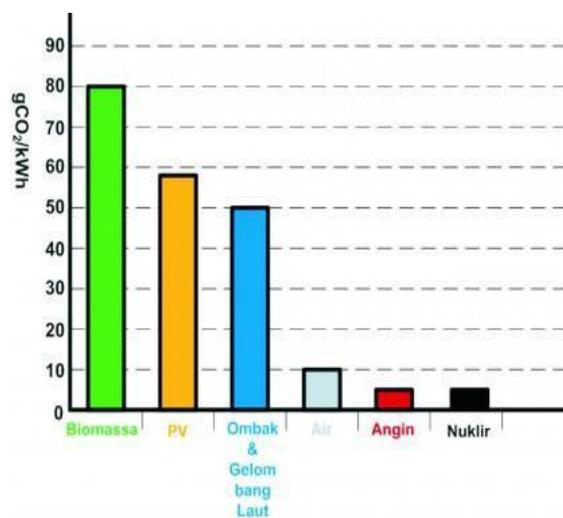


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Angin

Energi angin merupakan salah satu potensi energi terbarukan yang dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap kebutuhan energi listrik domestik, khususnya wilayah terpencil. Dibandingkan dengan sumber energi alternatif lainnya ekstraksi energi dari angin memiliki carbon footprint yang relatif rendah. Carbon footprint yang dimaksud di sini adalah emisi CO₂ yang dihasilkan dari keseluruhan proses produksi turbin sampai dengan operasi pemanfaatan sumber energi tersebut. Untuk Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) carbon footprint meliputi proses pembuatan turbin, generator, konstruksi, dan operasi dari SKEA. Perbandingan carbon footprint dari SKEA dibandingkan dengan sistem konversi energi lainnya dapat dilihat pada gambar di bawah ini.

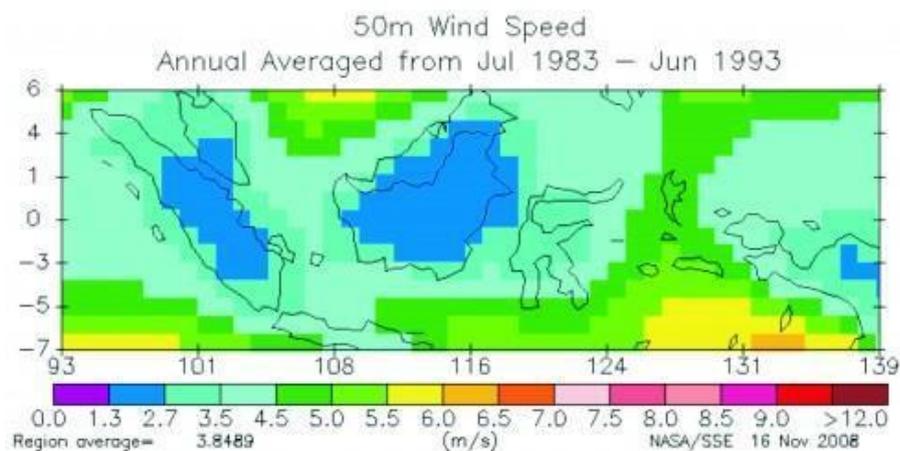


Gambar 2.1. Perbandingan Carbon Footprint dari Beberapa Sumber Energi Alternatif (Data dari UK Parliamentary Office of Science and Technology, November 2006)

Berkurangnya kecepatan angin). Energi kinetik yang hilang ini dikonversikan menjadi energi mekanik yang memutar turbin angin, turbin angin ini terhubung dengan rotor dari generator.

Generator mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Indonesia memiliki karakteristik kecepatan angin rata-rata (V_{mean}) yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan negara-negara pengguna SKEA seperti Finlandia, Amerika Serikat, dan negara-negara lainnya. Daerah-daerah di Indonesia umumnya memiliki V_{mean} antara 3-6 m/s, berbeda dengan negara-negara Eropa yang berkisar di antara 9-12 m/s. Keunikan karakter angin Indonesia menimbulkan masalah ketika teknologi SKEA, yang umumnya dirancang mengikuti karakteristik angin negara-negara Eropa, diaplikasikan di Indonesia.

Adapun data kecepatan rata-rata angin di Indonesia dapat dilihat pada Gambar di bawah ini yang didapat dari NASA.



Gambar 2.2. Data Kecepatan Angin Rata-rata Indonesia

Dari Gambar 2.2 dapat dilihat bahwa daerah yang memiliki kecepatan angin rata-rata terbesar adalah daerah Nusa Tenggara, 5,5-6,5 m/s. Sedangkan pulau-pulau besar di Indonesia, seperti Sumatra, Kalimantan, Jawa, Sulawesi dan Papua hanya memiliki kecepatan angin rata-rata antara 2,7 – 4,5 m/s. Kecepatan angin pada daerah-daerah di Indonesia memang relatif lebih kecil dari daerah-daerah konsumen energi angin seperti Finlandia, Belanda, dan Amerika Serikat

Suatu pembangkit listrik dari energi angin merupakan hasil dari penggabungan dari beberapa turbin angin sehingga akhirnya dapat menghasilkan listrik.

Cara kerja dari pembangkitan listrik tenaga angin ini yaitu awalnya energi angin memutar turbin angin. Turbin angin bekerja berkebalikan dengan kipas angin (bukan menggunakan listrik untuk menghasilkan listrik, namun menggunakan angin untuk menghasilkan listrik). Kemudian angin akan memutar sudut turbin, lalu diteruskan untuk memutar rotor pada generator di bagian belakang turbin angin. Generator mengubah energi gerak menjadi energi listrik dengan teori medan elektromagnetik, yaitu poros pada generator dipasang dengan material ferromagnetik permanen.

Setelah itu di sekeliling poros terdapat stator yang bentuk fisiknya 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. Energi Listrik ini biasanya akan disimpan kedalam baterai sebelum dapat dimanfaatkan. Secara sederhana proses pembangkitan listrik dengan kincir angin adalah listrik dialirkan melalui kabel penyebaran yang dibagikan ke rumah-rumah, kantor, sekolah, dan sebagainya. Turbin untuk pemakaian umum berukuran 50-750 kilowatt. Sebuah turbin kecil, kapasitas 50 kilowatt, digunakan untuk perumahan, piringan parabola, atau pemompaan air.

4 Kelebihan dan Kekurangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Kelebihan utama dari penggunaan pembangkit listrik tenaga angin secara prinsipnya adalah disebabkan karena sifatnya yang terbaru. Pengharapan sumber energi ini tidak akan membuat sumber daya angin yang berkurang seperti halnya penggunaan bahan bakar fosil. Oleh karena itu tenaga angin dapat diterima dalam ketahanan energi dunia di masa depan. Tenaga angin juga merupakan sumber energi yang ramah lingkungan, dimana penggunaannya tidak mengakibatkan emisi gas buang atau polusi terhadap lingkungan.

Penetapan sumber daya angin dan persetujuan untuk pengadaan ladang angin merupakan proses yang paling lama untuk pengembangan proyek energi angin. Hal ini dapat memakan waktu hingga 4 tahun dalam kasus ladang angin yang besar yang membutuhkan studi dampak lingkungan yang luas.

Pengeluaran karbon ke lingkungan dalam sumber listrik tenaga angin diperoleh dari proses manufaktur komponen serta proses pengerjaannya di tempat yang akan didirikan pembangkit listrik tenaga angin. Namun dalam operasinya membangkitkan listrik, secara praktis pembangkit listrik tenaga angin ini tidak menghasilkan pengeluaran yang berarti. Jika dibandingkan dengan pembangkit listrik dengan batubara, pengeluaran karbon dioksida pembangkit listrik tenaga angin ini hanya seperseratusnya saja. Namun pembangkit listrik tenaga angin ini tidak sepenuhnya ramah lingkungan, terdapat beberapa masalah yang terjadi akibat penggunaan sumber energi angin sebagai pembangkit listrik, diantaranya adalah dampak visual, derau suara, beberapa masalah ekologi, dan keindahan.

Dampak yang paling serius dikritik adalah penggunaan ladang angin sebagai pembangkit listrik membutuhkan luas lahan yang tidak sedikit dan tidak mungkin untuk disembunyikan. Penempatan ladang angin pada lahan yang masih dapat digunakan untuk keperluan yang lain dapat menjadi persoalan tersendiri bagi penduduk setempat. Selain mengganggu pandangan akibat pemasangan barisan pembangkit angin, penggunaan lahan untuk pembangkit angin dapat mengurangi lahan pertanian serta pemukiman. Hal ini yang membuat pembangkitan tenaga angin di daratan menjadi terbatas. Beberapa aturan mengenai tinggi bangunan juga telah membuat pembangunan pembangkit listrik tenaga angin dapat terhambat. Penggunaan tiang yang tinggi untuk turbin angin juga dapat menyebabkan terganggunya cahaya matahari yang masuk ke rumah-rumah penduduk. Perputaran baling-baling 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 baling-baling turbin angin dengan frekuensi konstan lebih mengganggu dari pada suara angin pada ranting pohon.

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 baling-baling 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.

Ladang angin lepas pantai memiliki masalah tersendiri yang dapat mengganggu pelaut dan kapal-kapal yang berlayar. Konstruksi tiang pembangkit listrik tenaga angin dapat mengganggu permukaan dasar laut. Hal lain yang terjadi dengan konstruksi di lepas pantai adalah terganggunya kehidupan bawah laut. Efek negatifnya dapat terjadi seperti di Irlandia, dimana terjadinya polusi yang bertanggung jawab atas berkurangnya stok ikan di daerah pemasangan turbin angin. Dalam operasinya, pembangkit listrik tenaga angin bukan tanpa kegagalan dan kecelakaan. Kegagalan operasi baling-baling dan juga jatuhnya es akibat perputaran telah menyebabkan beberapa kecelakaan dan kematian. Kematian juga terjadi kepada beberapa penerjun dan pesawat terbang kecil yang melewati turbin angin. Reruntuhan puing-puing berat yang dapat terjadi merupakan bahaya yang perlu diwaspadai, terutama di daerah padat penduduk dan jalan raya. Kebakaran pada turbin angin dapat terjadi dan akan sangat sulit untuk dipadamkan akibat tingginya posisi api sehingga dibiarkan begitu saja hingga terbakar habis. Hal ini dapat menyebarkan asap beracun dan juga dapat menyebabkan kebakaran berantai yang membakar habis ratusan lahan pertanian. Kebocoran minyak pelumas juga dapat terjadi dan dapat menyebabkan terjadinya polusi daerah setempat, dalam beberapa kasus dapat mengkontaminasi air minum.

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.



Fakta Tentang Energi Angin

- Fakta 1: kekuatan angin terdiri dari mengubah energi dari angin ke bentuk energi lain. Ada berbagai cara untuk memanfaatkan itu. Misalnya kincir angin menghasilkan energi mekanik, memungkinkan layar untuk menggerakkan kapal dan menghasilkan listrik.
- Fakta 2: Kincir Angin telah digunakan sejak tahun 2000 SM dan pertama kali dikembangkan di Persia dan China. Pelaut kuno berlayar ke negeri-negeri jauh dengan memanfaatkan angin. Petani digunakan tenaga angin untuk memompa air dan untuk menggiling biji-bijian. Saat ini penggunaan paling populer dari energi angin mengubahnya menjadi energi listrik untuk memenuhi kebutuhan energi kritis planet.
- Fakta 3: Energi angin kurang dimanfaatkan seperti yang sekarang dan memiliki potensi yang luar biasa untuk masa depan. Meskipun telah terjadi peningkatan 25% dalam penggunaan turbin angin dalam dekade terakhir, energi angin masih memberikan hanya sebagian kecil dari energi dunia.
- Fakta 4: Energi angin sebagian besar dimanfaatkan oleh turbin angin yang tinggi. Pada banyak bangunan dan memiliki tiga bilah sekitar 60 meter panjangnya. Mereka menyerupai baling-baling raksasa pesawat terbang dipasang pada tongkat. Bilah berputar oleh angin yang mentransfer gerak ke poros dihubungkan ke generator yang menghasilkan listrik
- Fakta 5: Turbin terbesar dapat memanfaatkan energi untuk daya 600 rumah Amerika. Turbin ini membentuk peternakan angin dan ratusan disusun dalam baris di tempat berangin seperti punggung bukit. Sebuah turbin kecil di halaman belakang dapat dengan mudah menyalakan sebuah usaha kecil atau rumah. Sebuah peternakan angin adalah kumpulan turbin angin di lokasi yang sama. Banyak peternakan angin memberikan pendapatan sewa untuk masyarakat pedesaan di mana mereka berada.
- Fakta 6: Energi angin dihargai karena merupakan sumber energi bersih dan menyebabkan minimum pollution. Biaya operasional yang minimal setelah ereksi turbin. Produksi massal dan kemajuan teknologi membuat turbin lebih murah daripada sebelumnya.
- Fakta 7: Angin turbin telah dikritik karena beberapa alasan. Hal ini menyatakan bahwa turbin angin menyebabkan kebisingan dan mengganggu penduduk di dekatnya. Para penggemar turbin perlahan bergerak juga dituduh merugikan kelelawar dan



populasi burung lokalitas tapi tuduhan ini tidak berdasar karena lebih banyak jumlah burung dibunuh oleh faktor lain seperti jaringan listrik, mobil dan bangunan tinggi. Kritik lainnya adalah bahwa energi angin Variabel- jika tidak ada angin karena beberapa alasan, generasi berhenti listrik.

- Fakta 8: Industri energi angin berkembang dengan pesat. Generasi global yang dilihatnya empat kali lipat dari tahun 2000 hingga 2006. Pada 2012, lebih dari 70.000 mega watt kapasitas global yang dihasilkan. Satu mega watt tunggal cukup untuk menerangi 250 rumah. Kapasitas yang paling terpasang energi angin di Jerman diikuti oleh Spanyol. AS dan China juga menggunakan. Jika momentum pertumbuhan ini didukung, energi angin akan mampu memenuhi sepertiga dari kebutuhan energi global pada tahun 2050.
- Fakta 9: Energy Angin adalah yang paling cepat berkembang dari produksi listrik di seluruh planet. Pada tahun 2012, \$ 25 miliar dihabiskan untuk investasi energi angin. Turbin modern memanfaatkan lebih dari 15 kali listrik yang dihasilkan pada tahun 1990. Tenaga angin di AS adalah \$ 10 miliar industri tahun. Sumber terbesar dari kapasitas pembangkit baru untuk listrik pada tahun 2012 adalah energi angin akuntansi untuk 40% dari total kapasitas.
- Fakta 10: Tenaga angin juga unik karena fakta bahwa ia tidak menggunakan air. Pada tahun 2030, tenaga angin akan menghemat sekitar 30 triliun botol air di AS
- Fakta 11: Angin peternakan dapat dibangun di lokasi lepas pantai. Angin yang stabil dan kuat di lokasi lepas pantai tapi menyiapkan infrastruktur mahal.
- Fakta 12: Energi angin terbarukan dan bebas polusi sumber energi. Hal ini sebagian besar digunakan untuk menghasilkan listrik dan sumber berlimpah energi di banyak bagian Amerika Serikat.
- Fakta 13: Energi angin dapat menjadi sumber alternatif untuk bahan bakar fosil dan telah berkembang di banyak negara, terutama di Eropa.
- Fakta 14: Sebagian besar turbin angin modern memiliki 3 bilah yang dapat mencapai kecepatan di ujung lebih dari 320 kilometer per jam (200 mph).
- Fakta 15: Turbin angin terbesar di dunia terletak di AS di Hawaii. Berdiri pada 20 tempat tinggi dan memiliki bilah sepanjang lapangan sepak bola.
- Fakta 16: Menurut NREL, 1MW dari energi angin dapat mengirangi sekitar 2.600 ton karbon dioksida (CO₂).



-
- Fakta 17: Turbin angin modern yang pertama dibangun pada tahun 1940 di Vermont.
 - Fakta 19: turbin angin bahkan dapat diinstal pada struktur yang metal yang dapat meneruskan listrik kembali ke tanah dengan bantuan kabel .
 - Fakta 20: Sesuai informasi yang dirilis oleh Pusat Keanekaragaman Hayati, sebanyak 1.300 elang, dan spesies predator lainnya dibunuh setiap tahun karena turbin angin yang dibangun di sepanjang rute migrasi kritis.
 - Fakta 21: Pada tahun 2009, US 1 persen dari total produksi listrik nasional pada saat itu dihasilkan Ebergi Angin. Energi yang dihasilkan adalah sekitar 52 miliar jam KW pada tahun 2008.
 - Fakta 22: Energi angin menghasilkan lebih dari 20% dari total produksi listrik di negara-negara seperti Denmark dan Portugal.
 - Fakta 23: Kelemahan utama dari energi angin adalah: biaya instalasi tinggi, perubahan kecepatan angin dan tidak cocok untuk semua daerah.
 - Fakta 24: Grup besar dari turbin angin disebut peternakan angin telah dipasang di 38 + negara bagian AS dan saat ini beroperasi instalasi angin untuk utilitas.
 - Fakta 25: Pada kuartal terakhir 2012, Texas memimpin dalam instalasi Energi angin baru (dengan 1.289 megawatt), diikuti oleh California, Kansas, Oklahoma dan Iowa.
 - Fakta 26: Tips turbin angin sangat besar bisa mencapai delapan hingga 200 m (650ft).
 - Fakta 27: Albert Betz, adalah seorang fisikawan Jerman dan pelopor teknologi turbin angin. Ia menemukan teori energi angin dan diterbitkan dalam bukunya Wind-Energie.
 - Fakta 28: 60.007 MW adalah total kapasitas terpasang angin di AS pada akhir tahun 2012.
 - Fakta 29: Sekitar \$ 25000000000 investasi dilakukan pada tahun 2012 dalam proyek-proyek Energi Angin baru dan selama 5 tahun investasi rata-rata tahunan menjadi \$ 18 miliar.
 - Fakta 30: Lebih dari 45.100 turbin angin yang beroperasi pada akhir tahun 2012.
 - Fakta 31: Berbagai mitos yang berkaitan dengan peternakan angin adalah: peternakan angin jelek dan populer, mereka berisik dan menghasilkan energi hanya 30%.
 - Fakta 32: Sekitar 80.700 orang terlibat dalam berbagai pekerjaan Energi angin terkait pada akhir 2012 di bidang-bidang seperti pengembangan, penentuan tapak, konstruksi, transportasi, manufaktur, operasi.



Angin Menurut Jenisnya Angin terbagi menjadi dua jenis, yaitu angin musim dan angin lokal. Angin darat, laut, lembah dan jatuh merupakan beberapa jenis angin lokal.

- Angin Gunung dan Angin Lembah Perbedaan pemanasan suhu juga terjadi dikawasan pegunungan dengan kawasan lembah, berikut penjelasannya: Ketika matahari terbit merupakan waktu dimana angin lembah terjadi, daerah pertama kali yang mendapatkan energi panas adalah puncak gunung dan proses tersebut berlangsung sepanjang hari, lembah mendapatkan energi panas lebih rendah dibandingkan lereng gunung. Sehingga terjadi perbedaan suhu antara lembah dan lereng gunung. Udara dingin dari lembah menggantikan udara panas pada lereng gunung yang naik, akibatnya terjadi aliran udara dari lembah menuju gunung yang dinamakan dengan angin lembah. Sedangkan pada sore hari puncak gunung yang mendingin akan mengalirkan udara ke lembah dan lembah akan melepas energi panas. Aliran udara tersebut dinamakan angin gunung.
- Angin Ribut atau Angin Puyuh Angin ribut atau angin puyuh biasa juga disebut sebagai angin puting beliung, yaitu angin kencang yang datang secara tiba – tiba, mempunyai pusat gerak seperti spiral hingga menyentuh permukaan bumi dan hilang dalam waktu singkat (3 – 5 menit). Dengan kecepatan angin rata – rata berkisar antara 30 – 40 knots. Angin ini berasal dari awan Cumulonimbus (CB) yaitu awan yang bergumpal berwarna abu-abu gelap dan menjulang tinggi. Namun, tidak semua awan Cumulonimbus menyebabkan angin puting beliung. Puting beliung dapat terjadi dimana 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).
- Angin Fohn Angin Fohn adalah angin bersifat kering dan panas yang turun dari lereng pegunungan. Angin ini terjadi karena turunnya kelembaban udara yang mendapatkan pemanasan secara dinamis. Sehingga udara panas dan keringlah yang mengalir ke daratan. Selain itu jenis angin selain angin lokal merupakan angin yang bertiup dengan kawasan yang lebih luas seperti angin musim atau angin monsoon. Ada dua jenis angin monsoon yang terjadi di Indonesia,
- Angin Monsun Barat Pada bulan Oktober hingga April merupakan bulan dimana angin monsoon barat terjadi. Pada bulan tersebut belahan bumi bagian selatan tepat berada di bawah matahari, yang mengakibatkan suhu pada belahan bumi bagian

selatan lebih tinggi dibandingkan dengan suhu bumi bagian utara, sehingga angin bertiup ke bumi bagian selatan.

- Angin Monsun Timur Pada bulan April hingga Oktober merupakan bulan dimana angin monsoon timur terjadi. Pada saat itu bumi bagian utara berkedudukan tepat dibawah matahari. Menyebabkan benua Australia mengalami musim dingin sehingga bertekanan tinggi. Sedangkan benua Asia lebih panas, sehingga tekanannya rendah.
- Angin Laut dan Angin Darat Angin darat merupakan angin yang bertiup mengalir dari darat ke lautan, sedangkan angin laut merupakan angin yang bertiup dari laut ke daratan. Adanya perbedaan sifat antara lautan dan daratan mengakibatkan terjadinya angin darat dan angin laut. Lautan menyerap dan melepas energi panas lebih lama daripada daratan. Proses terjadinya angin darat dan angin laut :
 1. Pada malam hari merupakan waktu terjadinya angin darat, dikarenakan daratan melepas energi panas yang diserap dari permukaan bumi lebih cepat yang mengakibatkan suhu udara menjadi dingin. Sedangkan energi panas di lautan sedang mengalami proses pelepasan energi ke udara. Udara yang naik dari lautan ke atas digantikan oleh udara dingin yang bergerak dari daratan, sehingga hal ini merupakan penyebab terjadinya aliran udara dari daratan menuju ke lautan. Pada malam hari hingga dini hari merupakan waktu terjadinya angin darat.
 2. Pada waktu pagi hingga sore merupakan waktu terjadinya angin laut, karena energi panas yang ada di daratan diserap lebih cepat daripada energi panas yang diserap di lautan, sehingga udara lebih panas terjadi di daratan daripada di lautan. Udara dingin dari lautan akan naik dan menggantikan udara panas di daratan.

Sejarah Pemanfaatan

Manusia telah menggunakan energi angin selama setidaknya 5.500 tahun. Para nelayan menggunakan angin untuk menggerakkan kapalnya untuk mencari ikan ke tengah laut. Pedagang, penjajah dan bahkan misionaris menggunakan angin untuk menggerakkan kapal yang membawa mereka ke seluruh belahan dunia demi Glory, Gold, and Gospel. Arsitek pada masa dahulu menggunakan angin alami sebagai sirkulasi udara dalam suatu bangunan. Hammurabi, Raja Babilonia menggunakan energy angin untuk sistem irigasi pada abad ke-17 sebelum Masehi. Suku asli Sri Lanka, Sinhala, menggunakan angin muson dalam peleburan logam.



Kincir angin yang digunakan merupakan kincir angin dengan poros vertikal, dan tiap-tiap kipas berbentuk segi-empat yang dilapisi dengan bahan kain. Kincir angin dengan poros horizontal pertama kali ditemukan di Eropa untuk menggiling gandum.

Energi angin dapat dikonversikan menjadi energi mekanik, seperti pada penggilingan biji, ataupun untuk memompa air. Pada perkembangannya, energi angin dikonversikan menjadi energi mekanik, dan dikonversikan kembali menjadi energi listrik. Dalam bentuknya sebagai energi listrik, maka energi dapat ditransmisikan dan dapat digunakan untuk mencatu peralatan-peralatan elektronik.

Udara pada permukaan bumi di kutub memiliki tekanan yang lebih tinggi daripada di khatulistiwa, sehingga udara akan mengalir dari kutub menuju khatulistiwa pada permukaan bumi. Udara pada permukaan bumi di khatulistiwa memiliki berat jenis yang rendah, sehingga udara akan terangkat hingga lapisan troposfir.

Karena tekanan udara pada lapisan troposfir di khatulistiwa lebih tinggi daripada tekanan udara di bagian atas kutub, maka udara akan bergerak secara horizontal pada lapisan troposfir dari khatulistiwa menuju kutub. Dan karena berat jenis di udara pada kutub lebih tinggi, maka udara akan bergerak turun menuju permukaan bumi.

Proses Terjadinya Angin

Penyebab timbulnya angin adalah matahari. Bumi menerima radiasi sinar matahari secara tidak merata. Dengan demikian, daerah khatulistiwa akan menerima energi radiasi matahari lebih banyak daripada di daerah kutub, atau dengan kata lain, udara di daerah khatulistiwa akan lebih tinggi dibandingkan dengan udara di daerah kutub. Pertukaran panas pada atmosfer akan terjadi secara konveksi.

Berat jenis dan tekanan udara yang disinari cahaya matahari akan lebih kecil dibandingkan jika tidak disinari. Perbedaan berat jenis dan tekanan inilah yang akan menimbulkan adanya pergerakan udara. Pergerakan udara ini merupakan prinsip dari terjadinya angin. Secara ilmiah, pada abad ke-17, seorang fisikawan Itali, Evangelista Torricelli, mendeskripsikan bahwa angin dihasilkan karena adanya perbedaan suhu udara, dan juga perbedaan kepadatan (akibat perbedaan suhu udara), di antara dua daerah.



Potensi Pemanfaatan Energi Angin

Untuk mencari tahu berapa besar energi angin di Bumi ini, titik mulanya adalah memperkirakan total energi kinetik di atmosfer. Lorenz memberikan 1.5×10^{16} Joules/m² sebagai energi kinetik yang tersedia di atmosfer

Smil menyatakan bahwa pergerakan udara di atmosfer merupakan 2% dari energi dari matahari ke Bumi. Dimana radiasi Matahari yang mencapai Bumi tahunan adalah 5.8×10^{24} Joules, atau 1.84×10^{17} W, dan 360 W/m². Dan yang terserap oleh permukaan Bumi (daratan dan air) adalah 2.9×10^{24} Joules, atau 9.19×10^{16} W, dan 180 W/m². Jika jumlah energi matahari yang terserap secara langsung oleh atmosfer lebih sedikit digunakan, perkiraan besaran tertinggi dari energi kinetik dapat dijabarkan. Smil memberi gambaran, 3.8×10^{22} J, untuk energi angin tahunan pada atmosfer di bawah ketinggian 1 km. Dia menyatakan nilai maksimum yang dapat dikonversikan adalah 3.8×10^{21} Joule, 1.20×10^{14} W atau 1.1×10^6 TWh.

Menurut Komisi Eropa, sumber angin dunia diperkirakan $50,000$ TWh/tahun[4]. Total potensial dihitung pada daratan dengan kecepatan angin rata-rata diatas $5,1$ m/s pada ketinggian 10 m. Kemudian direduksi 90% sebagai penggunaan lain, kepadatan penduduk, dan lain-lain. Perhitungan ini tidak melingkupi Greenland, Antarctic atau area lepas pantai. Perhitungan lain oleh Wijk dan Coelingh yang memberikan nilai 20.000 TWh/tahun dianggap lebih konservatif

Sumber lain menyatakan total potensial yang lebih tinggi, yaitu 106.458 TWh/tahun. Potensi ini termasuk Selandia Baru dan Jepang. Namun study-study tersebut belum memasukkan potensial lepas pantai, yang diperkirakan mencapai 3000 TWh/tahun untuk di Eropa saja dengan jarak 30 km dari pantai dan kedalaman kurang dari 40 m

Membandingkan antara penggambaran dari Smil, 100.000 TWh, dan dari Wind Energy-The Facts report, 50.000 TWh, Smil menggambarkan untuk seluruh daratan dan air, sedangkan Wind Energy-The Facts report menggambarkan jumlah yang dapat dihasilkan oleh turbin angin pada 120 m pertama dari 1 km, dan memperhitungkan rugi-rugi dan faktor reduksi. Hingga saat ini, 100 GW turbin angin telah terpasang dan dapat memproduksi $2,2 \times 10^2$ TWh, dengan asumsi 25% faktor pembebanan.

Konsumsi listrik dunia adalah 18.000 TWh/tahun pada tahun 2005[8]. Dengan demikian, total sumber energi angin yang tersedia dapat memenuhi permintaan listrik dunia, apalagi angin dapat ditemukan di segala penjuru dunia.



Angin adalah udara yang bergerak yang diakibatkan oleh rotasi bumi dan juga karena adanya perbedaan tekanan udara disekitarnya. Angin bergerak dari tempat bertekanan udara tinggi ke bertekanan udara rendah. Pemanasan oleh matahari, maka udara memuai.

Tekanan udara yang telah memuai massa jenisnya menjadi lebih ringan sehingga naik. Apabila hal ini terjadi, tekanan udara turun. Udara disekitarnya mengalir ke tempat yang bertekanan rendah. Udara menyusut menjadi lebih berat dan turun ke tanah. Diatas tanah udara menjadi panas lagi dan naik kembali. Aliran naiknya udara panas dan turunnya udara dingin ini dikarenakan konveksi

Tenaga angin menunjuk kepada pengumpulan energi yang berguna dari angin. Pada tahun 2005, kapasitas energi generator tenaga angin adalah 58.982 MW, hasil tersebut kurang dari 1% pengguna listrik dunia. Meskipun masih berupa sumber energi listrik minor dikebanyakan Negara, Penghasil tenaga angin lebih dari empat kali lipat antara 1999 dan 2005

Kebanyakan tenaga angin modern dihasilkan dalam bentuk listrik dengan mengubah rotasi dari pisau turbin menjadi arus listrik dengan menggunakan generator listrik. Pada kincir angin energi angin digunakan untuk memutar peralatan mekanik untuk melakukan kerja fisik, seperti menggiling atau memompa air. Tenaga angin banyak jumlahnya, tidak habis-habis, tersebar luas dan bersih

Konversi Energi Angin

Alat utamanya adalah generator, dengan generator tersebut maka dapat dihasilkan arus listrik dari gerakan blade / baling-baling yang bergerak karena hembusan angin. Pembangkit ini lebih efisien dari pada pembangkit listrik tenaga surya didalam menghasilkan listriknya. Untuk menggerakkan blade / baling-baling agar bisa berputar saja harus memiliki kecepatan angin 2 meter/detik dan untuk menghasilkan listrik yang stabil sesuai kapasitas generatornya rata-rata 6 s/d 10 meter/detik. Daerah yang cocok digunakan pembangkit ini adalah daerah pantai, pesisir, pegunungan.

2.2. Turbin Angin

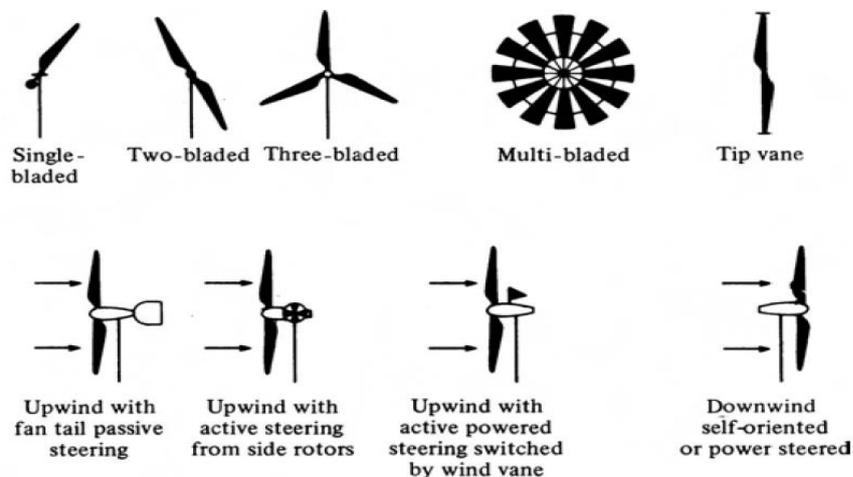
Turbin angin dibagi menjadi dua kelompok utama berdasarkan arah sumbu:

1. Turbin Angin Sumbu Horizontal

Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) memiliki poros rotor utama dan generator listrik di puncak menara. Turbin berukuran kecil diarahkan oleh sebuah baling-baling angin (baling-baling cuaca) yang sederhana, sedangkan turbin berukuran besar pada umumnya menggunakan sebuah sensor angin yang digandengkan ke sebuah servo motor.

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 TASH merupakan mesin upwind (melawan arah angin). Meski 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 resintensi angin dari bilah-bilah itu.

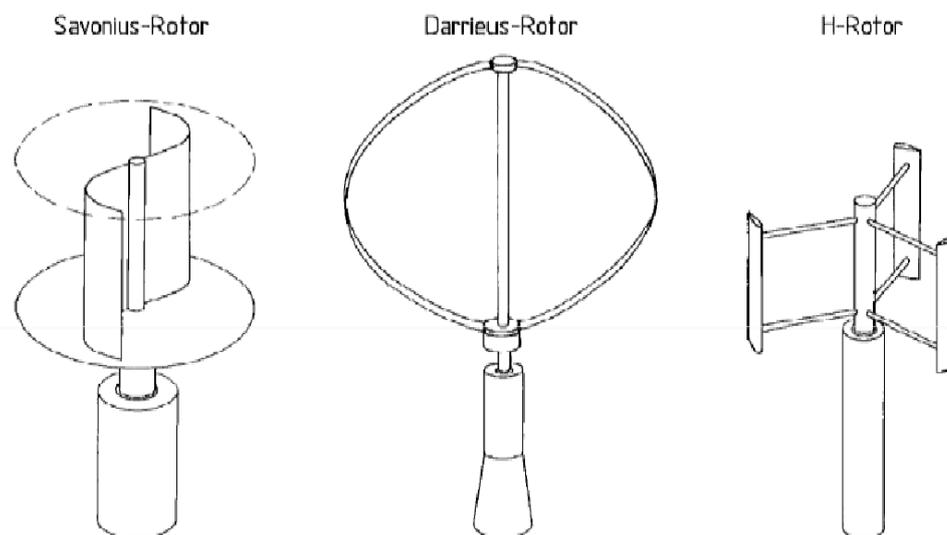


Gambar 2.3 Turbin Angin Sumbu Horizontal

2. Turbin Angin Sumbu Vertikal

Kendala penggunaan turbin angin adalah kecepatan angin dan arah angin yang berubah-ubah sepanjang waktu. Oleh karena itu, turbin angin yang baik adalah turbin yang dapat menerima angin dari segala arah selain itu juga mampu bekerja pada angin dalam kecepatan yang rendah salah satunya Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV). Turbin ini memiliki efisiensi yang lebih kecil dibandingkan dengan turbin angin sumbu horizontal.

Ada berbagai type TASV yang sering digunakan diantaranya adalah Tipe Savonius, Tipe Darrieus, dan Tipe H-Rotor.



Gambar 2.4 Turbin Angin Sumbu Vertikal

a. Tipe Savonius TASV

Diciptakan oleh seorang insinyur Finlandia SJ Savonius pada tahun 1929. Kincir TASV ini merupakan jenis yang paling sederhana dan menjadi versi besar dari anemometer. Kincir Savonius dapat berputar karena adanya gaya dorong dari angin, sehingga putaran rotor pun tidak akan melebihi kecepatan angin. Meskipun daya koefisien untuk jenis turbin angin bervariasi antara 30% sampai 45%, menurut banyak peneliti untuk jenis Savonius biasanya tidak lebih dari 25%. Jenis turbin ini cocok untuk aplikasi daya yang rendah dan biasanya digunakan pada kecepatan angin yang berbeda.



b. Tipe Darrieus TASV

Ditemukan oleh seorang insinyur Perancis George Jean Maria Darrieus yang dipatenkan pada tahun 1931. Ia memiliki 2 bentuk turbin yang digunakan diantaranya adalah “Eggbeater/ Curved Bladed” dan “Straightbladed” TASV. Sketsa dari kedua variasi konsep Darrieus ditunjukkan dalam gambar dibawah. Kincir angin Darrieus TASV mempunyai bilah sudu yang disusun dalam posisi simetri dengan sudu bilah yang diatur relatif terhadap poros.

Pengaturan ini cukup efektif untuk menangkap berbagai arah angin. Berbeda dengan Savonius, kincir angin Darrieus bergerak dengan memanfaatkan gaya angkat yang terjadi ketika angin bertiup. Bilah sudu turbin Darrieus bergerak berputar mengelilingi sumbu.

c. Tipe H-rotor

Dikembangkan di Inggris melalui penelitian yang dilakukan selama 1970-1980an, diuraikan bahwa mekanisme yang digunakan pada pisau berbilah lurus (Straight-bladed) Darrieus TASV tidak diperlukan, ternyata ditemukan bahwa efek hambatan yang diciptakan oleh sebuah pisau akan membatasi kecepatan aliran angin. Oleh karena itu, H-rotor akan mengatur semua kecepatan angin untuk mencapai kecepatan putaran optimalnya.

3. Turbin Savonius

Turbin savonius memiliki *tip speed ratio* dan koefisien daya (C_p) yang lebih rendah dibandingkan turbin angin lainnya. Namun turbin Savonius memiliki banyak kelebihan diantaranya adalah memiliki konstruksi yang sederhana dan aman sehingga biaya produksinya rendah dan mudah dibangun, dapat menerima angin dari segala arah untuk dapat beroperasi, memiliki tingkat kebisingan yang rendah saat beroperasi, memiliki berbagai opsi konfigurasi rotor, momen statis dan dinamis yang tinggi, memiliki torsi awal yang tinggi sehingga memungkinkan turbin Savonius dapat mulai berputar pada kecepatan angin rendah dan dapat dioperasikan pada kecepatan angin yang sangat tinggi

2.3 Daya Angin Turbin

Daya yang dihasilkan turbin merupakan daya angin yang diekstrak oleh turbin angin menjadi daya mekanik. Secara aktual energi angin tidak dapat dikonversikan seluruhnya menjadi daya mekanik pada poros turbin. Sehingga daya turbin dapat dihitung dengan persamaan:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V_w^3 \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana:

P_w = Daya angin turbin (Watt)

n = Putaran turbin (rpm)

P = Daya Angin (watt)

ρ = Massa Jenis Udara (kg/m^3)

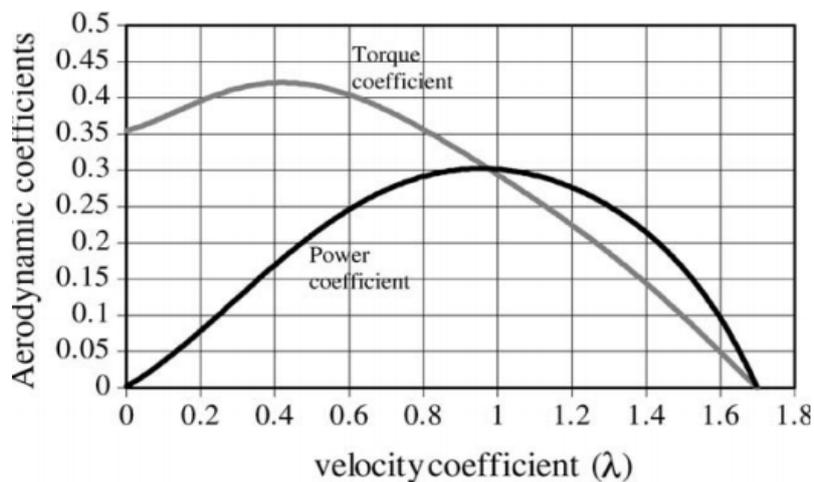
A = Luas Penampang (m^2)

2.4 Tip Speed Ratio (TSR)

Tip speed ratio (TSR) merupakan perbandingan antara kecepatan linear pada ujung rotor turbin angin dengan kecepatan angin sebelum melewati turbin angin.

Koefisien daya (C_p) adalah perbandingan antara daya yang dihasilkan oleh turbin angin (P_T) terhadap daya maksimum atau daya angina (P_w). Secara matematis koefisien daya dinyatakan pada persamaan:

$$C_p = \frac{P_T}{P_w} = \frac{\omega T}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_w^3} \dots\dots\dots (2.7)$$



$$\lambda = \frac{\pi D n}{60 v} \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan :

λ : Tip Speed Ratio

D : Diameter Turbin



n : Putaran Rotor (rpm)

Vw: Kecepatan Angin (m/s)

2.5 Daya Generator

Generator adalah suatu komponen yang dapat mengubah energi gerak menjadi energi listrik. Prinsip kerjanya dapat dipelajari menggunakan teori medan elektromagnetik. Poros pada dinamo dipasang dengan material ferromagnetik permanen. Setelah itu disekeliling poros terdapat stator yang berbentuk kumparan-kumparan kawat yang membentuk loop. Ketika poros mulai berputar maka terjadi perubahan fluks pada stator yang akhirnya karena terjadi perubahan fluks akan dihasilkan tegangan dan arus listrik tertentu. Generator mempunyai dua bagian utama yaitu stator (bagian yang diam) dan rotor (bagian yang bergerak).

Dari segi arus listrik yang dihasilkan, generator dibagi 2, yaitu generator arus bolak balik (AC) dan generator arus searah (DC). Pada generator arus searah (DC) terdapat rectifier yang berfungsi untuk mengubah arus AC menjadi DC. Generator ini menghasilkan tegangan yang arahnya tetap dan bila dihubungkan dengan beban, akan menghasilkan arus yang searah pula. Pada umumnya generator arus searah dapat menghasilkan listrik pada putaran yang tinggi. Untuk digunakan pada turbin angin, jenis generator ini memerlukan transmisi untuk menaikkan putaran. Daya listrik yang dihasilkan generator DC didapatkan menggunakan rumus:

$$P_g = V \cdot I \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana,

P_g = Daya Listrik (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

2.6 Efisiensi Keseluruhanya

Dari setiap pengukuran kecepatan angin pada daya generator akan dijumlahkan. Setelah itu setiap pengukuran kecepatan angin pada daya angin akan dijumlahkan juga. Kemudian dayagenerator dan daya angin akan dibagi, kemudian dibagi 100 %. Dan akan mendapatkan hasilnya.



$$\eta_o = \frac{P_g}{P_w} \cdot 100 \% \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana :

P_g = Daya Generator (Watt)

P_w = Daya Angin

η_o = Efisiensi Keseluruhan

2.6 End Plate dan Overlap

End plate merupakan piringan bulat yang digunakan untuk menutupi kedua ujung sudu turbin Savonius agar angin terperangkap didalam sudu sehingga memperbesar gaya drag pada turbin. *Overlap* adalah celah kosong pada pusat sudu sehingga angin yang menabrak sudu satu akan keluar dari celah tersebut dan mendorong sudu lainnya. Penggunaan *end plate*, desain *overlap* dan tanpa poros pusat antara *end plate* akan meningkatkan putaran dan efisiensi turbin Savonius. Rotor 2 sudu lebih efisien dari 3.

e = Endplate

D = Diameter

β = Overlap

$$\beta = \frac{e}{D} \dots\dots\dots(2.5)$$

$$0.2 = \frac{e}{0.18}$$

$$e = 0.2 \times 0.18$$

$$= 0.036 \text{ m}$$

maka overlap yang digunakan adalah 0.036