, bendera berkibar

³ Ibid, hal 154



7.	10,8 ~ 13,8	Ranting pohon besar bergoyang, air berombak kecil
8.	13,9 ~ 17,1	Ujung pohon melengkung, embusan angin terasa di telinga
9.	17,2 ~ 20,7	Dapat mematahkan ranting pohon, jalan berat melawan arah angin
10.	20,8 ~ 24,4	Dapat mematahkan ranting pohon, rumah roboh
11.	24,5 ~ 28,4	Dapat mematahkan ranting pohon, menimbulkan kerusakan
12.	28,5 ~ 32,6	menimbulkan kerusakan parah
13.	32,7 ~ 36,9	Tornado

Klasifikasi angin pada kelompok 3 adalah batas minimum dan angin pada kelompok 8 adalah batas maksimum energi angin yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik.⁵

2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu

Pembangkit listrik tenaga bayu atau angin merupakan suatu pembangkit listrik yang menggunakan angin sebagai sumber untuk menghasilkan energi listrik. Dalam realitas, tenaga angin adalah bentuk tenaga surya yang dikonversi. Hal tersebut karena proses terjadinya angin dimulai karena adanya perbedaan penyinaran matahari diberbagai tempat dengan kecepatan yang berbeda pada siang dan malam hari. Pembangkit ini mengkonversi angin menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin angin.

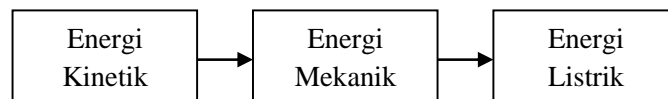
Suatu pembangkit listrik dari energi angin merupakan hasil dari penggabungan beberapa turbin angin sehingga dapat menghasilkan listrik. Pada mulanya, energi angin memutar sudut-sudut turbin, lalu di teruskan untuk memutar rotor pada generator yang letaknya di bagian belakang turbin angin. Generator mengubah energi putar rotor menjadi energi listrik dengan prinsip hukum Faraday, yaitu bila terdapat penghantar di dalam suatu medan magnet, maka pada kedua ujung penghantar tersebut akan dihasilkan beda potensial.

⁵ Radita Arindya, *Energi Terbarukan* (Yogyakarta : Teknosain, 2018) , hlm. 143



Ketika poros generator berputar, maka akan terjadi perubahan fluks pada stator yang akhirnya dihasilkan tegangan dan arus listrik.⁵

Proses pemanfaatan energi angin dilakukan melalui 2 tahapan konversi energi, pertama aliran angin akan menggerakkan rotor berputar sesuai dengan angin yang bertiup (perubahan energi kinetik menjadi energi mekanik), kemudian putaran dari rotor dihubungkan dengan generator dari generator tersebut dihasilkan tenaga listrik (energi mekanik menjadi energi listrik).



Gambar 2.7 Diagram Blok Konversi Energi Angin

Prinsip PLTB berusaha mengoptimalkan potensi energi kinetik angin yang menerapkan "bidang sapuan" bilah/sudu dari kincir/turbin kebentuk energi mekanikal berupa kecepatan putar dan torsi pada bila audunya, dan kemudian kecepatan pular dan torsi (gaya untuk memutar sudu terhadap sumbu kincir) menjadi masukan (*input*) untuk penggerak generator (pembangkit listrik) yang nantinya bekerja berdasarkan kaidah tangan kanan *Flemming*, untuk mengkonversikan energi mekanikal bentuk energi listrik. Tahapan konversi energi diawali dari energi kinetik angin menjadi energi gerak (mekanik) rotor kemudian menjadi energi listrik.



Gambar 2.8 Diagram Blok *Wind Turbine* PT. Lentera Bumi Nusantara

Pada gambar di atas, menjelaskan hasil putaran bilah pada turbin akan memutar generator yang kemudian menghasilkan tegangan AC. Setelah itu, tegangan AC dialirkan ke controller (teknologi pengamanan dan konversi energi).

⁵ Ibid , hlm.141



Pada controller itu, terdapat rectifier yang berfungsi untuk merubah tegangan AC menjadi DC. Dan terdapat buck converter yang berfungsi untuk merubah tegangan DC besar menjadi tegangan DC kecil.

Tahap terakhir dari system kerja pembangkit listrik adalah penyimpanan energi listrik yang dihasilkan yang akan digunakan untuk kebutuhan sehari-hari. Energi listrik akan disimpan ke baterai, pada baterai itu sendiri akan terjadi reaksi elektrokimia charging dan discharging. Charging bekerja saat baterai berfungsi sebagai beban dan sumber energinya dari generator, sedangkan discharging bekerja saat baterai berfungsi sebagai sumber energi untuk pengisian beban lainnya misalnya, lampu. Selain baterai, ada juga teknologi lain yang dinamakan inverter, berfungsi untuk merubah tegangan DC yang disimpan baterai menjadi tegangan AC, hal itu dilakukan agar dapat digunakan keperluan sehari-hari misalnya lampu, lemari es, televisi, telepon, dan kegiatan lainnya.

Besarnya energi listrik yang dihasilkan dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu:

1. Kecepatan angin, akan mempengaruhi kecepatan putaran rotor yang akan menggerakkan generator.
2. Rotor (kincir), rotor turbin sangat bervariasi jenisnya, diameter rotor akan berbanding dengan daya listrik. Semakin besar diameter maka akan menghasilkan listrik yang semakin besar Berdasarkan jumlah sudut rotor (baling-baling) yang paling banyak digunakan berkisar antara 3-6.
3. Jenis Generator Generator terbagi dalam beberapa karakteristik yang berbeda, generator yang sesuai untuk sistem konversi energi angin adalah generator yang dapat menghasilkan arus listrik pada putaran rendah



2.6 Turbin Angin

Turbin angin merupakan alat konversi energi angin menjadi energi mekanik. Prinsip kerja dari turbin angin ini dengan menangkap angin menggunakan sudu turbin yang di desain seperti sayap pesawat terbang. Ketika angin bertiup melalui sudu tersebut, maka akan timbul udara bertekanan rendah pada bagian bawah sudu, tekanan udara yang rendah akan menarik bilah untuk bergerak ke area tersebut. Gaya yang ditimbulkan dinamakan gaya angkat. Besarnya gaya angkat ini biasanya lebih kuat dari tekanan pada depan sisi sudu, atau yang biasa disebut gaya tarik. Kombinasi antara gaya angkat dan gaya tarik menyebabkan rotor berputar seperti *propeller* dan memutar generator untuk kemudian dikonversi menjadi energi listrik.

Energi angin (P_{wind}) merupakan hasil dari setengah kali masa jenis udara (ρ) dengan luas penampang sapuan bilah/*blade* (A) dan pangkat tiga dari kecepatan anginnya (v^3) sehingga dirumuskan sebagai berikut.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana:

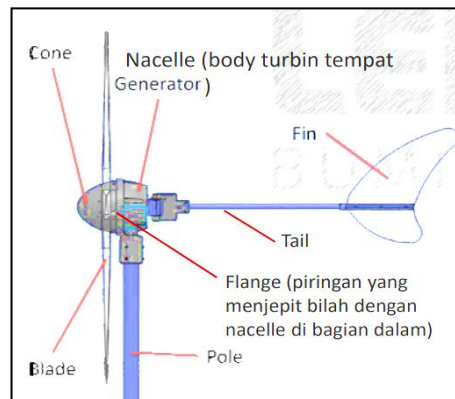
P_w = Daya angin (watt)

ρ = Masa jenis udara (1.225 kg/m³)

A = Luas area turbin yang dilewati angin (m²)

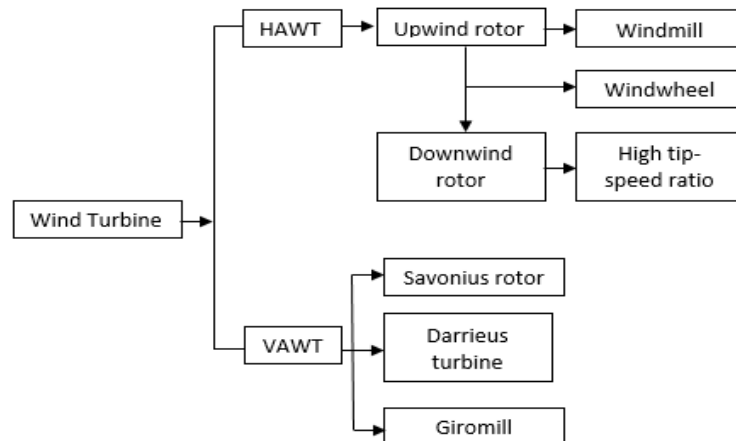
V = Kecepatan angin (m/s)

Berdasarkan rumus diatas, diketahui bahwa parameter yang paling signifikan adalah kecepatan angin. Semakin besar kecepatan angin pada daerah pembangkit energi angin tersebut maka semakin besar pula daya yang dihasilkan. Solusi untuk daerah yang memiliki kecepatan angin rendah adalah pada diameter dari sudu/baling-baling, semakin panjang diameter maka daya yang dihasilkan semakin besar.



Gambar 2.9 Wind Turbine The Sky Dancer – 500

Bagian utama dari turbin angin berupa generator (tipe *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)*), *blade*, *cone*, *fin*, dan ekor. The *Sky Dancer* (TSD)-500 di PT Lentera Bumi Nusantara ini merupakan turbin angin sumbu horizontal dengan 3 *blade propeller*. Turbin ini mulai berputar pada kecepatan angin 2,5 m/s dan mulai memproduksi listrik pada kecepatan angin 3 m/s. Daya maksimal yang mampu di hasilkan oleh turbin angin adalah 500 Wattpeak (Wp). Turbin ini dapat bertahan sampai pada kecepatan angin 33 m/s.⁶



Gambar 2.10 Blok Diagram Turbin Angin

Turbin angin/blade merupakan bagian penting dalam suatu sistem turbin angin sebagai komponen yang berinteraksi langsung dengan angin. Secara umum

⁶ Lentera Angin Nusantara, *Pengenalan Teknologi Pemanfaatan Energi Angin*, (2022), hal 12



terdiri dari 2 tipe yaitu *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dan *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT).²

2.6.1 Turbin Angin Sumbu *Horizontal* (HAWT)

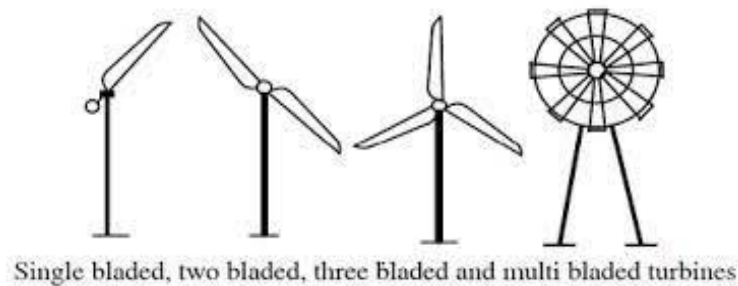
Turbin angin sumbu *horizontal* (HAWT) merupakan turbin angin yang memiliki bantalan rotor *horizontal* dan generator listrik, yang kedua peralatan tersebut terletak di atas menara. Sebagian besar memiliki sebuah *gearbox* yang mengubah perputaran kincir yang pelan menjadi lebih cepat berputar. Karena sebuah menara menghasilkan turbulensi di belakangnya. Contoh penerapan turbin angin *horizontal* tersebut adalah turbin angin 3 sudu (*blades*) atau 2 sudu.⁵

Turbin angin sumbu *horizontal* dapat dirancang dengan rotor-*upwind* untuk menerima angin dari rotor atau rotor-*downwind* untuk menerima angin melewati arah belakang mengenai menara dan nacelle sebelum menyentuh rotor.¹⁵ Kebanyakan turbin angin modern memiliki konfigurasi desain melawan angin dan jangkauan dari *prototipe* di dalam kelas MW ke kelas lebih kecil dengan nominal *output* dari 20 ke 150 kW. Parameter desain utama HAWT adalah diameter rotor, jumlah dan sudut puntir bilah rotor, ketinggian menara, daya listrik terukur, dan strategi pengendalian.

Ketinggian menara HAWT sangat penting karena kecepatan angin meningkat seiring bertambahnya ketinggian. Diameter rotor (D) sama pentingnya karena menentukan area (A) yang dibutuhkan untuk memenuhi tingkat daya keluaran tertentu. Sistem HAWT paling cocok untuk pembangkit tenaga listrik dan turbin mikro yang terdiri dari dua hingga enam bilah rotor.

²Tim contained energy indonesia, Buku Panduan Energi Yang Terbarukan, hal 40-42

⁵ Radita Arindya, Op.Cit., hlm.171



Gambar 2.11 Jenis turbin angin HAWT

HAWT mempunyai ciri sumbu putar turbin sejajar terhadap tanah. Turbin jenis ini paling banyak dikembangkan di berbagai negara. Cocok dipakai untuk menghasilkan listrik. Terdiri dari dua tipe, yaitu mesin *up wind* dan mesin *downwind*.

1. Mesin *upwind* rotor: berhadapan dengan angin.
2. Mesin *downwind* rotor: ditempatkan di belakang tower. Rotor dapat dibuat lebih fleksibel, lebih ringan daripada mesin *upwind*. Kelemahannya adalah bahwa angin harus melewati tower terlebih dahulu sebelum sampai pada rotor sehingga menambah beban (*fatigue load*) pada turbin.

Prakondisi

- a. Mulai operasikan pada saat kecepatan angin mencapai 3-5m/detik
- b. Memerlukan pemilihan lokasi yang tepat

Keuntungan

- a. Memberikan kinerja yang lebih baik pada produksi energi dibandingkan dengan turbin angin dengan sumbu *vertikal*
- b. Turbin angin berkapasitas 3kW menghasilkan listrik 5.000-7.000 kWh per tahun (kecepatan angin 5.4m/detik)

Kekurangan

- a. Memerlukan kecepatan angin yang lebih tinggi untuk bisa memproduksi listrik
- b. Memerlukan menara yang tinggi untuk menangkap kecepatan angin yang cukup



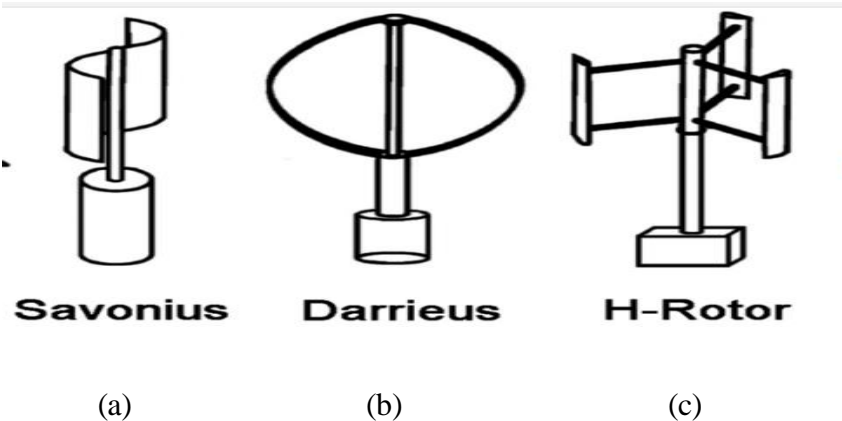
- c. Tambahan sistem ekor (yaw) lebih kompleks

2.6.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal (VAWT)

Turbin angin sumbu *vertikal* (VAWT) merupakan turbin angin yang memiliki bantalan rotor *vertikal* (memiliki poros atau sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus), sebuah generator dan roda gigi (gebor) yang terletak di bawah sudu, dan memiliki sudu rotor yang berbentuk khusus/unik yang didesain. VAWT memiliki ciri sumbu putar vertikal terhadap tanah. Turbin jenis ini jarang dipakai untuk turbin komersial. Rotornya berputar relatif pelan (<100 rpm), tetapi memiliki momen gaya yang kuat, sehingga dapat dipakai untuk menggiling biji-bijian, pompa air tetapi tidak cocok untuk menghasilkan listrik (di atas 1.000 rpm cocok untuk menghasilkan listrik) Sebenarnya dapat dipakai gearbox untuk menaikkan kecepatannya tetapi efisiensinya turun dan mesin sulit untuk dimulai VAWT terdiri dua tipe yaitu

1. Tipe dorong (Savonius) ujung blade tidak pernah bergerak lebih cepat daripada kecepatan angin.
2. Tipe angkat (Darrieus) ukuran blade relatif besar dan tinggi sehingga menimbulkan getaran Biasanya memakai dua atau tiga blade. Turbin jenis ini menghasilkan lebih banyak daya output dan memiliki efisiensi tinggi.
3. Aplikasi turbin angin skala kecil di perdesaan.

Ada tiga tipe rotor pada turbin angin jenis ini, yaitu: Savonius, Darrieus, dan H rotor. Turbin Savonius memanfaatkan gaya drag sedangkan Darrieus dan H rotor memanfaatkan gaya lift. VAWT awalnya lebih berkembang untuk konversi energi mekanik, tetapi seiring dengan perkembangan desain, turbin tipe ini banyak digunakan untuk konversi energi listrik skala kecil



Gambar 2.12 Jenis turbin angin VAWT

Generator turbin angin jenis ini terletak di dasar turbin. Konfigurasi ini membuat VAWT lebih mudah dibandingkan dengan HAWT yang semua komponennya dipasang pada ketinggian tertentu. Namun, VAWT memiliki efisiensi yang lebih rendah dari pada HAWT karena sejumlah besar hambatan udara pada rotor untuk beberapa desain, serta output daya yang lebih sedikit.

Prakondisi

Mulai beroperasi pada saat kecepatan angin mencapai 1.5-3/detik

Keuntungan

- a. Pemeliharaan lebih mudah dan dikenal tidak bising
- b. Tidak perlu diarahkan ke arah angin
- c. Bisa ditempatkan di lokasi di mana turbin angin bersumbu *horizontal* akan sesuai

Kekurangan

- a. Kinerja lebih buruk dalam memproduksi energi dibandingkan dengan turbin angin bersumbu *horizontal* Turbin Angin
- b. Turbin angin sumbu *vertikal* berkapasitas 3kW menghasilkan 2.500-6.500 kWh per tahun. (Kecepatan angin: 5,4 m/detik) tergantung disain yang dipakai.
- c. Tidak bisa hidup sendiri, terkadang turbin angin bersumbu vertikal memerlukan motor listrik kecil untuk menghidupkannya.
- d. Kegagalan baling-baling karena aus.



2.7 Unjuk Kerja Turbin Angin

2.7.1 Torsi dan koefisien daya

Pertimbangan utama dari suatu performa turbin angin adalah torsi hasilan dari rotor serta koefisien dayanya. Hal ini menunjukkan seberapa besar energi yang berhasil diekstrak dari instalasi rotor pada turbin. Secara teoritis, nilai koefisien daya maksimum yang dapat dicapai oleh suatu turbin angin adalah 59.26 %. Hal ini didapatkan dari teori momentum *elementer Betz* yang menjelaskan tentang bagaimana energi angin dapat dikonversikan menjadi bentuk energi lainnya.

Koefisien daya adalah perbandingan antara nilai energi mekanik yang dihasilkan dari perputaran rotor dan energi mekanik dari angin yang melintasi rotor. Keluaran energi mekanik dari rotor merupakan daya yang bervariasi dengan torsi dan kecepatan putar dari rotor. Dalam persamaan matematis ditulis sebagai:⁸

$$P = T \frac{U_{tmax}}{r} = T\omega \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

Sementara Koefisien daya, dapat dicari menggunakan persamaan berikut :

$$C_p = \frac{\text{Energi yang diekstrak}}{\text{Energi kinetik angin}} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V^3} = \frac{\tau \omega}{\frac{1}{2} \rho A V^3} = C_T \cdot \lambda \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana:

P = daya yang dapat diekstrak (Watt)

T = torsi turbin angin (N.m)

ω = putaran turbin angin (rad/s)

ρ = massa jenis udara (kg/m³) = 1.225 kg/m³

A = luas penampang turbin (m²) = $\pi \cdot r^2$

⁸ Launsieus Nogur dkk, *Pengaruh Sudut Blade Turbin Angin Poros Horizontal Model Contra Rotating Terhadap Daya Dan Efisiensi Dengan Posisi Rotor Blade Sain Bersebrangan*, Jurnal Teknik Elektro, Vol 01



V = kecepatan angin (m/s)

C_T = koefisien torsi

λ = *tip speed ratio* (TSR)

2.7.2 Tip Speed Ratio (TSR)

Tip speed ratio merupakan salah satu parameter penting dalam perancangan suatu turbin angin. *Tip speed ratio* (TSR) dilambangkan sebagai λ merupakan perbandingan antara kecepatan *tangensial* maksimum dari turbin dengan kecepatan *free stream* yang melintasi turbin. sehingga secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\lambda = TSR = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot V} \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana :

λ = *Tip speed ratio*

D = Diameter turbin (m)

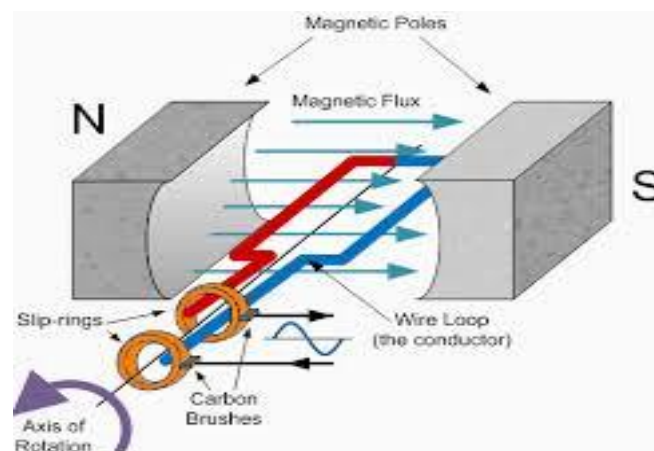
n = Putaran rotor (rpm)

V = kecepatan angin (m/s)

Dengan mengetahui *Tip speed ratio*, maka dapat diketahui performa dari suatu turbin angin. Performa tersebut menyangkut seberapa besar torsi hasilan dari turbin dapat bekerja untuk kecepatan angin tertentu. Karakteristik dari masing-masing turbin tentunya berbeda-beda. Beberapa turbin mampu bekerja pada *tip speed ratio* yang rendah, ada pula yang baru dapat bekerja pada *tip speed ratio* yang tinggi. Selain itu suatu jenis turbin angin, tidak serta merta dapat bekerja maksimal pada setiap *tip speed ratio*. Pada satu titik *tip speed ratio* tertentu, suatu turbin dapat mengekstraksi energi secara maksimal ada juga ekstraksi rendah dan ada saat dimana ekstraksi energi tidak dapat dilakukan sama sekali.

2.8 Generator

Generator adalah mesin listrik dinamis yang mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik. Generator bolak-balik (AC) bekerja berdasarkan hukum Faraday, yaitu “Jika sebuah penghantar memotong garis-garis gaya dari suatu medan magnetik (*flux*) yang konstan, maka pada penghantar tersebut akan timbul tegangan.”¹³

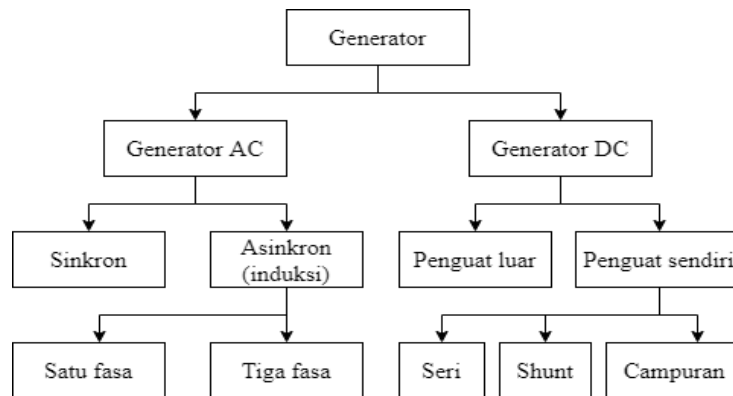


Gambar 2.13 Prinsip kerja generator

Generator berdasarkan arusnya dibagi menjadi 2 yaitu generator AC (arus bolak-balik) dan generator DC (Arus searah). Baik generator AC dan DC memiliki 2 komponen yang sama yaitu stator dan rotor. Hanya saja desain komponen keduanya memiliki perbedaan. Pada generator AC medan magnet akan diciptakan oleh rotor sementara stator berperan sebagai konduktor yang akan menerima pergerakan elektron. Sedangkan pada generator DC magnet berperan sebagai stator dan kumparan berperan sebagai rotor.¹⁴

¹³ Dickson Kho, Pengertian Hukum Faraday (<https://teknikelektronika.com/pengertian-hukum-faraday-bunyi-hukum-faraday/>), diakses pada 22 April 2022)

¹⁴ Amrie Muchta, Perbedaan Generator AC dan Generator DC (<https://www.autoexpose.org/2018/07/perbedaan-generator-ac-dan-dc.html>), diakses pada 23 April 2022)



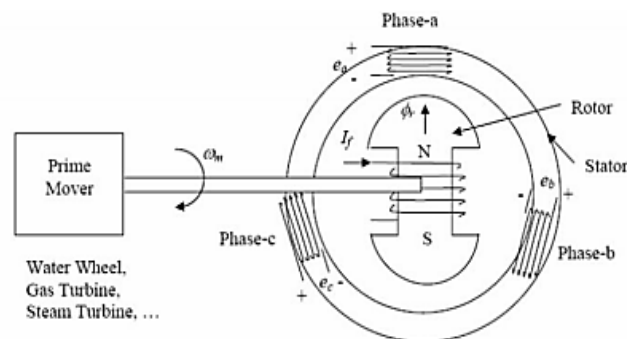
Gambar 2.14 Diagram Blok Jenis Generator

- a. Generator sinkron
Kecepatan putar rotor dengan kutub – kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan putar pada stator. Bentuk gelombang dari tegangan yang dihasilkan disinkronkan dengan kecepatan rotor. Penerapannya pada PLTA, PLTU, PLTG, dan lain-lain.
- b. Generator asinkron
Rotor diputar oleh sumber penggerak dengan kecepatan lebih besar dari pada kecepatan sinkronnya. Sehingga suatu konduktor yang berputar didalam medan magnet (kumparan stator) akan membangkitkan tegangan. Frekuensi tegangan output diatur oleh sistem daya yang terhubung generator induksi. Jika generator memasok beban sendiri, maka frekuensi output akan sedikit lebih rendah. Penerapannya pada wind turbine with gearbox dan hydro turbine
- c. Generator penguat terpisah digunakan untuk meningkatkan serta elektroplating. Ini digunakan dalam tujuan daya dan pencahayaan menggunakan medan regulator
- d. Generator penguat sendiri shunt, salah satu penerapannya untuk daya serta pencahayaan biasa menggunakan regulator.
- e. Generator penguat sendiri seri, salah satu penerapannya pada lampu busur
- f. Generator penguat sendiri Campuran, salah satu penerapannya untuk menyediakan catu daya untuk mesin las DC.



2.8.1 Generator Sinkron

Generator sinkron banyak digunakan pada pembangkit tenaga listrik. generator sinkron merupakan generator yang jumlah putaran rotornya sama dengan jumlah putaran medan magnet pada stator. Kecepatan sinkron ini dihasilkan dari kecepatan putar rotor dengan kutub – kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan putar pada stator. belitan atau kumparan jangkar ditempatkan pada stator sedangkan belitan medan ditempatkan pada rotor



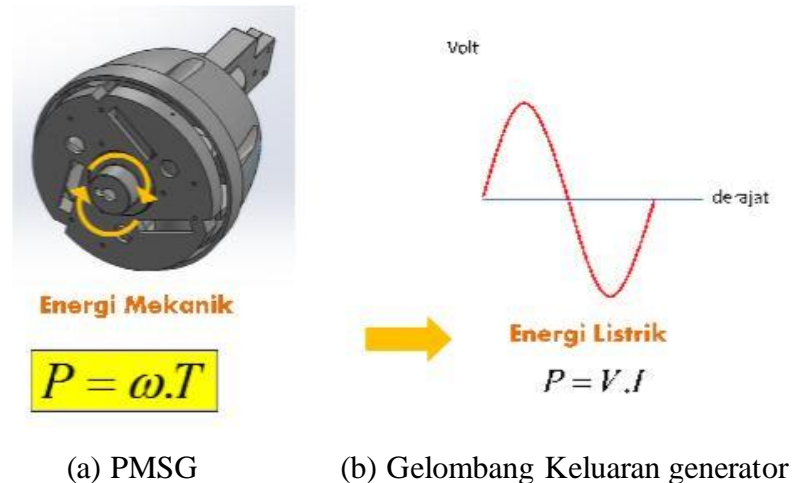
Gambar 2.15 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Prinsip kerja dari generator sinkron dapat dinyatakan sebagai Rotor disuplai dengan arus DC (I_f) yang kemudian menghasilkan fluks magnet (ϕ_f). Rotor digerakkan oleh turbin dengan kecepatan konstan sebesar (n). Garis gaya magnet bergerak menginduksi kumparan pada stator.

2.8.2 *Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)*

Generator sinkron magnet permanen atau *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) adalah generator yang medan eksitasinya dihasilkan oleh magnet permanen bukan kumparan sehingga *fluks* magnetik dihasilkan oleh medan magnet permanen. Istilah sinkron disini merujuk pada fakta bahwa rotor dan medan magnet berputar dengan kecepatan yang sama karena medan magnet dihasilkan melalui magnet permanen yang terpasang pada permukaan ataupun tertanam pada rotornya.

Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) yang biasa dipakai pada pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) bekerja mengubah torsi (T) dan kecepatan putar rotor (ω) yang diterimanya dari blade menjadi nilai tegangan (V) dan arus (I). Hasil keluaran dari generator ini berupa listrik AC.⁶



Gambar 2.16 Konversi energi oleh PMSG

PMSG mempunyai keuntungan secara ekonomi dan teknik, sehingga PMSG sering dipakai sebagai generator turbin angin dan memiliki kekurangan.

Kelebihan

- Desain yang sederhana.
- Umur generator lebih awet (reliable).
- Efisiensi dan energi yang dihasilkan lebih tinggi.
- Tidak membutuhkan sumber arus listrik DC dari luar untuk membangkitkan medan magnet.
- Perubahan karakteristik efisiensi dan panas dari mesin karena tidak adanya rugi-rugi medan.
- Keandalan yang lebih tinggi karena tidak digunakannya slip rings.

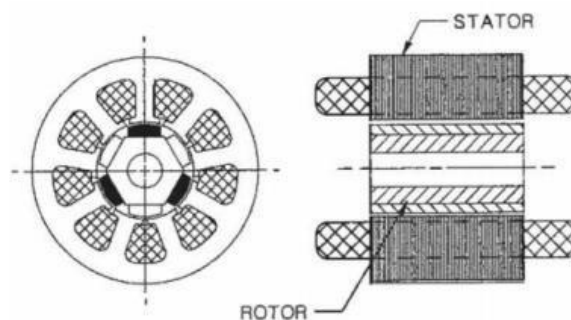
⁶ Lentera Angin Nusantara, *Energi Angin*, (2022), hal 17

Kekurangan

- a. Tidak efisien jika menggunakan magnet permanen dengan produksi fluks magnet rendah.
- b. Pembangkitan daya listrik terbatas sejauh kemampuan magnet dalam membentuk medan magnet, sehingga tidak cocok digunakan dengan skala besar.

2.8.3 Konstruksi Generator Sinkron Magnet Permanent

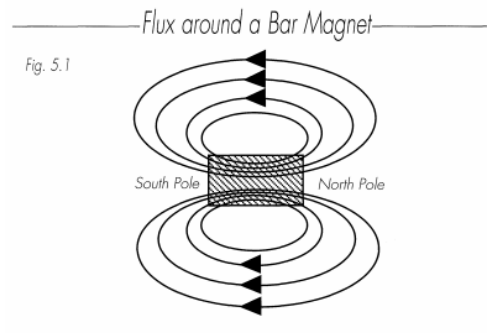
Konstruksi generator sinkron magnet permanen sama dengan generator sinkron pada umumnya yakni terdapat stator dan rotor. Perbedaannya terdapat pada sumber eksitasi dimana generator sinkron magnet permanen menggunakan medan magnet permanen sebagai sumber eksitasi medan magnet yang menuju stator dan menggantikan sumber suplai eksternal untuk generator. Magnet permanen pada generator ini terdapat pada rotornya.



Gambar 2.17 Generator sinkron magnet permanen

Sebuah magnet memiliki dua kutub, utara dan selatan. *Fluks* muncul dari kutub utara dan menemukan jalannya kembali ke kutub selatan²⁰ (Gambar 2.17). Berikut adalah 'sirkuit magnetik'. *Fluks* menyukai besi, baja, dan bahan magnetik lainnya. *Fluks* tidak hanya menarik mereka, tetapi jumlah *fluks* dalam sirkuit bias menjadi jauh lebih besar jika sirkuit tersebut terbentuk dari material tersebut.

⁷ Hugh Piggot, Op.cit., hal 64



Gambar 2.18 Garis gaya magnet

(Sumber: Windpower Workshop, H. Piggott)

Generator memiliki kumparan dari kawat tembaga, sering juga disebut belitan/*coil*. Kumparan dibagi menjadi dua tipe sebagai berikut.

- Kumparan utama, atau kumparan keluaran dimana daya dibangkitkan
- Kumparan medan atau eksitasi yang harus dialiri arus untuk membangkitkan medan magnet di dalam mesin. Biasa disebut sebagai mesin eksitasi.

Permanent magnet alternator (generator magnet permanen) tidak membutuhkan kumparan medan karena mereka tereksitasi secara permanen⁷.

2.8.4 Prinsip Kerja PMSG

PMSG memiliki prinsip kerja yang sama dengan generator sinkron tetapi pada rotornya kumparan medan diganti dengan magnet permanen. PMSG menghasilkan *flux* pada kutub-kutub rotor yang memotong kumparan jangkar sehingga menghasilkan GGL bolak-balik pada ujung stator sehingga kumparan jangkar pada stator menghasilkan tegangan induksi (Pane, E., 2009).

Rotor merupakan bagian berputar yang ada pada generator. Pada PMSG, rotor merupakan tempat tersusunnya magnet permanent sebagai pembangkit medan magnet yang diperlukan untuk pembangkit listrik. Induksi elektromagnetik yang ada pada PMSG menggunakan hukum *fareday* yang berbunyi “adanya perubahan *fluks* magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan

⁷ Ibid, hal 65



GGL pada kumparan tersebut”. Tidak hanya hukum faraday, pada PMSG ini digunakan hukum *lenz* yang berbunyi “GGL induksi yang muncul berlawanan arah dengan perubahan fluks menyebabkan arus mengalir”¹⁰

2.9 Daya Input

Daya input pada generator dihasilkan dari torsi dan kecepatan putar pada rotor dapat dirumuskan :¹

$$P_{IN} = \omega \times \tau \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana :

P = Daya *input*

τ = Torsi (Nm)

ω = Putaran (Rpm)

2.10 Daya Output

Rumus Daya output pada generator ini adalah :

$$P_{OUT} = V \times I \dots\dots\dots (2.9)$$

$$P_{OUT} = \frac{V^2}{R} \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana :

P = Daya *output* (watt)

V = Tegangan (volt)

I = Arus (ampere)

R = Beban (Ohm)

¹⁰ M. Raffi Akbar, *Pengaruh Konfigurasi Star Delta Pada Rangkaian Coil Terhadap Kurva Karakteristik Generator PMSG 12S8P Menggunakan Software Magnet Infolytica*, 2020, hal 14-17

¹ Zuriman Anthony, *Mesin Listrik Arus Bolak-Balik* (Yogyakarta:ITP, 2019), hlm.35



2.11 Efisiensi

Efisiensi pembangkit listrik tenaga angin merupakan perbandingan antara daya generator angin dan daya angin dari turbin angin mutu sebuah generator sangat ditentukan oleh besarnya efisiensi generator tersebut. Makin besar efisiensi sebuah generator maka generator tersebut makin bagus. Efisiensi ini dihitung berdasarkan perbandingan antara daya keluaran generator terhadap daya masukan awal generator yang dapat dijabarkan sebagai berikut :

$$\text{Efisiensi}(\eta) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana :

P_{out} = Daya keluaran (watt)

P_{in} = Daya masukan (watt)¹

¹ Ibid, hlm.56