

**ANALISIS PENGARUH VARIASI JUMLAH SUDU TERHADAP
KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIOUS TIPE L 90°**

*ANALYSIS OF THE EFFECT VARIATION OF BLADE NUMBER ON
THE PERFORMANCE SAVONIUS WIND TURBINE TYPE L 90°*

DENNIS LORENS



**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK
SEKOLAH PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2020

**ANALISIS PENGARUH VARIASI JUMLAH SUDU TERHADAP
KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIOUS TIPE L 90°**

**Tesis
Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar Magister**

**Program Studi
Teknik Mesin / Konversi Energi**

Disusun dan diajukan oleh

DENNIS LORENS

Kepada

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK
SEKOLAH PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2020**

TESIS

ANALISIS PENGARUH VARIASI JUMLAH SUDU TERHADAP KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIOUS TIPE L 90°

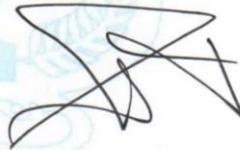
Disusun dan diajukan oleh

DENNIS LORENS

Nomor Pokok P2201216006

Telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Tesis
pada tanggal 27 Oktober 2020
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Menyetujui
Komisi Penasehat,



Dr. Ir. Luther Sule, MT

Ketua

Dr. RUSTAN TARAKKA, ST. MT

Anggota

Ketua Program Studi Magister
Teknik Mesin,

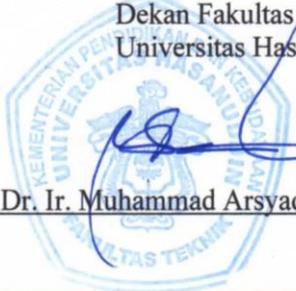


Dr. Hairul Arsyad, ST., MT

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin,



Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT



PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Dennis Lorens
Nomor Mahasiswa : P2201216006
Program Studi : Teknik Mesin / Konversi Energi

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambil alihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 27 - Oktober - 2020

Yang menyatakan



Dennis Lorens

PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan yang Maha ESA, karena berkat dan kasih karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini yang berjudul **“Analisis Pengaruh Variasi Jumlah Sudu Terhadap Kinerja Turbin Angin Savonius Tipe L 90°”**

Penyusunan tesis ini merupakan salah satu syarat dalam menyelesaikan studi untuk memperoleh gelar Magister pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin Makassar.

Ucapan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya penulis sampaikan kepada kedua orang tua tercinta Ayahanda Dr. Ir. Corvis L. Rantererung, M.T dan Ibunda Jeni Paranta, Amd.KL yang telah membesarkan, mendidik dan mencurahkan segala kasih dan sayangnnya kepada penulis serta keluarga yang telah memberikan dukungan moral maupun materi.

Dalam penyusunan tesis ini terdapat banyak kendala yang dihadapi oleh penulis, sehingga penulis menyadari bahwa penyelesaian tesis ini tidak terlepas dari bantuan, motivasi dan bimbingan dari berbagai pihak yang telah meluangkan waktu, tenaga dan pikirannya untuk membantu penulis. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Ir Luter Sule, M.T. selaku Ketua Komisi Penasehat dan Dr. Rustan Tarakka, S.T., M.T. selaku Anggota Komisi Penasehat yang senantiasa memberikan waktu, tenaga dan pikirannya dalam memberikan arahan dan bimbingan kepada penulis mulai dari

penyusunan proposal, pelaksanaan penelitian sampai dengan penyusunan tesis ini..

Penulis juga ingin menyampaikan terimakasih kepada semua pihak yang telah memberikan bimbingan dan petunjuk, terutama kepada :

1. Ibu Prof. Dr. Dwia Aries Tina Pulubuhu, M.A. selaku Rektor Universitas Hasanuddin.
2. Prof. Dr.Ir. M. Arsyad Thaha, M.T selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Dr. Hairul Arsyad, S.T.,M.T. selaku Ketua Program Studi Magister Jurusan Teknik Mesin Universitas Hasanuddin.
4. Seluruh staf pengajar / dosen dan pegawai Jurusan Teknik Mesin, konsentrasi Konversi Energi, Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin, atas bimbingan dan didikannya selama penulis kuliah.
5. Bapak Direktur beserta Staf Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin atas segala pelayanannya.
6. Adek Dyah Arindi Cornelia Hartoyo, S.Si yang telah memberi motivasi dan bantuan sehingga penyelesaian tesis ini dapat selesai dengan baik.
7. Seluruh rekan-rekan seperjuangan mahasiswa mesin dan Pascasarjana Teknik Mesin Universitas Hasanuddin yang telah banyak membantu dalam penyelesaian tesis ini.
8. Seluruh laboran fakultas teknik jurusan mesin yang telah banyak membantu dan memberikan masukan dalam menyelesaikan penelitian ini.

9. Serta semua pihak yang telah ikhlas membantu penulis dalam penulisan tesis ini, namun tidak sempat penulis sebutkan satu per satu pada kesempatan ini.

Penulis menyadari bahwa naskah tesis ini masih banyak kekurangan oleh karena itu segala kritik dan saran yang konstruktif sangat diharapkan sebagai bahan koreksi bagi penulis demi perbaikan tesis ini dan penulisan karya berikutnya. Akhirnya semoga tesis ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan kedepannya.

Makassar, 27 - Oktober - 2020

Penulis

ABSTRAK

DENNIS LORENS. Analisis Pengaruh Variasi Jumlah Sudu Terhadap Kinerja Turbin Angin Savonious Tipe L 90° (dibimbing oleh Luther Sule dan Rustan Tarakka).

Kebutuhan energi umumnya di dunia dan khususnya di Indonesia semakin hari semakin meningkat, sehingga pemasok utama energi tersebut berasal dari energi fosil. Energi fosil adalah energi yang tidak dapat diperbaharui, sehingga akan mengakibatkan kehabisan dikemudian hari. Untuk itu, perlu ada upaya untuk mengatasi masalah tersebut, diantaranya dengan memanfaatkan energi terbarukan menggunakan turbin angin savonius. Tujuan penelitian adalah untuk menganalisis variasi jumlah sudu terhadap kinerja turbin angin *Savonius* tipe L 90°. Penelitian ini menggunakan metode experimental dengan memvariasikan jumlah sudu yaitu 2 sudu, 3 sudu dan 4 sudu serta kecepatan angin diset pada 3 m/s, 4 m/s, 5 m/s, 6 m/s dan 7 m/s. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kinerja terbaik dari turbin angin Savonius tipe L 90° yang diperoleh terjadi pada jumlah 3 sudu dengan kecepatan angin 7 m/s dan putaran 286 rpm dengan nilai BHP sebesar 2,64 Watt.

Kata Kunci : Turbin angin Savonius tipe L 90°, jumlah sudu, kinerja turbin.

ABSTRACT

DENNIS LORENS. *Analysis Of The Effect Variation Of Blade Number On The Performance Savonius Wind Turbine Type L 90°* (Supervised by Luther Sule and Rustan Tarakka).

The world's demand for energy, especially in the case of Indonesia are increasing day by day, so that the main energy supplier comes from fossil energy. Fossil energy is the energy that cannot be renewed, so that it will run out in the future. For that, there needs to be an effort to overcome this problem, including by utilizing renewable energy using a savonius wind turbine. The research objective was to analyze the variation in the number of blades on the performance of the Savonius wind turbine type L 90 °. This study used an experimental method by varying the number of blades, namely 2 blades, 3 blades, and 4 blades and the wind speed was set at 3 m / s, 4 m / s, 5 m / s, 6 m / s, and 7 m / s. The results showed that the best performance of the Savonius wind turbine type L 90 ° was obtained for 3 blades with a wind speed of 7 m / s and a rotation of 286 rpm with a BHP value of 2.64 Watt.

Keywords: wind turbine Savonius type L 90°, number of blades, turbine performance.

DAFTAR ISI

	Halaman
PRAKATA.....	vi
ABSTRAK.....	ix
ABSTRACT	x
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
DAFTAR SIMBOL	xvii
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Batasan Masalah	5
1.5. Manfaat Penelitian	5
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Angin	6
2.2. Potensi Energi Angin	7
2.3. Turbin Angin	10
2.4. Turbin Angin Sumbu Vertikal.....	10
2.5. Turbin Angin Savonius	12
2.6. Persamaan-persamaan yang digunakan	18
BAB III. METODE PENELITIAN.....	22
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian.....	22
3.2. Alat dan Bahan yang digunakan	22
3.3. Prosedur Pengambilan Data	25
3.4. Eksperimen Set Up	29
3.5. Diagram Alir Penelitian.....	31

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	33
4.1. Hasil.....	33
4.1.1 Contoh Perhitungan.....	33
4.1.2 Hubungan putran turbin terhadap kecepatan angin	37
4.1.3 Hubungan daya generator terhadap daya angin.....	38
4.1.4 Hubungan BHP terhadap kecepatan angin	39
4.1.5 Hubungan torsi terhadap kecepatan angin	40
4.1.6 Hubungan koefisien daya terhadap kecepatan angin	41
4.1.7 Hubungan tip speed ratio terhadap kecepatan angin	42
4.2. Pembahasan.....	43
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	45
5.1. Kesimpulan	45
5.2. Saran	46
DAFTAR PUSTAKA.....	47
LAMPIRAN	49

DAFTAR TABEL

Nama	Keterangan	Hal.
Tabel 2.1	Pengelompokan Potensi Energi Angin	10
Tabel 3.1	Jadwal penelitian	33

DAFTAR GAMBAR

Nama	Keterangan	Hal.
Gambar 2.1	Peta persebaran kecepatan angin di Indonesia	9
Gambar 2.2	Turbin angin sumbu vertikal	12
Gambar 2.3	Turbin angin savonius	14
Gambar 2.4	Prinsip rotor savonius	15
Gambar 2.5	Sudu pengarah dengan rotor turbin angin savonius	15
Gambar 2.6	Rotor savonius dengan dua sudu	16
Gambar 2.7	Rotor savonius U dan Rotor savonius L	17
Gambar 2.8	Tipe sudu turbin savonius	18
Gambar 2.9	Pengaruh aspek rasio pada kinerja VAWT	18
Gambar2.10	Turbin angin VAWT dengan aspek rasio	19
Gambar 3.1	Anemometer	23
Gambar 3.2	Tachometer	24
Gambar 3.3	Meteran	24
Gambar 3.4	<i>Pulpen dan kertas</i>	24
Gambar 3.5	<i>Wind tunnel subsonic</i>	25
Gambar 3.6	Multitester	25
Gambar 3.7	<i>Turbin angin 2 sudu</i>	27

Gambar 3.8	<i>Tampak sketsa turbin angin 2 sudu</i>	28
Gambar 3.9	Turbin angin 3 sudu	28
Gambar 3.10	<i>Tampak sketsa turbin angin 3 sudu</i>	29
Gambar 3.11	Turbin angin 4 sudu	29
Gambar 3.12	<i>Tampak sketsa turbin angin 4 sudu</i>	30
Gambar 3.13	Eksperimen set up	31
Gambar 3.14	Diagram alir penelitian	33
Gambar 4.1	Hubungan putaran turbin terhadap kecepatan angin	38
Gambar 4.2	Hubungan daya generator terhadap daya angin	39
Gambar 4.3	Hubungan BHP terhadap kecepatan angin	40
Gambar 4.4	Hubungan torsi terhadap kecepatan angin	41
Gambar 4.5	Hubungan koefisien daya terhadap kecepatan angin	42
Gambar 4.6	Hubungan tip speed ratio terhadap kecepatan angin	43

DAFTAR LAMPIRAN

Nama	Keterangan	Hal.
Lampiran A	Tabel hasil pengambilan data turbin angin savonius tipe L 90°	50
Lampiran B	Tabel hasil perhitungan turbin angin savonius tipe L 90°	52
Lampiran C	Tabel sifat fisik udara.....	54
Lampiran D	Dokumentasi penelitian	55

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Satuan
A	Luas penampang turbin	m ²
C _p	Koefisien power	-
n	Putaran poros turbin	Rpm
P _A	Daya angin	W
R	Jari-jari turbin	M
T	Torsi	Nm
P _g	Daya generator	Watt
I	Arus	A
V	Tegangan	V
BHP	Brake Horse Power	W
ρ	Massa jenis udara	kg/m ³
v	Kecepatan angin	m/s
ω	Kecepatan sudu turbin	Rad/s

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sebagai negara yang sedang berkembang, kebutuhan akan energi di Indonesia semakin meningkat dan menjadi bagian yang tak terpisahkan dari kebutuhan hidup masyarakat sehari-hari seiring pesatnya peningkatan pembangunan di bidang teknologi, industri dan informasi. Ketersediaan energi di Indonesia yang masih ditopang dengan penggunaan energi fosil untuk membangkitkan listrik tentu tidak dapat menjadi jaminan akan terus ada. Diprediksi cadangan minyak bumi yang ada di Indonesia akan habis 11 tahun lagi. Oleh karena itu PLN (Perusahaan Listrik Negara) sebagai penyedia energi listrik dituntut untuk dapat memenuhi kebutuhan listrik masyarakat kota maupun desa. Kebutuhan tenaga listrik di Indonesia, khususnya di kota-kota besar. Jika melihat pertumbuhan tenaga listrik di desa, kebutuhannya masih sangat kecil karena terbatasnya pembangkit listrik yang ada dan sulitnya jalur transportasi ke daerah-daerah terpencil. Peningkatan ekonomi yang berkembang pada dasarnya harus dibarengi dengan ketersediaan energi. Ketersediaan energi digunakan dari pengefisiensi energi fosil dan penggunaan sistem konversi energi yang memanfaatkan sumber daya energi terbarukan, seperti: matahari, angin, air, biogas dan lain sebagainya (Djojonegoro,1992).

Sehingga perkembangan energi di masa depan harus ramah lingkungan. Beberapa alternatif energi ramah lingkungan adalah energi angin. Potensi angin yang ada dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik skala kecil, kurang dari satu Kwh, dapat dimanfaatkan untuk penerangan dan menghidupkan peralatan

listrik. Dengan mendesain alat konversi energi angin ke listrik yang sederhana (buatan tangan), murah, dan mudah untuk dibuat. Hal ini memungkinkan masyarakat awam untuk merawat dan memperbaiki sendiri sehingga transfer teknologi berjalan dengan cepat.

Salah satu alternatif yang dapat dilakukan untuk memecahkan masalah rendahnya kecepatan angin di sebagian besar wilayah Indonesia adalah mencari konstruksi kincir angin yang dapat beroperasi pada kecepatan angin rendah tetapi memiliki efisiensi atau koefisien daya yang tinggi. Kincir-kincir angin berporos vertikal, terutama kincir angin tipe Savonius, merupakan jenis kincir angin yang dapat beroperasi pada kecepatan angin rendah dan mampu menghasilkan torsi yang tinggi. Dimana turbin angin Savonius memiliki banyak keuntungan yaitu tidak memerlukan orientasi pada arah mata angin (tidak perlu mendeteksi arah angin yang paling tinggi kecepatannya), otomatis menyala sendiri (*self starting*) menghasilkan tenaga pada putaran tinggi. Turbin angin savonius juga memiliki desain yang sederhana sehingga biaya investasinya lebih murah. Selain itu turbin angin Savonius juga dapat beroperasi pada kecepatan angin yang rendah dimana pada kecepatan angin 2,7 m/s turbin angin Savonius sudah dapat berputar dan menghasilkan energi listrik (Hau E, 2005).

Pada tahun 2007 Soelaiman (dkk) melakukan penelitian tentang beberapa macam blade, yaitu savonius dengan *blade* tipe U dan savonius dengan *blade* tipe L. Dari penelitian mereka menyimpulkan bahwa *blade* savonius tipe L menghasilkan unjuk kerja yang paling baik dibandingkan dengan tipe yang lain. Sementara Dewi L. M (2010) melakukan penelitian dengan memodifikasi rotor Savonius L dengan

variasi sudut yaitu masing-masing besar sudut kelengkungan turbin sebanyak 8 variasi sudut 20° , 30° , 40° , 45° , 50° , 60° , 70° dan 80° dengan panjang busur r tetap. Sehingga turbin yang memiliki putaran paling besar adalah turbin dengan sudut kelengkungan sebesar 20° dan putaran paling kecil terdapat pada turbin dengan sudut kelengkungan yang paling besar, yaitu pada sudut 80° . Dan pada tahun 2013, Mahendra B. melakukan penelitian tentang Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Savonius type L. Menggunakan metode penelitian eksperimental dengan variasi jumlah sudu: 2, 3, dan 4 buah dengan variabel bebas kecepatan angin pada *wind tunnel* dari kecepatan 3 m/s, 5m/s, 7 m/s. Didapatkan hasil analisis bahwa turbin angin dengan jumlah sudu 3 buah memiliki unjuk kerja yang tinggi dibandingkan dengan jumlah sudu yang lain.

Penelitian ini difokuskan pada turbin angin Savonious karena turbin angin ini dapat bekerja dengan baik dengan profil kecepatan angin di Indonesia yang rendah dan fluktuatif. Efisiensi turbin angin sumbu vertikal memang cukup rendah apabila dibandingkan dengan kincir angin lainnya, namun jenis VAWT ini memiliki beberapa keunggulan antara lain fabrikasi yang sederhana, dapat menerima angin dari segala arah dan tidak memerlukan komponen perlindungan terhadap kecepatan putar tinggi (*overspeed rotation*). Selain itu juga memiliki starting torsi yang baik dan kemampuan self-start yang baik untuk kecepatan angin yang rendah sehingga memiliki performansi yang baik untuk pembangkitan skala kecil.

Untuk mendapatkan efisiensi yang baik, telah dilakukan beberapa jenis modifikasi yang diantaranya adalah modifikasi pada geometri dan bentuk profil

sudu, penambahan jumlah stage, penggunaan valve, dan lain sebagainya. Oleh karena itu penulis melakukan penelitian dengan judul; **Analisis Pengaruh Variasi Jumlah Sudu Terhadap Kinerja Turbin Angin Savonius tipe L 90°**.

1.2 Rumusan Masalah

Dengan melihat latar belakang yang ada maka penelitian dapat dirumuskan dalam beberapa hal yakni:

1. Bagaimanakah pengaruh variasi jumlah sudu terhadap putaran turbin angin Savonius tipe L 90° ?
2. Bagaimanakah pengaruh kecepatan angin dan variasi jumlah sudu terhadap koefisien daya turbin angin Savonius tipe L 90° ?
3. Bagaimanakah pengaruh variasi jumlah sudu terhadap BHP(*brake horse power*) turbin angin Savonius tipe L 90° ?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menganalisis pengaruh variasi jumlah sudu terhadap putaran turbin angin Savonius tipe L 90°.
2. Menganalisis pengaruh kecepatan angin dan variasi jumlah sudu terhadap koefisien daya turbin angin Savonius tipe L 90°.
3. Menganalisis pengaruh variasi jumlah sudu terhadap BHP (*brake horse power*) turbin angin Savonius tipe L 90°.

1.4 Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah yang perlu diperhatikan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Pengujian pada pengaruh variasi jumlah sudu turbin angin Savonius tipe L 90° dengan metode eksperimental.
2. Kajian hanya pada kecepatan angin, putaran turbin, BHP(*brake horse power*) dan daya turbin sehingga memperoleh hasil yang maksimal.
3. Tidak memperhitungkan material dari sudu, baik kekuatan bahan atau sifat lain dari bahan.

1.5 Manfaat Pengujian

Adapun manfaat yang diharapkan dalam penelitian ini adalah:

- a. Sebagai syarat menyelesaikan studi untuk memperoleh gelar Magister Teknik Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
- b. Meningkatkan pengetahuan dan keterampilan dalam mendesain dan menganalisa suatu model turbin angin Savonius secara eksperimental.
- c. Sebagai sarana untuk memberikan suatu karya yang mempunyai manfaat bagi pengembangan IPTEKS dan masyarakat.
- d. Sebagai referensi riset lanjutan secara khusus turbin angin Savonius tipe L 90°.

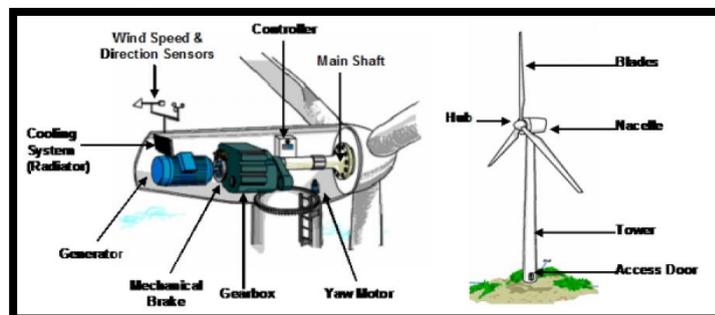
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Turbin Angin

Turbin angin yang biasa juga dikenal dengan sebutan kincir angin yang merupakan sarana pengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik untuk memutar generator listrik. Daya yang dihasilkan oleh Turbin angin berupa energi mekanik poros yang diperoleh dan konversi energi yang terkandung dalam angin (energi mekanik, energi dalam, atau energi tekanan) menjadi energi mekanik (torsi dan putaran). Ketika angin melewati kedua permukaan airfoil sudu, maka aliran udara pada bagian atas lebih cepat daripada bagian bawah. Hal ini menyebabkan tekanan pada bagian atas lebih rendah daripada bagian bawah. Percobaan tekanan antara bagian bawah dengan atas pada airfoil akan menghasilkan gaya yang disebut dengan gaya angkat aerodinamik. Gaya angkat tersebut akan diteruskan pada poros dan turbin angin tersebut sehingga menyebabkan terjadinya putaran pada poros. Kombinasi gaya angkat dan gaya seret ini menyebabkan rotor berputar seperti sebuah baling-baling (Alamsyah, 2007).

2.2 Jenis-Jenis Turbin Angin



Gambar 2.1 Penampang teknologi energi angin

Berdasarkan posisi atau letak poros rotor, sistem konversi energi angin dikelompokkan dalam 2 tipe, yaitu turbine bersumbu horisontal (*horizontal axis wind turbine*) dan turbin angin bersumbu vertikal (*vertical axis wind turbine*).

2.2.1 Turbin angin sumbu horisontal

Dinamakan turbin angin bersumbu horisontal karena memiliki poros rotasi yang horisontal, atau dengan kata lain sejajar dengan arah tiupan angin. Jenis poros horisontal/datar ini bisa berupa turbin angin maupun kincir angin dengan sudu yang terbuat dengan profil pelat lengkung, layar, atau pun propeller. Rotor pelat lengkung dan layar banyak digunakan untuk kincir angin dengan jumlah sudu yang lebih banyak untuk mendapatkan torsi yang lebih besar, namun putaran rotor yang diperoleh relatif rendah, juga efisiensinya relatif rendah. Jenis turbin angin poros horisontal yang memiliki unjuk kerja yang lebih baik adalah dengan rotor sudu tipe propeller. Jenis rotor propeller dengan sudu propeller 3 bilah yang paling optimum, sehingga banyak turbin angin poros data menggunakan sudu 3 bilah, mulai kapasitas kecil kelas watt sampai dengan kapasitas MegaWatt.

Kelebihan lainnya adalah turbin angin dapat ditempatkan di ketinggian yang diinginkan, karena secara umum bahwa semakin tinggi penempatan turbin angin akan semakin tinggi energi yang dapat dihasilkan. Pada prinsipnya gaya-gaya angin yang bekerja pada sudu-sudu kincir sumbu horisontal terdiri atas tiga komponen sebagai berikut:

- i. *Gaya aksial*, yang mempunyai arah sama dengan angin, gaya ini harus ditampung oleh poros dan bantalan.

- ii. *Gaya sentrifugal* s , yang meninggalkan titik tengah. Bila kipas bentuknya simetris, semua gaya sentrifugal s akan saling meniadakan atau resultannya sama dengan nol.
- iii. *Gaya tangensial* t , yang menghasilkan momen, bekerja tegak lurus pada radius dan yang merupakan gaya produktif.

2.2.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal

Pada dasarnya cara kerja komponen-komponen turbin angin bersumbu vertikal dan horisontal adalah sama, letak perbedaan utamanya adalah pada turbin angin bersumbu vertikal, rotor berputar pada sumbu vertikal. Turbin angin tipe ini cenderung lebih mudah pada penempatan dan tidak perlu diarahkan ke arah angin. Selain itu, ia dapat beroperasi pada angin berkecepatan rendah dan sistem pemeliharaannya lebih mudah. Namun kinerjanya dalam menghasilkan energi listrik cenderung lebih rendah dibanding turbin angin bersumbu horizontal.

Hal ini terjadi karena secara teknis karakteristik koefisien daya (C_p) sudu dari turbin angin poros datar umumnya lebih rendah dibandingkan jika menggunakan profil sudu propeller. Dan pada kasus-kasus tertentu, beberapa turbin angin jenis ini tidak dapat beroperasi sendiri, sehingga membutuhkan motor listrik kecil untuk menghidupkannya. Terdapat tiga jenis desain turbin angin bersumbu vertikal sebagai berikut (Alamsyah, 2007) :

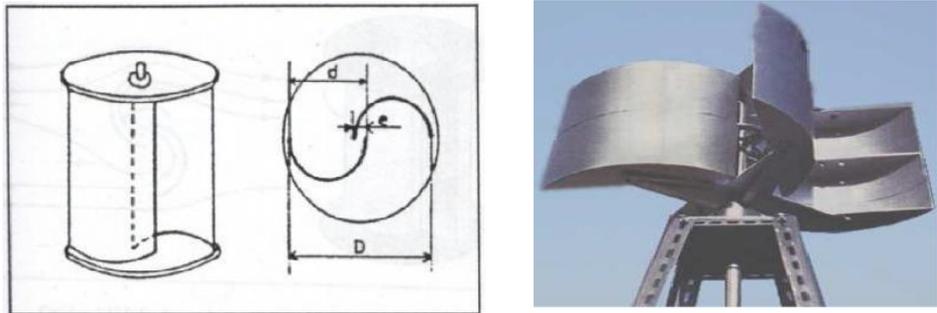
a. Savonius

Turbin angin poros tegak tipe savonius, kebanyakan menggunakan sudu tipe pelat lengkung . Berbagai model pelat lengkung untuk sudu tipe turbin

angin savonius telah banyak dikembangkan dan diujicobakan. Sejauh ini, kapasitas turbin angin tipe savonius baru dikembangkan untuk skala 10 an kilowatt . Untuk membuat prototype dengan kapasitas yang besar diperlukan material yang lebih besar dibandingkan dengan tipe poros datar. Namun kelebihanya, bahwa tipe turbin angin ini tidak memerlukan sistem geeng (yaw system) dan dapat beroperasi pada lokasi yang kondisi anginya tidak laminar.

Kincir angin savonius adalah salah satu jenis kincir angin sumbu vertikal yang mampu mengkonversikan energi kinetik angin menjadi energi mekanik berupa daya poros atau mampu mengubah energi angin horizontal menjadi energi kinetik rotasi. Kincir angin ini diciptakan di Negara Finlandia dan dipopulerkan oleh Sigurd J. Savonius pada tahun 1922 (Budi dah Mukhtar, 2013).

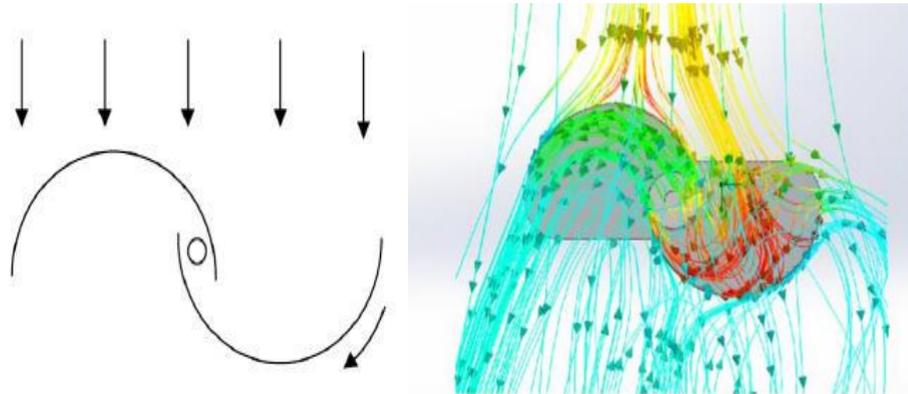
Kincir angin savonius bisa berputar pada kecepatan angin rendah, proses manufactur turbin savonius mudah dan memiliki koofisien daya rendah. Savonius banyak digunakan sebagai sebuah rotor, dimana bentuknya dibuat dari sebuah silinder yang dipotong pada sumbu bidang sentral menjadi dua bagian dan bagian tersebut disusun menyilang menyerupai huruf S (Melda, 2013). Konstruksi kincir sangat sederhana, tersusun dari dua buah sudu setengah silinder. Pada perkembangannya kincir Savonius ini banyak mengalami perubahan bentuk rotor, seperti desain rotor yang berbentuk huruf L (Dewi, 2010).



Gambar 2.2 Kincir angin savonius, (Soelaiman, 2006).

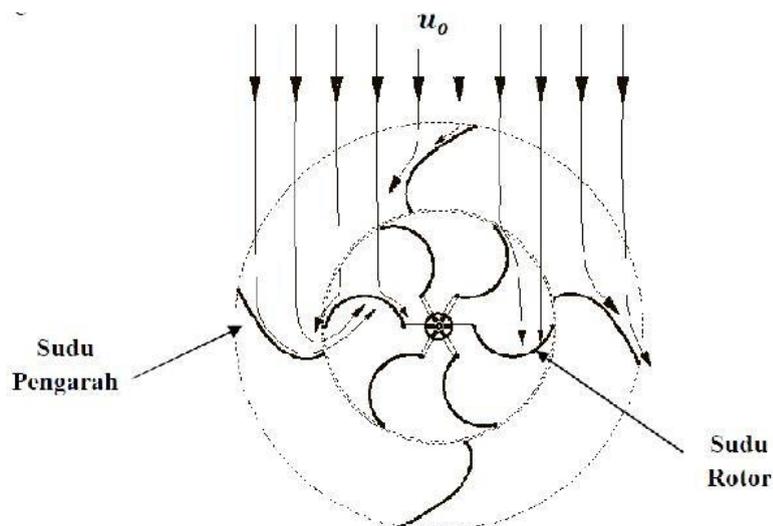
Turbin yang termasuk dalam kategori TASV (Turbin Angin Sumbu Vertikal) ini memiliki rotor dengan bentuk dasar setengah silinder. Konsep turbin angin savonius cukup sederhana, prinsip kerjanya berdasarkan *differential drag windmill*. Dimana turbin ini menghasilkan daya dengan memanfaatkan gaya *drag* yang di hasilkan dari tiap-tiap sudunya. *Drag* merupakan gaya yang bekerja berlawanan dengan arah angin yang menumbuk sudu (White, 1986).

Rotor turbin ini memanfaatkan gaya hambat (*drag*) saat mengekstrak energi angin dari aliran angin yang melalui sudu turbin. Koefisien hambat permukaan cekung lebih besar dari pada permukaan cembung. Oleh sebab itu, sisi permukaan cekung setengah silinder yang dilalui angin akan memberikan gaya hambat yang lebih besar daripada sisi lain sehingga rotor berputar. Setiap turbin angin yang memanfaatkan potensi angin dengan gaya hambat memiliki efisiensi yang terbatas karena kecepatan sudu tidak dapat melebihi kecepatan angin yang melaluinya.

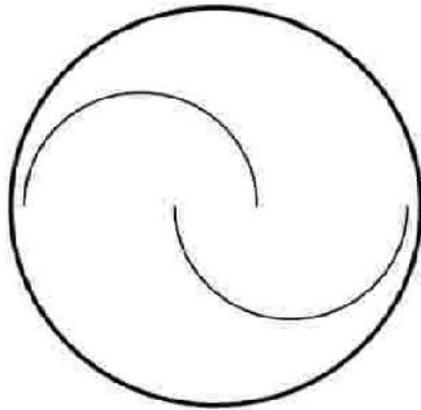


Gambar 2.3 Prinsip rotor Savonius, (Soelaiman, 2006).

Melihat sudu rotor savonius pada gambar 2.3, bila dilihat dengan seksama bahwa bentuk sudu di bagian kiri dan kanan yang langsung dihadapkan dengan arah angin memiliki gaya hambat (*drag*) yang berbeda. Bila dilihat dari arah angin, bagian kiri memiliki bentuk sudu cembung sedangkan bagian kanan berbentuk cekung. Untuk itu diperlukan sudu pengarah, dengan tujuan mengarahkan aliran angin sehingga energi angin setelah menggunakan sudu pengarah dapat dimanfaatkan semaksimal mungkin.



Gambar 2.4 Sudu Pengarah dengan Rotor Turbin Angin Savonius, (Soelaiman, 2006).

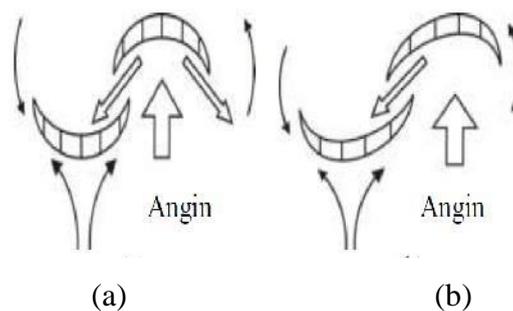


Gambar 2.5 Rotor Savonius dengan dua sudu, (Soelaiman, 2006).

Seperti tampak Gambar 2.4 dan Gambar 2.5. Geometri dari rotor Savonius memungkinkan aliran fluida mengalir tegak lurus terhadap bidang sudu bagian cembung dan bagian cekung. Dimana koefisien *drag* untuk aliran tegak lurus dengan bidang cembung sebesar 1,2 sementara koefisien *drag* untuk sisi cekung hampir sebesar dua kalinya yaitu 2,1. Karena gaya *drag* yang dihasilkan pada bagian cekung lebih besar, hal ini akan mempengaruhi torsi putaran savonius. Rotor yang bekerja dibawah pengaruh gaya drag umumnya mempunyai torsi awal yang besar tetapi memiliki efisiensi yang lebih kecil bila dibandingkan dengan rotor yang bekerja dengan gaya *lift*. Karena keuntungan inilah banyak orang memanfaatkan sebagai penggerak awal dari turbin poros vertikal tipe *lift*.

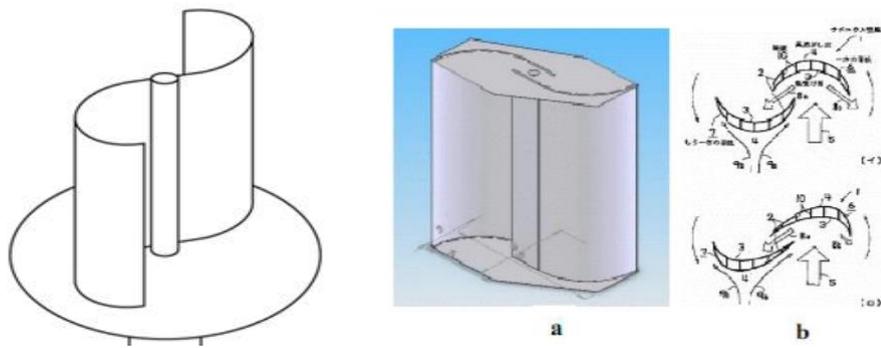
Pada rotor Savonius, angin yang berhembus salah satu bilah rotor diharapkan lebih banyak mengalir ke bilah rotor lainnya melalui celah di sekitar poros sehingga menyediakan daya dorong tambahan pada bilah rotor ini, akibatnya rotor dapat berputar lebih cepat. Dari paten pengembangan rotor Savonius L oleh Sadaaki seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.6 terlihat bahwa

pada bentuk rotor Savonius setengah lingkaran (Savonius U), aliran udara di kedua sisi bilah sama besar, sementara pada rancangan kedua (Savonius L) aliran udara pada sisi bilah yang lurus lebih besar dibandingkan pada sisi bilah lengkung seperempat lingkaran (Soelaiman, 2006).



Gambar 2.6 (a) Rotor savonius U (b) Rotor Savonius L (Soelaiman, 2006).

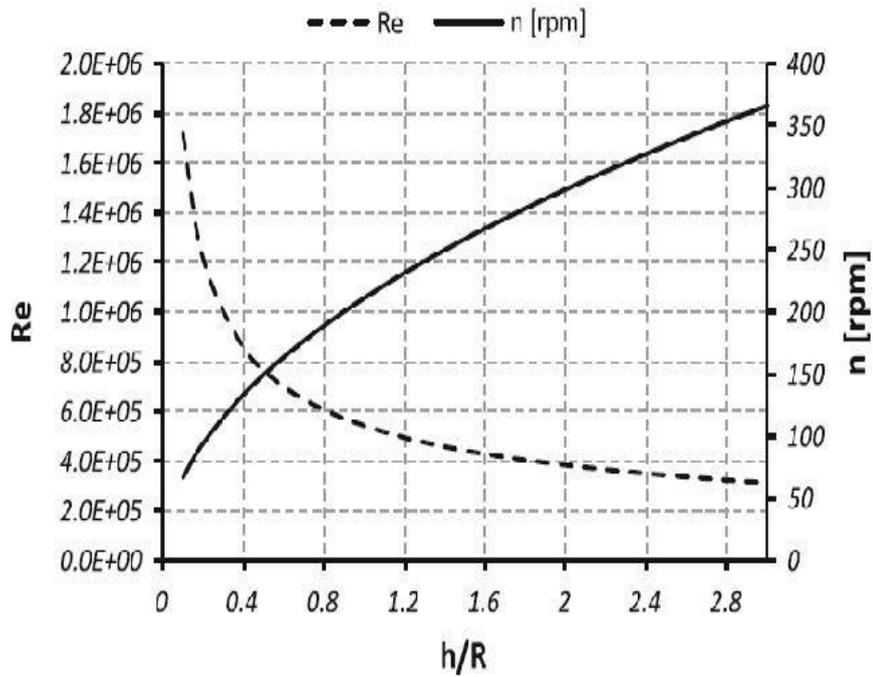
Turbin angin sumbu vertikal yang terdiri dari dua sudu berbentuk setengah silinder (*elips*) yang dirangkai sehingga membentuk S, satu sisi setengah silinder berbentuk cembung dan sisi lain berbentuk cekung yang dilalui angin. Pada rancangan rotor Savonius L ini, angin yang menumbuk salah satu bilah rotor sehingga rotor berputar, titik pusat gaya dorong angin pada rotor akan bergeser menjauhi poros rotor. Hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan torsi yang lebih besar. Rancangan rotor Savonius L diinspirasi oleh paten pengembangan rotor Savonius oleh Sadaaki dengan nomor paten JP2003293928 seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7 Dari gambar paten ini jelas terlihat bahwa pada bentuk rotor Savonius setengah lingkaran (Savonius U), aliran udara di kedua sisi bila sama besar, sementara pada rancangan kedua (Savonius L) aliran udara pada sisi bilah yang lurus lebih besar dibandingkan pada sisi bilah lengkung seperempat lingkaran.



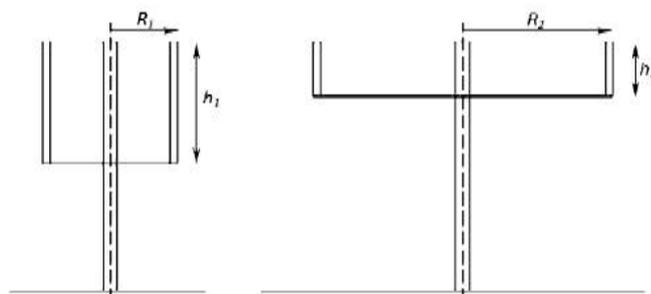
Sudu tipu U

Sudu Tipe L

Gambar 2.7 Tipe sudu turbin Savonius (Soelaiman, 2006).



Gambar 2.8 Pengaruh aspek rasio (h / R) pada kinerja VAWT (Hau, 2006)



Gambar 2.9 Turbin angin VAWT dengan aspek rasio, (Hau, 2006).

b. Darrius

Turbin angin Darrius merupakan salah satu tipe turbin angin poros tegak yang menggunakan sudu profil propeller. Dalam aplikasinya turbin angin darrius pada umumnya memerlukan kecepatan angin awal yang lebih tinggi untuk start up. Dengan kondisi demikian, seringkali tipe turbin angin darrius memerlukan penggerak mula (prime mover) untuk start up, dan penggerak mula akan berhenti setelah dicapai batas minimum untuk menggerakkan turbin secara mandiri.

c. Giromill

Turbin angin Giromill mempunyai konstruksi dan karakteristik yang mirip dengan tipe Darrius, bedanya hanya pada posisi rotor dimana untuk turbin angin Giromill, sudu sama – sama menggunakan profil propeller dan dipasang tegak sejajar dengan poros. Sedangkan pada tipe darrius, sudu propeller dipasangkan melengkung. Keduanya dalam aplikasinya turbin angin darrius pada umumnya memerlukan kecepatan angin awal yang lebih tinggi untuk start up dan kadang memerlukan penggerak mula (prime mover) untuk start up, dan penggerak mula akan berhenti setelah dicapai batas minimum untuk menggerakkan turbin secara mandiri.

2.3 Angin

Angin merupakan udara yang bergerak yang terjadi karena adanya perbedaan suhu antara udara panas dan udara dingin. Adanya perbedaan suhu udara ini karena adanya perbedaan tekanan udara di permukaan bumi. Udara bergerak dari daerah yang memiliki tekanan udara yang tinggi ke daerah yang memiliki tekanan udara yang rendah. Pada dasarnya angin yang bertiup di permukaan bumi terjadi karena

adanya penerimaan radiasi surya yang tidak merata di permukaan bumi, sehingga mengakibatkan perbedaan suhu udara (Habibie, dkk, 2011).

Dimana kecepatan angin sangat dipengaruhi oleh ketinggiannya dari permukaan tanah. Semakin mendekati permukaan tanah, kecepatan angin semakin rendah karena adanya gaya gesek antara permukaan tanah dan angin. Untuk alasan ini, PLTB biasanya dibangun dengan menggunakan tower yang tinggi atau dipasang diatas bangunan.

2.4 Jenis-jenis Angin

Angin timbul akibat sirkulasi di atmosfer yang dipengaruhi oleh aktivitas matahari dalam menyinari bumi yang berotasi. 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. Perbedaan berat jenis dan tekanan udara inilah yang akan menimbulkan adanya pergerakan udara. Adapun jenis-jenis angin sebagai berikut:

2.4.1 Angin Laut dan Angin Darat

Angin laut adalah angin yang timbul akibat adanya perbedaan suhu antara daratan dan lautan. Seperti yang kita ketahui bahwa sifat air dalam melepaskan panas dari radiasi sinar matahari lebih lambat daripada daratan, sehingga suhu di laut pada malam hari akan lebih tinggi dibandingkan dengan suhu di daratan. Semakin tinggi suhu, tekanan udara akan semakin rendah. Akibat adanya perbedaan suhu ini akan menyebabkan terjadinya perbedaan tekanan udara di atas daratan dan lautan. Hal inilah yang menyebabkan angin akan bertiup dari arah

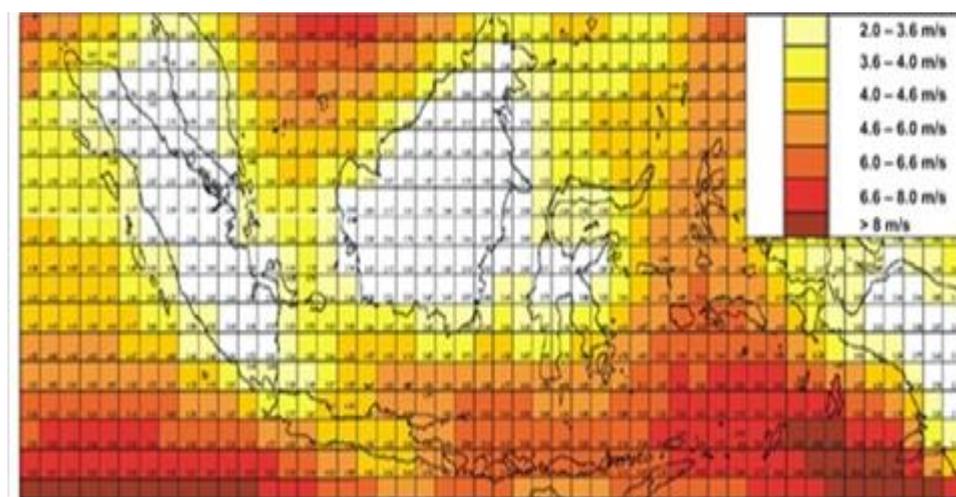
darat ke arah laut. Sebaliknya, pada siang hari dari pukul 09.00 sampai dengan pukul 16.00 angin akan berhembus dari laut ke darat akibat sifat air yang lebih lambat menyerap panas matahari.

2.4.2 Angin Lembah

Angin lembah adalah angin yang bertiup dari arah lembah ke arah puncak gunung yang biasa terjadi pada siang hari. Prinsip terjadinya hampir sama dengan terjadinya angin darat dan angin laut yaitu akibat adanya perbedaan suhu antara lembah dan puncak gunung.

2.5 Potensi Energi Angin di Indonesia

Pada Gambar 2.10 merupakan peta potensi energi angin di Indonesia yang dapat digunakan sebagai referensi dalam mengembangkan pembangkit listrik tenaga angin di Indonesia. Perbedaan kecepatan udara terlihat dari perbedaan warnanya. Biru menyatakan kecepatan udara rendah, sedangkan hijau, kuning, merah dan sekitarnya menyatakan semakin besarnya kecepatan angin.



Gambar 2.10 Peta persebaran kecepatan angin di Indonesia

Kelas	Kec. Angin (m/s)	Daya Spesifik (W/m^2)	Kapasitas (kW)	Lokasi
Skala kecil	2,5 - 4,0	< 75	s/d 10	Jawa, NTB, NTT, Maluku, Sulawesi
Skala Menengah	4,0 - 5,0	75 - 150	10 – 100	NTB, NTT , Sulsel, Sultra
Skala besar	> 5,0	> 150	> 100	Sulsel, NTB, NTT, Pantai Selatan Jawa

Tabel 2.1 Pengelompokan potensi energi angin, pemanfaatan dan lokasi Potensial (LAPAN, 2005).

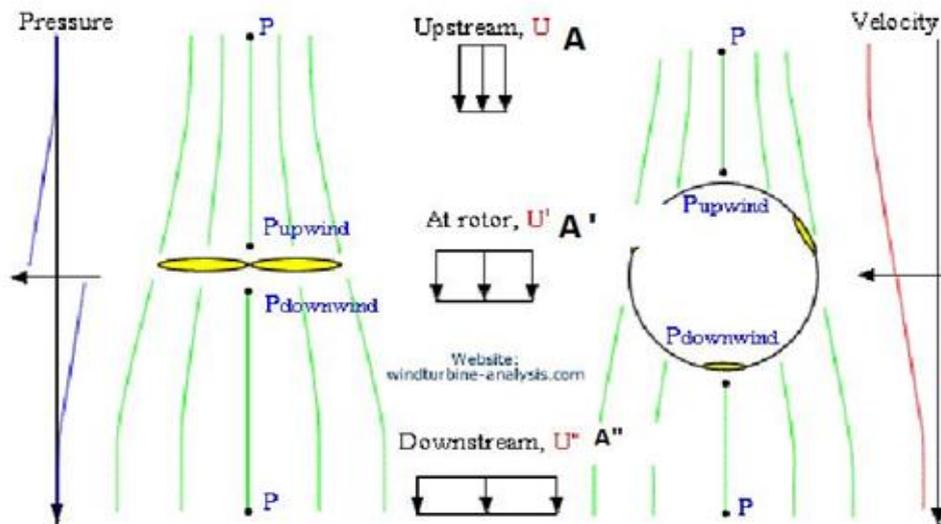
Pada tahun 2009, kapasitas terpasang dalam sistem konversi angin di seluruh Indonesia mencapai 1,4 MW yang tersebar di Pulau Selayar (Sulawesi Utara), Nusa Penida (Bali), Yogyakarta, dan Bangka Belitung. Melihat potensi wilayah pantai cukup luas, pemanfaatan tenaga angin sebagai sumber energi terbarukan di Indonesia sangat mungkin untuk dikembangkan lebih lanjut (Eko S. Baruna, Pusat data dan Informasi ESDM).

Salah satu pemanfaatan energi angin adalah penggunaan turbin angin yang banyak digunakan untuk kebutuhan pertanian, seperti untuk menggerakkan pompa untuk keperluan irigasi, serta kebutuhan akan energi yaitu sebagai pembangkit listrik energi angin.

2.5 Teori Momentum Elementer Beltz

Albert Betz seorang aerodinamikawan Jerman, adalah orang pertama yang memperkenalkan teori tentang turbin angin. Dalam bukunya *“Die Windmuhlen im Lichte neuerer Forschung. Die Naturwissenschaft.”* (1927), ia mengasumsikan bahwa, suatu turbin mempunyai sudu-sudu yang tak terhingga

jumlahnya dan tanpa hambatan. Juga diasumsikan bahwa aliran udara di depan dan di belakang rotor memiliki kecepatan yang seragam (aliran laminar) (Reksoatmodjo, 2004).



Gambar 2.11 Arah angin sebelum dan sesudah turbin

Seperti pada Gambar 2.11 terlihat bahwa jika U adalah kecepatan angin di depan rotor, U' adalah kecepatan angin pada saat melalui rotor dan U'' adalah kecepatan angin dibelakang rotor, maka berdasarkan persamaan kontinuitas (Liang, 2002);

$$AU = A'U' = A''U''$$

Selanjutnya berdasarkan teorema Euler, gaya yang bekerja pada rotor adalah;

$$F = \rho A' U' (U - U'')$$

Karenanya daya kinetic angina yang diserap oleh rotor adalah

$$P_{t=F U'} = \rho A' U'^2 (U - U'')$$

Selisih daya kinetic didepan dan di belakang rotor dapat dihitung dengan persamaan energy kinetik:

$$\int_{U_1}^{U_2} \rho U dU = \int_{P_1}^{P_2} dP$$

Dengan integral diperoleh:

$$\rho \left(\frac{U_1 + U_2}{2} \right) (U_1 - U_2) = P_2 - P_1$$

Substitusikan kecepatan angin diatas kedalam persamaan Bernoulli sehingga diperoleh:

$$\rho \left(\frac{U_1 + U_2}{2} \right) (U - U') = P_{up} - P$$

dan

$$\rho \left(\frac{U_1 + U_2}{2} \right) (U' - U'') = P - P_{down}$$

Dengan menambahkan kedua persamaan untuk menghilangkan P maka diperoleh:

$$\rho \left(\frac{U_1 + U_2}{2} \right) (U - U') + \rho \left(\frac{U_1 + U_2}{2} \right) (U' - U'') = P_{up} - P_{down}$$

$$\frac{\rho U^2}{2} - \frac{\rho U''^2}{2} = P_{up} - P_{down}$$

Sehingga diperoleh dua akar persamaan yaitu $U'' = -U$ yang berarti menghasilkan energy kinetik minimum dan $U'' = \frac{U}{3}$ merupakan harga yang menghasilkan energy kinetic maksimum. Dengan demikian energy kinetic maksimum yang diperoleh adalah:

$$P_{t maks} = \frac{8}{27} \rho A' U^3$$

$$C_p = \frac{\frac{8}{27} \rho A' U^3}{\frac{1}{2} \rho A' U^3} \times 100 \%$$

2.6 Persamaan-Persamaan Yang Digunakan

Ada beberapa persamaan-persamaan yang digunakan sebagai berikut:

1. Daya angin

Daya angin adalah besaran energi yang dapat dihasilkan oleh angin pada kecepatan tertentu yang menabrak sebuah turbin angin dengan luas bidang tertentu. Untuk menghitung daya angin dapat digunakan pada persamaan 1 sebagai berikut (Umanand, 2007):

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

dimana;

- P_a = daya angin (watt)
- ρ = densitas udara (kg/m^3)
- A = luas penampang turbin (m^2)
- v = kecepatan udara (m/s)

2. Daya generator (P_{gen})

Daya generator merupakan besaran daya elektrik yang dapat dibangkitkan oleh generator akibat berputarnya rotor generator yang dihubungkan dengan poros turbin. Untuk menghitung luas permukaan dapat digunakan pada persamaan 2 sebagai berikut (Nursuhud, 2008):

$$P_{\text{generator}} = V \times I \dots\dots\dots (2)$$

dimana:

- $P_{\text{generator}}$ = Daya generator listrik (*Watt*)
- V = Tegangan generator listrik (*Volt*)
- I = Arus listrik (*Ampere*)

3. Brake horse power (BHP)

Brake horse power adalah besarnya daya yang dapat dihasilkan langsung dari putaran yang dikeluarkan oleh turbin. Brake horse power ditentukan dengan persamaan 3 sebagai berikut (Nursuhud, 2008):

$$\text{BHP} = \frac{P_{generator}}{\eta_{generator}} \dots\dots\dots(3)$$

dimana:

BHP = Brake Horse Power (watt)

$P_{generator}$ = Daya generator listrik (watt)

$\eta_{generator}$ = Efisiensi generator listrik (%)

4. Torsi (τ)

Torsi sama dengan gaya pada gerak translasi. Torsi menunjukkan kemampuan sebuah gaya untuk membuat benda melakukan gerak rotasi. Untuk menghitung torsi dapat digunakan pada persamaan 4 sebagai berikut (Nursuhud, 2008):

$$\tau = \frac{P_{generator}}{\frac{2\pi n}{60}} \dots\dots\dots(4)$$

dimana:

$P_{generator}$ = Daya generator listrik (watt)

τ = besarnya torsi yang terjadi (Nm)

n = Putaran Poros (rpm)

$\pi = 3,14$

5. Koefisien daya (Cp)

Koefisien daya merupakan energi mekanik yang terpengaruh oleh daya angin. Untuk menghitung koefisien daya dapat diindikasikan pada persamaan 5 sebagai berikut (Nursuhud, 2008):

$$C_p = \frac{BHP}{P_{angin}} \dots\dots\dots(5)$$

dimana:

BHP = Brake horse power

Pangin = Daya angin (Watt)

6. Tip speed ratio (TSR)

Tip speed ratio (rasio kecepatan ujung) adalah rasio kecepatan ujung rotor terhadap kecepatan angin bebas. Untuk kecepatan angin nominal yang tertentu, tip speed ratio akan berpengaruh pada kecepatan rotor. Untuk menghitung tip speed ratio dapat ditunjukkan pada persamaan 6 sebagai berikut (Hau, 2006):

$$\lambda = \frac{\omega \cdot r}{V_w} \dots\dots\dots(6)$$

dimana:

λ = tip speed ratio

ω = Kecepatan Sudut (rad/s)

V_w = kecepatan angin (m/s)

7. Gaya hambat

Untuk menghitung gaya hambat dapat ditunjukkan pada persamaan 7 sebagai berikut (White,1994):

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot C_d \dots\dots\dots(7)$$

dimana:

F_d = gaya drag (N)

ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)

V = kecepatan fluida (m/s)