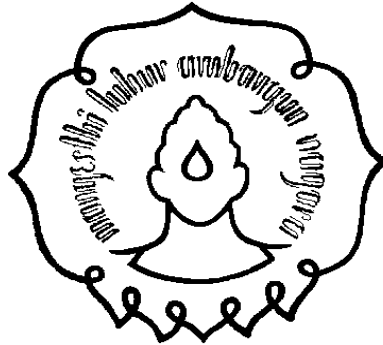


**ANALISIS KINERJA TURBIN ANGIN POROS VERTIKAL  
DENGAN MODIFIKASI ROTOR SAVONIUS L UNTUK  
OPTIMASI KINERJA TURBIN**



**Disusun oleh :**  
**MARIZKA LUSTIA DEWI**  
**M 0205037**

**SKRIPSI**  
**Diajukan untuk memenuhi sebagian**  
**persyaratan mendapatkan gelar Sarjana Sains Fisika**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**  
**UNIVERSITAS SEBELAS MARET**  
**SURAKARTA**  
**Juli, 2010**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini dibimbing oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

**Drs. Iwan Yahya, M.Si**

**NIP. 19670730 199302 1 001**

**Ir. Ari Handono R, M.Sc, Ph.D**

**NIP. 19610223 198601 1 001**

Dipertahankan di depan Tim Penguji Skripsi pada :

Hari :

Tanggal :

Anggota Tim Penguji :

1. **Drs. Usman Santosa M.S.** ( ..... )  
**NIP. 19510407 197503 1 003**
2. **Riyatun M.Si.** ( ..... )  
**NIP. 19680226 199402 2 001**

Disahkan oleh

Jurusan Fisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Sebelas Maret Surakarta

Ketua Jurusan Fisika

**Drs. Harjana, M.Si., Ph.D**

**NIP. 19590725 198601 1 001**

## **PERNYATAAN**

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “ANALISIS KINERJA TURBIN ANGIN POROS VERTIKAL DENGAN MODIFIKASI ROTOR SAVONIUS L UNTUK OPTIMASI KINERJA TURBIN” belum pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga belum pernah ditulis atau dipublikasikan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Surakarta, 10 Juli 2010

MARIZKA LUSTIA DEWI

## MOTTO

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

“Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan.  
Maka apabila kamu telah selesai dari sesuatu urusan, kerjakanlah  
dengan sungguh-sungguh urusan yang lain”

(QS. Al Nasyah: 6-7)

"Diantara tanda keberhasilan pada akhir perjuangan adalah berserah  
diri kepada Allah sejak permulaan "

(Ibn. Athaillah)

”Kalau kamu sudah mengetahui satu, kamu harus mengetahui  
semuanya”

(Phormio Terence)

## PERSEMBAHAN

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

*Karya ini kupersembahkan kepada  
Bapak dan Ibu Qu tercinta  
Semua keluarga yang telah mendukungku  
Pembaca*

# **ANALISIS KINERJA TURBIN ANGIN POROS VERTIKAL DENGAN MODIFIKASI ROTOR SAVONIUS L UNTUK OPTIMASI KINERJA TURBIN**

Marizka Lustia Dewi  
Program Studi Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Sebelas Maret  
Email: mariezmanis@yahoo.co.id

## **ABSTRAK**

Turbin Savonius merupakan turbin sumbu vertikal yang dapat beroperasi dengan baik pada kecepatan angin rendah. Secara umum kinerja turbin dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya adalah bentuk aerodinamis turbin. Penelitian ini dilakukan dengan memodifikasi rotor Savonius L dengan variasi sudut kelengkungan turbin sebanyak 8 variasi sudut  $\theta$ , yaitu masing-masing sebesar  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$ , dan  $80^\circ$  dengan panjang busur  $r$  tetap. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui pengaruh dari variasi sudut kelengkungan terhadap putaran turbin pada setiap variasi kecepatan angin. Dari grafik hubungan putaran turbin terhadap kecepatan angin, diketahui bahwa putaran turbin akan naik sejalan dengan pengurangan sudut kelengkungan dan penambahan kecepatan angin. Turbin yang memiliki putaran paling besar adalah turbin dengan sudut kelengkungan sebesar  $\theta = 20^\circ$  dan putaran paling kecil terdapat pada turbin dengan sudut kelengkungan yang paling besar, yaitu pada sudut,  $\theta = 80^\circ$ .

Kata kunci: turbin angin sumbu vertikal, rotor Savonius L, aerodinamis turbin

**THE PERFORMANCE ANALYSIS OF WIND TURBINE VERTICAL  
AXIS BY ROTOR MODIFICATION OF SAVONIUS L FOR  
OPTIMIZATION TURBINE PERFORMANCE**

Marizka Lustia Dewi

Department of Physics, Faculty of Science, Sebelas Maret University

Email: mariezmanis@yahoo.co.id

**ABSTRACT**

Savonius wind turbine is a vertical axis turbine that can operate properly at low wind speeds. In general, the turbine performance is influenced by several factors, one of which is a form of aerodynamic turbine. This research was done by modifying the rotor angle variation of Savonius L with as many as 8 variations of curvature turbine angle  $\theta$ , that is each of  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$ , and  $80^\circ$ , with r fixed arc length. The aim of this research is to determine the effect of variations in angle of curvature of the turbine rotation at any wind speed variations. From the graph of the relationship between the rotation speed and the wind turbine, it is known that rotation of turbines rises in line with the reduction in angle of curvature and the addition of wind speed. The turbine with the angle of curvature of  $\theta = 20^\circ$  has the biggest rotation and the turbine with the angle of curvature of  $\theta = 80^\circ$  has the smallest rotation.

Keywords: vertical axis wind turbine, Savonius L, aerodynamic turbine

## KATA PENGANTAR



Alhamdulillahirobbil'alamiin, Segala puji dan syukur bagi Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi dengan. judul ” ANALISIS KINERJA TURBIN ANGIN POROS VERTIKAL DENGAN MODIFIKASI ROTOR SAVONIUS L UNTUK OPTIMASI KINERJA TURBIN”. Penulis menyadari bahwa dalam menyelesaikan skripsi ini mengalami berbagai kendala karena keterbatasan dan kemampuan penulis.

Banyak pihak telah membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Dengan rasa tulus dan ikhlas penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Dekan FMIPA Universitas Sebelas Maret Surakarta.
2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Sebelas Maret Surakarta.
3. Bapak Drs. Iwan Yahya, M.si., selaku pembimbing I yang dengan sabar selalu memberi dorongan, pengajaran dan bimbingan kepada penulis.
4. Bapak Ir. Ari Handono R, M.Sc, Ph.D selaku pembimbing II atas kesabaran beliau dalam membimbing penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
5. Ibu Viska Inda Varianti, S.Si., M.Si. selaku pembimbing akademik. Terima kasih atas perhatian dan pengarahan yang telah diberikan kepada penulis dari awal kuliah hingga lulus.
6. Keluarga tercinta: Bapak, Ibu, Om, Bule, dan Adik-adik Q atas dukungan moral dan material yang tak terkirakan.
7. Teman-temanku; Mb Dyah, Mayang, Isni, Sita, Tono, Mb Siti, Mega, Fuzi, Affa, Agung, Aris, dan teman-teman lainnya yang tak dapat ku sebut satu per satu yang telah banyak membantu dari awal hingga akhir pengerjaan laporan ini.



8. Kepada Pak Eko, Pak Yun, Mas Johan, dan Mas Ari, Terimakasih atas semua bantuannya.
9. Kepada sahabat-sahabat Qu: Ina, Farrah, Mila, Nur, dan Isra. Walaupun kalian jauh, Terimakasih atas supportnya (Love U All).
10. Semua pihak yang telah membantu penulis sehingga laporan penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.

Semoga Allah SWT memberikan balasan yang lebih baik atas kebaikan dan bantuan yang telah engkau berikan. Dalam penyusunan laporan penelitian ini, penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan baik dalam isi maupun cara penyajian materi. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran guna perbaikan di masa datang. Semoga laporan penelitian ini dapat memberi manfaat bagi penulis khususnya dan pembaca pada umumnya.

Surakarta, 10 Juli 2010

Penulis

## DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PENGESAHAN .....	ii
HALAMAN PERNYATAAN.....	iii
MOTTO .....	iv
PERSEMBAHAN.....	v
HALAMAN ABSTRAK .....	vi
HALAMAN ABSTRACT .....	vii
KATA PENGANTAR .....	viii
DARTAR ISI .....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	4
2.1 Energi Angin.....	4
2.1.1 Teori Momentum Element Betz .....	5
2.1.2 <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR) .....	8
2.2 Turbin angin.....	9
2.2.1 Turbin Angin Savonius .....	13
2.2.2 Aerodinamika <i>Drag</i> pada Turbin Sumbu Tegak.....	14
2.3 Mekanika Fluida .....	15
2.3.1 Bilangan Reynolds .....	16
2.3.2 Persamaan Kontinuitas.....	17

2.4 Rotasi Benda Tegar .....	18
2.4.1 Momen Inersia .....	20
2.4.2 Torsi .....	21
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>22</b>
3.1 Metode Penelitian .....	22
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian .....	22
3.3 Alat dan Bahan yang Digunakan .....	22
3.3.1 Alat Penelitian.....	22
3.3.2 Bahan Penelitian .....	22
3.4 Prosedur Penelitian .....	23
3.4.1 Perancangan Turbin .....	24
3.4.2 Pembuatan Turbin .....	25
3.4.3 Set up Alat.....	25
3.4.4 Pengambilan Data .....	26
3.4.5 Analisa Data .....	26
3.4.6 Kesimpulan dan Saran .....	26
<b>BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>27</b>
4.1 Pengujian Karakteristik Turbin.....	27
4.2 Hasil Penelitian .....	29
4.2.1 Aerodinamika Turbin.....	29
4.2.2 <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR) .....	31
4.2.3 Torsi Turbin .....	32
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>33</b>
5.1 Kesimpulan .....	33
5.2 Saran .....	33
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>34</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>36</b>

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Spesifikasi Rancangan Rotor Turbin Savonius L Modifikasi ...	24
Tabel 1.A Kecepatan Angin Terhadap Putaran Turbin pada Sudut $\theta = 20^0$	36
Tabel 1.B Kecepatan Angin Terhadap Putaran Turbin pada Sudut $\theta = 30^0$	36
Tabel 1.C Kecepatan Angin Terhadap Putaran Turbin pada Sudut $\theta = 40^0$	36
Tabel 1.D Kecepatan Angin Terhadap Putaran Turbin pada Sudut $\theta = 45^0$	36
Tabel 1.E Kecepatan Angin Terhadap Putaran Turbin pada Sudut $\theta = 50^0$	36
Tabel 1.F Kecepatan Angin Terhadap Putaran Turbin pada Sudut $\theta = 60^0$	37
Tabel 1.G Kecepatan Angin Terhadap Putaran Turbin pada Sudut $\theta = 70^0$	37
Tabel 1.H Kecepatan Angin Terhadap Putaran Turbin pada Sudut $\theta = 80^0$	37
Tabel 1.I Rata-Rata Kecepatan Angin Terhadap Putaran Turbin .....	38
Tabel 1.J Nilai TSR Untuk Masing-Masing Turbin .....	38
Tabel 1.K Nilai Torsi Untuk Masing-Masing Turbin .....	38

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Profil kecepatan angin melewati penampang rotor .....	5
Gambar 2.2 Faktor daya sebagai fungsi TSR berbagai jenis turbin .....	9
Gambar 2.3 Komponen turbin angin .....	10
Gambar 2.4 Variasi jumlah blade pada HAWT .....	11
Gambar 2.5 Turbin angin sumbu tegak .....	12
Gambar 2.6 Tipe Rotor Savonius .....	13
Gambar 2.7 (a) Rotor Savonius U, dan (b) rotor Savonius L .....	14
Gambar 2.8 Profil kecepatan untuk rotor tipe <i>drag</i> .....	15
Gambar 2.9 Aliran fluida: (a) Aliran laminar, (b) Aliran Turbulen.....	16
Gambar 2.10 Tabung alir dengan perubahan luas penampang .....	17
Gambar 2.11 Momen inersia baling-baling pada sumbu vertikal.....	21
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian .....	23
Gambar 3.2 Modifikasi sudu turbin .....	24
Gambar 3.3 Skema alat penelitian .....	25
Gambar 4.1 Posisi anemometer terhadap sumber angin .....	27
Gambar 4.2 (a) Pengukuran putaran turbin, (b) penempatan turbin .....	28
Gambar 4.3 Grafik hubungan putaran turbin terhadap kecepatan angin ...	29
Gambar 2.A Anemometer .....	39
Gambar 2.B <i>Stroboscope</i> .....	39
Gambar 2.C Kipas Angin .....	39
Gambar 2.D Statif .....	39

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 Data Hasil Penelitian .....	36
Lampiran 2 Gambar Alat .....	39

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang Masalah**

Sepanjang sejarah manusia kemajuan-kemajuan besar dalam kebudayaan selalu diikuti oleh meningkatnya konsumsi energi. Peningkatan ini berhubungan langsung dengan tingkat kehidupan penduduk serta kemajuan industrialisasi. Sejak revolusi industri, penggunaan bahan bakar meningkat secara tajam, oleh sebab itu diperlukan sumber energi yang dapat memenuhi semua kebutuhan. Salah satu sumber energi yang banyak digunakan adalah energi fosil. Sayangnya energi ini termasuk energi yang tidak dapat diperbaharui dan jika energi fosil ini habis maka diperlukan sumber-sumber energi baru (Daryanto, 2007). Selain itu penggunaan energi fosil juga berdampak negatif terhadap lingkungan, baik secara langsung maupun tidak langsung seperti pemanasan global yang berdampak pada kerusakan ekologi.

Untuk mengatasi ketergantungan terhadap energi fosil, maka perlu dilakukan konversi, konservasi, dan pengembangan sumber-sumber energi baru terbarukan. Pengembangan ini harus memperhatikan tiga "E", yakni energi, ekonomi, dan ekologi. Jadi, pengembangan sumber energi harus dapat memproduksi energi dalam jumlah yang besar, dengan biaya yang rendah serta mempunyai dampak minimum terhadap lingkungan (Culp, 1991). Salah satu pemanfaatan energi terbarukan yang saat ini memiliki potensi besar untuk dikembangkan adalah energi angin. Energi ini merupakan energi yang bersih dan dalam proses produksinya tidak mencemari lingkungan (Nakajima dan Ikeda, 2008).

Energi angin merupakan sumber daya alam yang dapat diperoleh secara cuma-cuma yang jumlahnya melimpah dan tersedia terus-menerus sepanjang tahun. Indonesia merupakan negara kepulauan yang memiliki sekitar 17.500 pulau dengan panjang garis pantai lebih dari 81.290 km. Indonesia memiliki potensi energi angin yang sangat besar yaitu sekitar 9,3 GW dan total kapasitas yang baru terpasang saat ini sekitar 0,5 MW (Daryanto, 2007).

Perkembangan energi angin di Indonesia untuk saat ini masih tergolong rendah. Salah satu penyebabnya adalah karena kecepatan angin rata-rata di wilayah Indonesia tergolong kecepatan angin rendah, yaitu berkisar antara 3 m/s hingga 5 m/s sehingga sulit untuk menghasilkan energi listrik dalam skala besar. Meskipun demikian, potensi angin di Indonesia tersedia hampir sepanjang tahun, sehingga memungkinkan untuk dikembangkan sistem pembangkit listrik skala kecil.

Turbin yang sesuai untuk kecepatan angin rendah adalah turbin Savonius. Turbin ini memiliki torsi awal yang besar pada kecepatan angin rendah (Kamal, 2008). Secara sederhana pembuatan prototipe dapat dilakukan dengan membelah sebuah kaleng menjadi dua kemudian menggesernya, turbin seperti ini disebut juga dengan rotor Savonius tipe U. Turbin Savonius termasuk turbin tipe sumbu tegak (*vertical axis*) yang rotornya dapat berputar untuk semua arah angin.

Sejak ditemukan oleh Sigurt J. Savonius pada tahun 1922 hingga saat ini, turbin Savonius banyak mengalami pengembangan desain. Salah satunya adalah desain rotor Savonius tipe L. Bentuk dari rotor Savonius L merupakan kombinasi profil datar dan lengkungan yang umumnya berbentuk seperempat lingkaran. Rotor Savonius L ini memiliki kelebihan dari Savonius U, yaitu pada Savonius L angin yang menumbuk rotor lebih banyak mengalir ke bilah rotor lainnya melalui celah di pusat turbin, sehingga memberikan energi tambahan pada bilah rotor ini (Soelaiman, 2006).

Berdasarkan latar belakang di atas, maka dilakukan pengembangan desain pada Savonius L dengan melakukan modifikasi pada rotor Savonius L. Modifikasi dilakukan dengan memvariasi sudut kelengkungan dengan 8 variasi sudut sebesar  $\theta$ , yaitu masing-masing sebesar  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$ , dan  $80^\circ$  dengan panjang busur profil lengkung sebesar  $r$ , tetap. Jumlah rotor yang digunakan adalah sebanyak dua buah. Penelitian dilakukan dengan tiga variasi kecepatan angin, yaitu 4,2 m/s, 4,6 m/s, dan 5,2 m/s.



## **1.2. Perumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang masalah, perumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimanakah pengaruh variasi sudut kelengkungan terhadap putaran turbin Savonius L Modifikasi.
2. Bagaimanakah pengaruh penambahan kecepatan angin terhadap putaran turbin Savonius L Modifikasi.
3. Bagaimanakah pengaruh penambahan jari-jari terhadap nilai torsi turbin.

## **1.3. Batasan Masalah**

Permasalahan pada penelitian ini dibatasi pada

1. Variasi sudut kelengkungan yang digunakan sebanyak 8 variasi, masing-masing sebesar,  $\theta = 20^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $40^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $50^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ ,  $70^{\circ}$ , dan  $80^{\circ}$ .
2. Kecepatan angin dianggap konstan dan berasal dari satu arah, yaitu dari depan turbin angin dengan sumber angin berasal dari kipas angin merek Denpoo model DBF-1122.

## **1.4. Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh variasi sudut kelengkungan terhadap banyaknya putaran turbin.
2. Mengetahui pengaruh penambahan kecepatan angin terhadap banyaknya putaran turbin.
3. Mengetahui pengaruh penambahan jari-jari terhadap nilai torsi turbin.

## **1.5. Manfaat Penelitian**

Dari hasil penelitian diharapkan dapat mengetahui pengaruh variasi sudut kelengkungan dan penambahan kecepatan angin terhadap banyaknya putaran rotor, sehingga kemudian diketahui desain turbin mana yang mempunyai optimasi maksimum. Secara umum penelitian ini diharapkan bermanfaat dalam pengembangan energi terbarukan khususnya pengembangan turbin angin yang mampu beroperasi secara efisien pada kecepatan angin rendah.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Energi Angin

Angin merupakan udara yang bergerak disebabkan adanya perbedaan tekanan. Udara akan mengalir dari daerah bertekanan tinggi ke daerah bertekanan lebih rendah. Perbedaan tekanan udara dipengaruhi oleh sinar matahari. Daerah yang banyak terkena paparan sinar matahari akan memiliki temperatur yang lebih tinggi daripada daerah yang sedikit terkena paparan sinar matahari. Menurut hukum gas ideal, temperatur berbanding terbalik dengan tekanan, dimana temperatur yang tinggi akan memiliki tekanan yang rendah, dan sebaliknya.

Udara yang memiliki massa  $m$  dan kecepatan  $v$  akan menghasilkan energi kinetik sebesar:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

Volume udara per satuan waktu (debit) yang bergerak dengan kecepatan  $v$  dan melewati daerah seluas  $A$  adalah:

$$V = vA \quad (2.2)$$

Massa udara yang bergerak dalam satuan waktu dengan kerapatan  $\rho$ , yaitu:

$$m = \rho V = \rho vA \quad (2.3)$$

Sehingga energi kinetik angin yang berhembus dalam satuan waktu (daya angin) adalah:

$$P_w = \frac{1}{2}(\rho Av)(v^2) = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2.4)$$

Dengan:  $P_w$  = daya angin (watt)

$\rho$  = densitas udara ( $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ )

$A$  = luas penampang turbin ( $\text{m}^2$ )

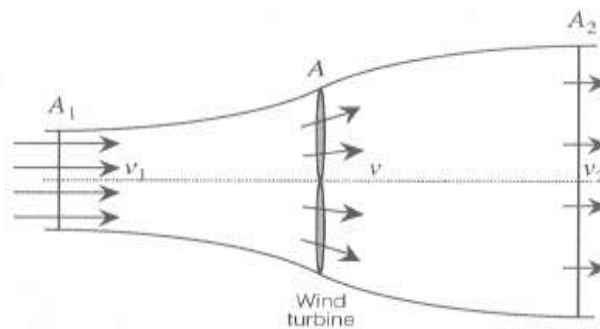
$v$  = kecepatan udara (m/s)

Besar daya di atas adalah daya yang dimiliki oleh angin sebelum dikonversi atau sebelum melewati turbin angin. Dari daya tersebut tidak semuanya dapat dikonversi menjadi energi mekanik oleh turbin (Ajao dan Adeniyi, 2009).

### 2.1.1. Teori Momentum Elementer Betz

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).

Dalam sistem konversi energi angin, energi mekanik turbin hanya dapat diperoleh dari energi kinetik yang tersimpan dalam aliran angin, berarti tanpa perubahan aliran massa udara, kecepatan angin di belakang turbin haruslah mengalami penurunan. Dan pada saat yang bersamaan luas penampang yang dilewati angin haruslah lebih besar, sesuai dengan persamaan kontinuitas. Jika  $v_1$  = kecepatan angin di depan rotor,  $v$  = kecepatan angin saat melewati rotor, dan  $v_2$  = kecepatan angin di belakang rotor, maka daya mekanik turbin diperoleh dari selisih energi kinetik angin sebelum dan setelah melewati turbin (lihat Gambar 2.1).



Gambar 2.1 Profil kecepatan angin melewati penampang rotor (Dutta, 2006)

Daya mekanik turbin adalah:

$$\begin{aligned} P_T &= \frac{1}{2} \rho A_1 v_1^3 - \frac{1}{2} \rho A_2 v_2^3 \\ &= \frac{1}{2} \rho (A_1 v_1^3 - A_2 v_2^3) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Dari persamaan kontinuitas diperoleh:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (2.6)$$

Sehingga,

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A_1 v_1 (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.7)$$

Dengan menstubsitusi persamaan (2.3) ke persamaan (2.7) menjadi:

$$P_T = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.8)$$

Dari persamaan ini dapat disimpulkan bahwa untuk mendapat daya mekanik maksimum,  $v_2$  harus bernilai nol tetapi pada kenyataannya tidaklah mungkin. Jika  $v_2 = 0$ ,  $v_1$  haruslah bernilai nol yang berarti tidak terjadi aliran udara sehingga tidak ada daya yang dihasilkan. Untuk mendapatkan daya maksimum, maka diperlukan suatu nilai perbandingan (rasio) antara  $v_1$  dan  $v_2$ . Untuk mendapatkan rasio ini diperlukan suatu persamaan yang menunjukkan daya mekanik turbin.

Gaya yang bekerja pada turbin (lihat Gambar 2.1):

$$F_T = m (v_1 - v_2) \quad (2.9)$$

Maka daya turbin adalah:

$$P_T = F_T v = m (v_1 - v_2) v \quad (2.10)$$

Dari persamaan (2.8) dan (2.10)

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_2^2) &= m (v_1 - v_2) v \\ \frac{1}{2} m (v_1 + v_2) (v_1 - v_2) &= m (v_1 - v_2) v \end{aligned}$$

$$v = \frac{\frac{1}{2}m(v_1 + v_2)(v_1 - v_2)}{m(v_1 - v_2)}$$

$$v = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) \quad (2.11)$$

sehingga kecepatan aliran pada turbin sebanding dengan nilai  $v_1$  dan  $v_2$ . Aliran massa udara menjadi:

$$m = \rho Av = \frac{1}{2} \rho A(v_1 + v_2) \quad (2.12)$$

Daya mekanik turbin menjadi:

$$P_T = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_2^2)$$

$$= \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} \rho A (v_1 + v_2) \right) (v_1^2 - v_2^2)$$

$$= \frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.13)$$

Sehingga perbandingan daya mekanik turbin dan daya keluaran teoritiknya, yang biasa disebut sebagai faktor daya ( $C_p$ ) adalah:

$$C_p = \frac{P_T}{P_w} = \frac{\frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2)}{\frac{1}{2} \rho A v_1^3} \quad (2.14)$$

$C_p$  maksimum diperoleh apabila  $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$  yang menghasilkan nilai sebesar

0,593. Ini berarti, meski dengan asumsi ideal, dimana aliran dianggap tanpa gesekan dan daya keluaran dihitung dengan tanpa mempertimbangkan jenis turbin yang digunakan, daya maksimum yang bisa diperoleh dari energi angin adalah 0,593 yang artinya hanya sekitar 60% saja daya angin yang dapat dikonversi menjadi daya mekanik. Angka ini kemudian disebut faktor Betz. Faktor Betz menunjukkan nilai

maksimum semua alat konversi energi angin, tak ubahnya mesin Carnot untuk mesin-mesin termodinamika (Reksoatmodjo, 2004).

### 2.1.2. Tip Speed Ratio (TSR)

*Tip Speed Ratio* (TSR) merupakan perbandingan antara kecepatan putar turbin terhadap kecepatan angin. TSR dilambangkan dengan  $\lambda$  (Mittal, 2001).

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_w} \quad (2.15)$$

Dengan:  $\lambda = \text{tip speed ratio}$

$\omega =$  kecepatan sudut turbin (rad/s)

$R =$  jari-jari turbin (m)

$v_w =$  kecepatan angin (m/s)

Selain menggunakan persamaan (2.15), TSR juga dapat diperoleh dari persamaan:

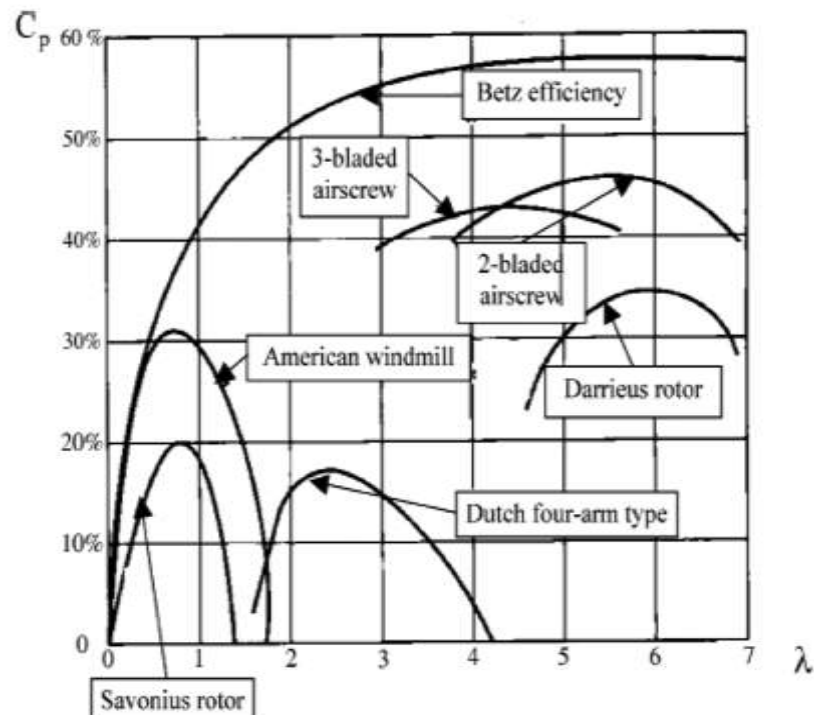
$$\lambda = \frac{\text{blade tip speed}}{v_w} \quad (2.16)$$

*Blade tip speed* merupakan kecepatan ujung *blade* atau rotor, dimana:

$$\text{blade tip speed} = \frac{\text{rotational speed (rpm)} \times \pi \times D}{60} \quad (2.17)$$

dengan  $D$  adalah diameter turbin (RWE npower renewables, 2009).

Karena setiap tipe turbin angin memiliki karakteristik yang berbeda-beda, maka faktor daya sebagai fungsi dari TSR juga berbeda sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 2.2 berikut:



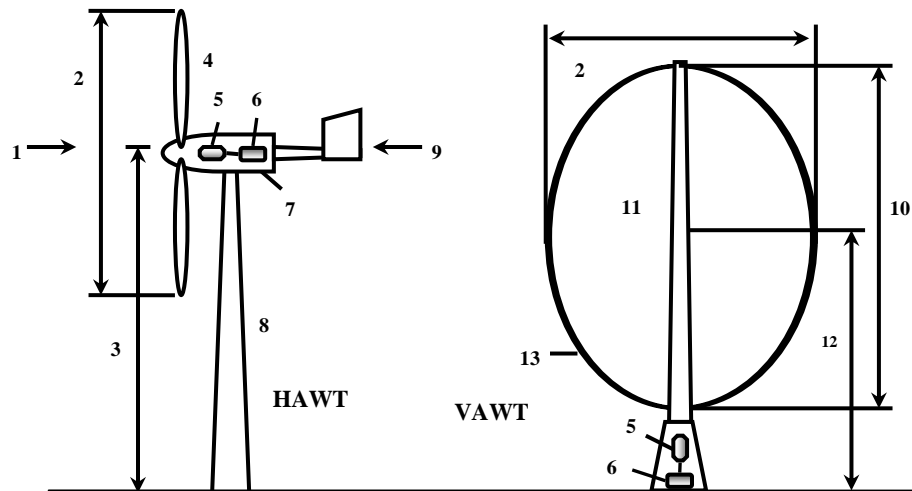
Gambar 2.2 Faktor daya sebagai fungsi TSR berbagai jenis turbin (Khan, 2009)

## 2.2. Turbin Angin

Turbin angin merupakan sebuah alat yang digunakan dalam sistem konversi energi angin (SKEA). Turbin angin berfungsi merubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik berupa putaran poros. Putaran poros tersebut kemudian digunakan untuk beberapa hal sesuai dengan kebutuhan seperti memutar dinamo atau generator untuk menghasilkan listrik atau menggerakkan pompa untuk pengairan.

Pemanfaatan energi angin telah dilakukan sejak lama. Pertama kali digunakan untuk menggerakkan perahu di sungai Nil sekitar 5000 SM. Penggunaan kincir sederhana telah dimulai sejak permulaan abad ke-7 dan tersebar diberbagai negara seperti Persia, Mesir, dan Cina dengan berbagai desain. Di Eropa, kincir angin mulai dikenal sekitar abad ke-11 dan berkembang pesat saat revolusi industri pada awal abad ke-19 (Ajao dan Mahamood, 2009). Desain turbin angin yang ada saat ini secara

umum terbagi menjadi dua, yaitu turbin angin sumbu mendatar (HAWT) dan sumbu vertikal (VAWT). Bagian-bagian turbin dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Keterangan gambar:

- |  |  |
|--|--|
| 1. Arah angin pada HAWT tipe <i>upwind</i> | 8. Tower pada HAWT                           |
| 2. Diameter rotor                          | 9. Arah angin pada HAWT tipe <i>downwind</i> |
| 3. <i>Hub height</i>                       | 10. Tinggi rotor                             |
| 4. Rotor <i>blade</i>                      | 11. Tower pada VAWT                          |
| 5. Gear box                                | 12. <i>Equator height</i>                    |
| 6. Generator                               | 13. <i>Fixed-pitch rotor blade</i>           |
| 7. <i>Nacelle</i>                          |  |

Gambar 2.3 Komponen turbin angin (Mittal, 2001)

Salah satu komponen utama dari turbin angin adalah rotor. Rotor ini berfungsi mengkonversi gerak linier angin menjadi gerak putar sudu turbin. Rotor dapat diklasifikasikan berdasarkan fungsi gaya aerodinamisnya dan berdasarkan bentuk atau konstruksi rancangan rotor. Untuk pengklasifikasian berdasarkan fungsi gaya aerodinamisnya, merujuk pada gaya utama yang menyebabkan rotor berputar.

Berdasarkan fungsi gaya aerodinamis, rotor terbagi menjadi dua, yaitu rotor tipe *drag* dan rotor tipe *lift*.

1. Rotor tipe *drag*, memanfaatkan efek gaya hambat atau *drag* sebagai gaya penggerak rotor.

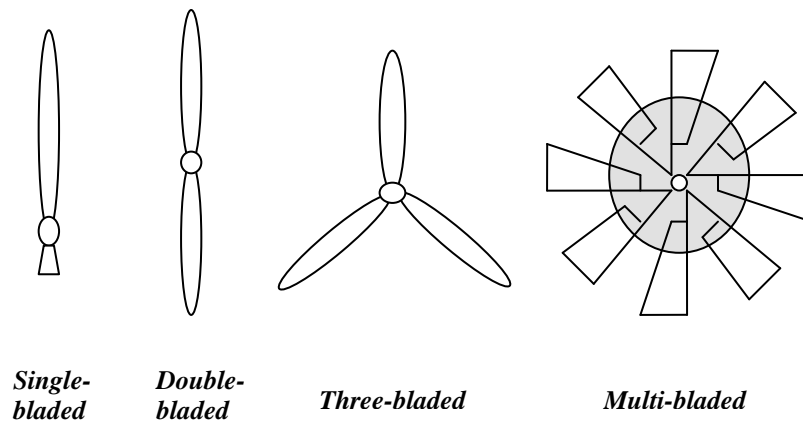


2. Rotor tipe *lift*, memanfaatkan efek gaya angkat sebagai gaya penggerak rotor. Gaya ini terjadi akibat angin yang melewati profil rotor.

Berdasarkan bentuk rotor, turbin angin dibagi menjadi dua tipe, yaitu turbin angin sumbu mendatar (*horizontal axis wind turbine*) dan turbin angin sumbu vertikal (*vertical axis wind turbine*) (Daryanto, 2007).

1. *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) merupakan turbin yang poros utamanya berputar menyesuaikan arah angin. Agar rotor dapat berputar dengan baik, arah angin harus sejajar dengan poros turbin dan tegak lurus terhadap arah putaran rotor. Biasanya turbin jenis ini memiliki *blade* berbentuk *airfoil* seperti bentuk sayap pada pesawat. Pada turbin ini, putaran rotor terjadi karena adanya gaya *lift* (gaya angkat) pada *blade* yang ditimbulkan oleh aliran angin. Turbin ini cocok digunakan pada tipe angin sedang dan tinggi, dan banyak digunakan sebagai pembangkit listrik skala besar.

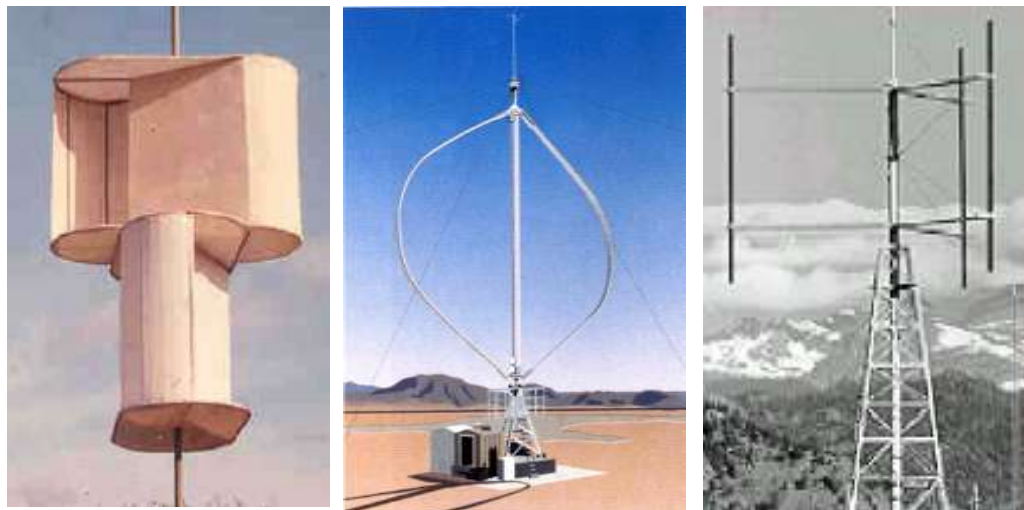
Jumlah blade pada HAWT bervariasi, mulai dari satu *blade*, dua *blade*, tiga *blade*, dan banyak *blade* (*multi blade*) yang penggunaannya disesuaikan dengan kebutuhan dan kondisi angin. Secara umum semakin banyak jumlah *blade*, semakin tinggi putaran turbin.



Gambar 2.4 Variasi jumlah blade pada HAWT (Daryanto, 2007)

Setiap desain rotor mempunyai kelebihan dan kekurangan. Kelebihan turbin jenis ini, yaitu memiliki efisiensi yang tinggi, dan *cut-in wind speed* rendah. Kekurangannya, yaitu turbin jenis ini memiliki desain yang lebih rumit karena rotor hanya dapat menangkap angin dari satu arah sehingga dibutuhkan pengarah angin selain itu penempatan dinamo atau generator berada di atas tower sehingga menambah beban tower.

2. *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) merupakan turbin angin sumbu tegak yang gerakan poros dan rotor sejajar dengan arah angin, sehingga rotor dapat berputar pada semua arah angin. 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*.



(a) Savonius Rotor

(b) Darrieus Rotor

(c) H Rotor

Gambar 2.5 Turbin angin sumbu tegak (Mittal, 2001)

Sama halnya seperti HAWT, VAWT juga mempunyai beberapa kelebihan dan kekurangan. Kelebihannya, yaitu memiliki torsi tinggi sehingga dapat berputar pada kecepatan angin rendah, dinamo atau generator dapat ditempatkan di bagian bawah turbin sehingga mempermudah perawatan, tidak bising, dan kerja turbin tidak dipengaruhi arah angin. Kekurangannya yaitu

kecepatan angin di bagian bawah sangat rendah sehingga apabila tidak memakai tower akan menghasilkan putaran yang rendah, dan efisiensi lebih rendah dibandingkan HAWT.

VAWT awalnya lebih berkembang untuk konversi energi mekanik, tetapi seiring dengan perkembangan desain, turbin tipe ini banyak digunakan untuk konversi energi listrik skala kecil.

### 2.2.1. Turbin Angin Savonius

Salah satu jenis turbin angin sumbu vertikal (VAWT) yang dapat digunakan pada angin dengan kecepatan rendah adalah turbin angin Savonius. Turbin ini ditemukan oleh sarjana Finlandia bernama Sigurd J. Savonius pada tahun 1922. Konstruksi turbin sangat sederhana, tersusun dari dua buah sudu setengah silinder. Pada perkembangannya turbin Savonius ini banyak mengalami perubahan bentuk rotor, seperti desain rotor yang berbentuk huruf L (lihat Gambar 2.6).

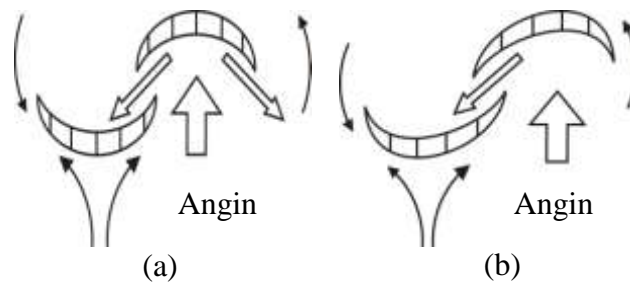


Gambar 2.6 Tipe rotor Savonius (Soelaiman, 2006)

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 2.7 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).



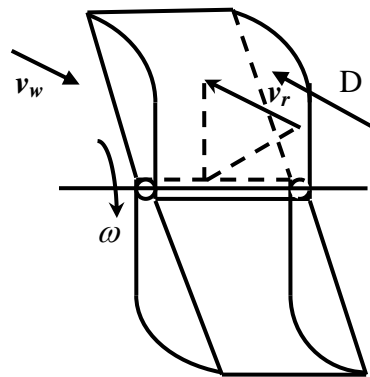
Gambar 2.7 (a) Rotor Savonius U, dan (b) Rotor Savonius L (Soelaiman, 2006)

### 2.2.2. Aerodinamika *Drag* pada Turbin Sumbu Tegak

Untuk sistem konversi energi angin, daya yang dihasilkan dapat berasal dari gaya *drag* atau gaya *lift*. Pada turbin yang memanfaatkan gaya *drag* (lihat Gambar 2.8), udara dengan kecepatan  $v_w$  akan menerpa permukaan rotor dengan luas  $A$ . Daya  $P$  yang diperoleh dari gaya *drag* dengan kecepatan  $v$  adalah  $P = Dv_r$ , dengan  $v_r = v_w - v$  yang menunjukkan kecepatan efektif pada area *drag*. Gaya *drag* ( $D$ ) dapat dirumuskan dengan:

$$D = \frac{1}{2} \rho C_D (v_w - v_r)^2 A \quad (2.18)$$

Dengan  $C_D$  merupakan koefisien hambat (tanpa dimensi). Gaya ini bekerja pada permukaan rotor. Komponen gaya aerodinamiknya sejajar dan searah dengan arah angin (Rosidin, 2007).



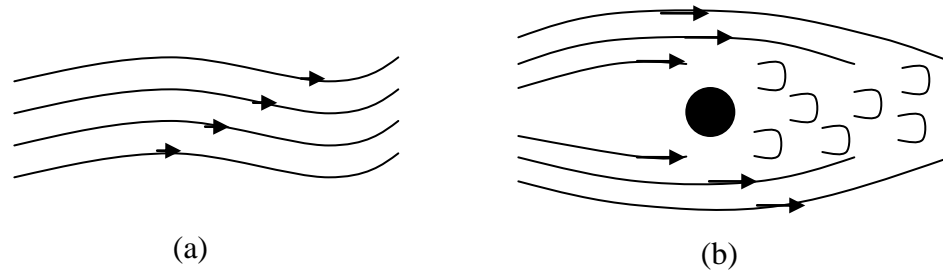
Gambar 2.8 Profil kecepatan untuk rotor tipe *drag* (Rosidin, 2007)

### 2.3. Mekanika Fluida

Mekanika fluida merupakan cabang dari mekanika terapan yang berkenaan dengan tingkah laku fluida dalam keadaan diam dan bergerak. Fluida merupakan zat-zat yang mampu mengalir dan menyesuaikan diri dengan bentuk wadahnya. Fluida dapat digolongkan ke dalam cairan dan gas. Perbedaan-perbedaan utama diantara keduanya, yaitu: (1) cairan bersifat inkompresibel, dan gas bersifat kompresibel, (2) cairan mengisi volume tertentu, sedangkan gas dengan massa tertentu mengembang sampai mengisi seluruh bagian wadahnya.

Secara umum fluida dibedakan menjadi dua bagian, yaitu fluida statik dan fluida dinamik. Fluida statik menyelidiki fluida dalam keadaan diam dimana berat fluida merupakan satu-satunya sifat yang penting. Sedangkan fluida dinamik menyelidiki fluida dalam keadaan bergerak (aliran fluida). Terdapat tiga konsep penting dalam fluida dinamik, yaitu: (1) prinsip kekentalan massa, menghasilkan persamaan kontinuitas, (2) prinsip energi kinetik, dan (3) prinsip momentum.

Ada dua jenis aliran fluida yaitu aliran laminar dan aliran turbulen. Dalam aliran laminar partikel-partikel fluidanya bergerak di sepanjang lintasan-lintasan lurus dan tidak saling bersilangan. Sedangkan pada aliran turbulen partikel-partikel bergerak secara serampangan kesemua arah (Giles, 1990).



Gambar 2.9 Aliran fluida: (a) Aliran laminar, (b) Aliran Turbulen (Tipler, 1998)

### 2.3.1. Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds menyatakan perbandingan gaya-gaya inersia terhadap gaya-gaya kekentalan (viskositas) (Giles, 1990). Bilangan *Reynolds* merupakan bilangan tak berdimensi. Dilihat dari kecepatan aliran, dikategorikan laminar bila aliran tersebut mempunyai bilangan Re kurang dari 2300, Untuk aliran transisi berada pada pada bilangan Re 2300 dan 4000 biasa juga disebut sebagai bilangan Reynolds kritis, sedangkan aliran turbulen mempunyai bilangan Re lebih dari 4000 (Tipler, 1998). Bilangan Reynolds untuk pipa-pipa bundar yang mengalir penuh adalah:

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} = \frac{vD}{\nu} \quad (2.19)$$

Dengan: Re = bilangan Reynolds (tak berdimensi)

$v$  = kecepatan aliran (m/s)

$D$  = diameter pipa (m)

$\rho$  = kerapatan massa fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$\mu$  = kekentalan mutlak (Pa.s)

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$  = kekentalan kinematik fluida ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

Untuk saluran tidak bundar, diameter pipa diganti diameter hidraulik ( $D_h$ ) (Olson, 1993).

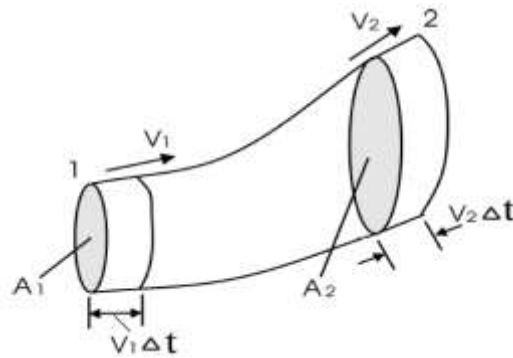
$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (2.20)$$

Dengan:  $A$  = luas potongan melintang aliran ( $\text{m}^2$ )

$P$  = perimeter (keliling lingkaran) (m)

### 2.3.1. Persamaan Kontinuitas

Massa fluida yang bergerak tidak berubah ketika mengalir. Fakta ini membimbing kita pada hubungan kuantitatif penting yang disebut dengan persamaan kontinuitas (*continuity equation*).



Gambar 2.10 Tabung alir dengan perubahan luas penampang (Young, 2002)

Perhatikan bagian tabung aliran antara dua penampang lintang stasioner dengan luas  $A_1$  dan  $A_2$  (lihat Gambar 2.10). Laju fluida pada bagian ini berturut-turut adalah  $v_1$  dan  $v_2$ . Apabila aliran terjadi dalam tabung dengan luas penampang yang berbeda, maka kelajuan fluida pada setiap titik pun akan berbeda. Misal kelajuan fluida saat di titik  $A_1$  adalah  $v_1$  dan saat fluida berada di titik  $A_2$  maka kelajuannya adalah  $v_2$ . Keadaan tersebut dapat diartikan ada sejumlah massa dari keadaan 1 berpindah ke keadaan 2 dengan waktu yang diperlukan sebesar  $\Delta t$ . Selama selang waktu yang singkat,  $dt$  fluida pada  $A_1$  bergerak sejauh  $v_1 dt$ , sehingga silinder fluida dengan tinggi  $v_1 dt$  dan volume  $dV_1 = A_1 v_1 dt$  mengalir ke dalam tabung melalui  $A_1$ . Selama selang yang sama, sebuah silinder dengan volume  $dV_2 = A_2 v_2 dt$  mengalir keluar dari tabung melalui  $A_2$ .

Ditinjau untuk kasus pada fluida inkompresibel; densitasnya sulit diubah, sehingga densitas  $\rho$  memiliki besar yang sama disetiap titik. Massa  $dm_1$  yang mengalir ke dalam tabung melalui  $A_1$  dalam waktu  $dt$  adalah  $dm_1 = \rho A_1 v_1 dt$ . Dengan cara yang sama, massa  $dm_2$  yang mengalir ke dalam tabung melalui  $A_2$  dalam waktu yang sama adalah  $dm_2 = \rho A_2 v_2 dt$ . Dalam aliran tunak (*steady flow*), yaitu pola aliran tidak berubah terhadap waktu, massa total di dalam tabung adalah konstan, sehingga:

$$\begin{aligned} dm_1 &= dm_2 \\ \rho A_1 v_1 dt &= \rho A_2 v_2 dt \\ A_1 v_1 &= A_2 v_2 \end{aligned} \tag{2.21}$$

Persamaan (2.21) merupakan persamaan kontinuitas pada fluida inkompresibel.

Persamaan (2.21) memperlihatkan bahwa laju aliran volume memiliki nilai yang sama pada setiap titik sepanjang tabung aliran. Ketika penampang tabung aliran mengecil, laju bertambah, dan sebaliknya. Bagian sungai yang dalam memiliki penampang yang lebih besar dan arus yang lebih pelan daripada bagian sungai yang dangkal (Young, 2002).

Untuk fluida kompresibel; densitasnya berubah, persamaan kontinuitasnya adalah:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \tag{2.22}$$

## 2.4. Rotasi Benda Tegar

Sebuah benda dikatakan melakukan gerakan rotasi jika semua titik pada benda bergerak mengitari poros benda tersebut, seperti gerakan kipas angin atau gerakan *compact disc*. Dalam dunia nyata, benda yang dikenai sebuah gaya dapat mengakibatkan benda tersebut berubah bentuk, dapat membuat benda meregang, ataupun memuntir. Selanjutnya, untuk benda-benda yang berputar pada sumbunya akan dianggap sebagai benda tegar. Benda tegar (*rigid body*) dapat didefinisikan sebagai benda yang memiliki bentuk dan ukuran yang definit dan tidak berubah.



Dalam gerak rotasi, benda mengalami pergeseran, kecepatan dan percepatan sudut, ini analogi dengan pergeseran, kecepatan dan percepatan linier pada gerak translasi. Titik-titik yang berbeda pada suatu benda tegar yang berotasi bergerak dengan jarak yang berbeda dalam selang waktu tertentu, tergantung dari seberapa jauh titik tersebut terhadap sumbu rotasi. Tetapi karena benda itu tegar, semua titik berotasi melalui sudut yang sama pada waktu yang sama. Kecepatan sudut akan positif jika benda berotasi ke arah penambahan sudut  $\theta$  (berlawanan dengan arah jarum jam) dan negatif jika benda berotasi ke arah pengurangan sudut  $\theta$  (searah dengan jarum jam).

Kecepatan sudut ( $\omega$ ) merupakan limit dari kecepatan sudut rata-rata ( $\omega_{rt}$ ) saat  $\Delta t$  mendekati nol. Kecepatan sudut rata-rata didefinisikan sebagai rasio perpindahan sudut  $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$  terhadap  $\Delta t$ :

$$\omega_{rt} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.23)$$

Dan ketika kecepatan suatu benda tegar mengalami perubahan, maka benda tersebut memiliki percepatan sudut ( $\alpha$ ):

$$\alpha = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt} \quad (2.24)$$

Jika sudut  $\theta$  dalam radian, satuan kecepatan sudut adalah radian per sekon (rad/s). Satuan lain yang juga sering digunakan adalah putaran (revolusi) per menit (rev/menit atau rpm). Terdapat dua konversi yang berguna yang menghubungkan rpm dengan rad/s. Karena 1 putaran =  $2\pi$  rad, maka:

$$1 \text{ rev/s} = 2\pi \text{ rad/s, dan } 1 \text{ rev/menit} = 1 \text{ rpm} = \frac{2\pi}{60} \text{ rad/s} \quad (2.25)$$

### 2.4.1. Momen Inersia

Momen inersia ( $I$ ) adalah ukuran kelembaman sebuah benda terhadap perubahan dalam gerak rotasi (kelembaman rotasi), sama halnya seperti massa  $m$  yang merupakan sifat kelembaman benda dalam gerak translasi. Bayangkan sebuah benda yang terdiri dari sejumlah partikel dengan massa  $m_1, m_2, m_3, \dots$  pada jarak  $r_1, r_2, r_3, \dots$  dari sumbu putar. Momen inersia benda tersebut adalah:

$$I = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + \dots = \sum_i m_i r_i^2 \quad (2.26)$$

Momen inersia hanya tergantung pada distribusi massa radial, tidak pada distribusinya sepanjang sumbu. Untuk sebuah benda yang sumbu rotasinya dan massa totalnya diketahui, semakin besar jarak sumbu terhadap partikel penyusun benda, semakin besar momen inersianya. Pada benda tegar, jarak  $r_i$  semuanya konstan dan  $I$  tidak tergantung pada bagaimana benda berotasi mengelilingi sumbu. Satuan SI untuk momen inersia adalah kilogram-meter<sup>2</sup> (kg.m<sup>2</sup>).

Benda tegar yang berotasi terdiri dari massa yang bergerak sehingga memiliki energi kinetik. Energi kinetik ini dapat dinyatakan dalam bentuk kecepatan sudut benda dan momen inersia.

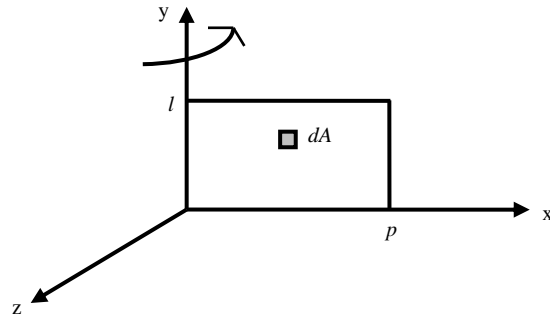
$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (2.27)$$

Persamaan (2.27) memberikan bentuk pengertian sederhana tentang momen inersia. Semakin besar momen inersia, semakin besar energi kinetik benda tegar yang berotasi dengan laju sudut  $\omega$  tertentu. Jadi, semakin besar momen inersia, semakin sulit benda tersebut melakukan gerak rotasi dari keadaan diam, serta semakin sulit berhenti dari keadaan berotasi (Young, 2002).

Momen inersia untuk baling-baling yang berputar pada sumbu  $y$  adalah:

$$I = \frac{1}{3} M p^2 \quad (2.28)$$

dengan  $M$  adalah massa baling-baling (kg),  $p$  adalah panjang (m), dan  $l$  adalah lebar baling-baling (m) (Guntoro, 2008).



Gambar 2.11 Momen inersia baling-baling pada sumbu vertikal (Guntoro, 2008)

#### 2.4.2. Torsi

Torsi merupakan ukuran kuantitatif dari kecenderungan sebuah gaya untuk menyebabkan atau mengubah gerak rotasi dari suatu benda. Torsi total yang bekerja pada suatu benda tegar, menentukan percepatan sudutnya dapat dihubungkan dengan persamaan:

$$\tau = I \alpha \quad (2.29)$$

Torsi pada masing-masing partikel disebabkan oleh gaya total yang bekerja pada partikel tersebut. Selain persamaan (2.29) torsi juga dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$\tau = \frac{v^2 R^3}{\lambda^2} \quad (2.30)$$

Pada turbin, besar torsi bergantung pada kecepatan angin dan sudu turbin (Anwar, 2008). Torsi dengan kecepatan sudut memiliki hubungan dengan daya turbin yang dirumuskan sebagai berikut:

$$P_T = \tau \omega \quad (2.31)$$

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1. Metodologi Penelitian**

Metode yang dilakukan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental. Kegiatan yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi perancangan turbin Savonius L Modifikasi yang terdiri dari delapan variasi sudut kelengkungan turbin dengan ketinggian yang sama, pembuatan turbin, set up alat, dan pengambilan data. Pengambilan data dilakukan dengan mengukur banyaknya putaran turbin (rotasi per menit, rpm) untuk setiap variasi sudut turbin pada berbagai variasi kecepatan angin.

#### **3.2. Tempat dan Waktu Penelitian**

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Bengkel Jurusan Fisika Fakultas MIPA dan di Sub Laboratorium Fisika UPT Laboratorium Pusat MIPA Universitas Sebelas Maret Surakarta dimulai dari bulan September 2009 sampai dengan bulan Mei 2010.

#### **3.3. Alat dan Bahan**

##### **3.3.1. Alat Penelitian**

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini, antara lain:

1. Anemometer testo 400 versi 1.2
2. *Stroboscope* digital model 87600-00
3. Kipas angin merek Denpoo model DBF-1122
4. Statif
5. Gunting aluminium
6. *Cutter*

##### **3.3.2. Bahan Penelitian**

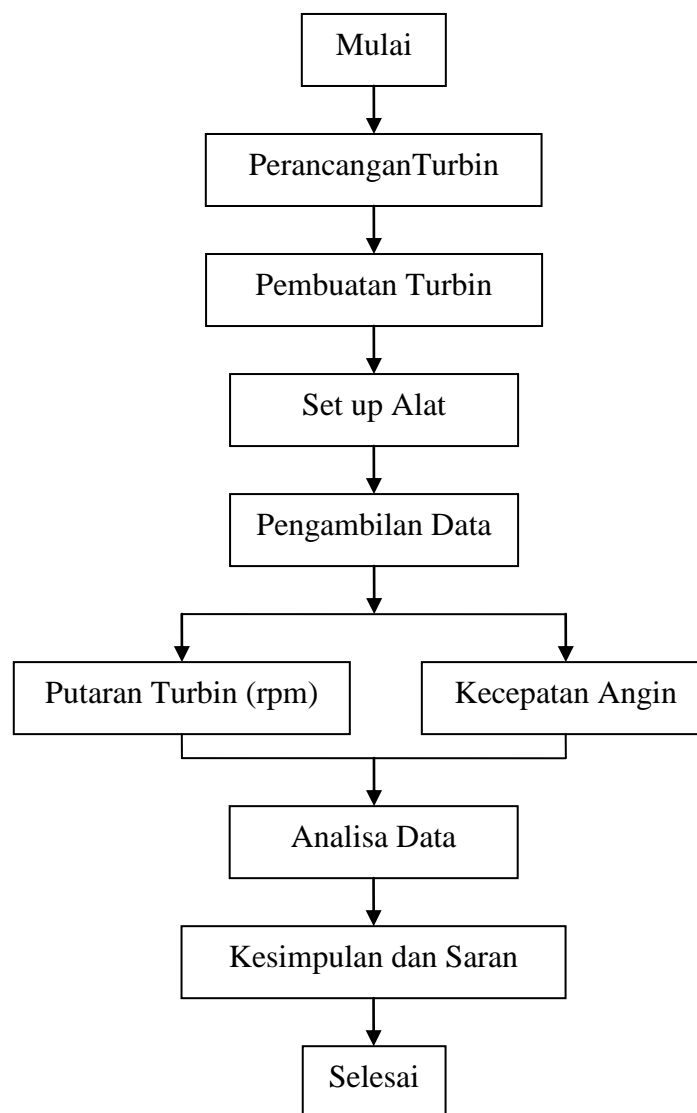
Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini, antara lain:

1. Kayu
2. *Bearing* tamiya

3. Pelat Aluminium dengan tebal 0,3 mm
4. Ruji sepeda
5. Lem alteco
6. Isolatip

### 3.4. Prosedur Penelitian

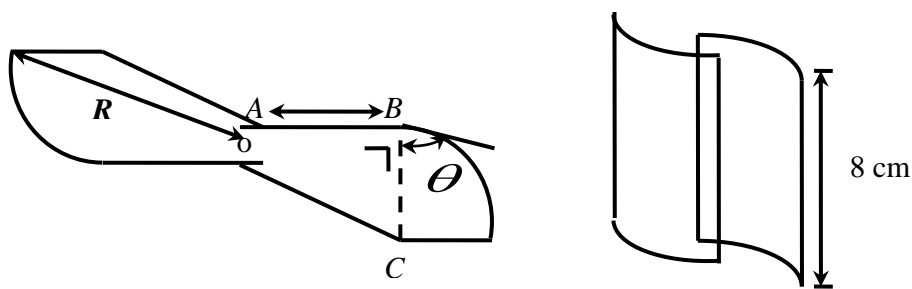
Prosedur penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

### 3.4.1. Perancangan Turbin

Tahap pertama dalam penelitian ini adalah melakukan perancangan turbin. Bentuk turbin Savonius L merupakan kombinasi dari profil datar dan lengkungan. Modifikasi terdapat pada variasi sudut kelengkungan. Sudut ini diambil dari ujung profil datar yang memiliki panjang  $AB$ , kemudian dari titik  $B$  ditarik garis tegak lurus terhadap sisi profil datar tersebut sebesar  $BC$ . Sudut diukur dari garis  $BC$  terhadap sisi lengkung sudu sebesar  $\theta$  (lihat Gambar 3.2).



Gambar 3.2 Modifikasi Rotor Turbin

Tinggi turbin adalah 8 cm, panjang  $AB$  sebesar 5 cm, dan panjang busur,  $r$  sebesar 6 cm. Nilai-nilai tersebut konstan untuk semua variasi sudut kelengkungan. Setiap penambahan sudut  $\theta$ , jari-jari rotor ( $R$ ) mengalami penambahan panjang. Penambahan panjang  $R$  setiap turbin Savonius L Modifikasi dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 3.1 Spesifikasi Rancangan Turbin Savonius L Modifikasi

	<b>Sudut Kelengkungan, <math>\theta</math></b>	<b><math>R</math> (cm)</b>
Turbin 1	$20^0$	7,3
Turbin 2	$30^0$	7,5
Turbin 3	$40^0$	8
Turbin 4	$45^0$	8,2
Turbin 5	$50^0$	8,5
Turbin 6	$60^0$	9,1
Turbin 7	$70^0$	9,3
Turbin 8	$80^0$	9,8

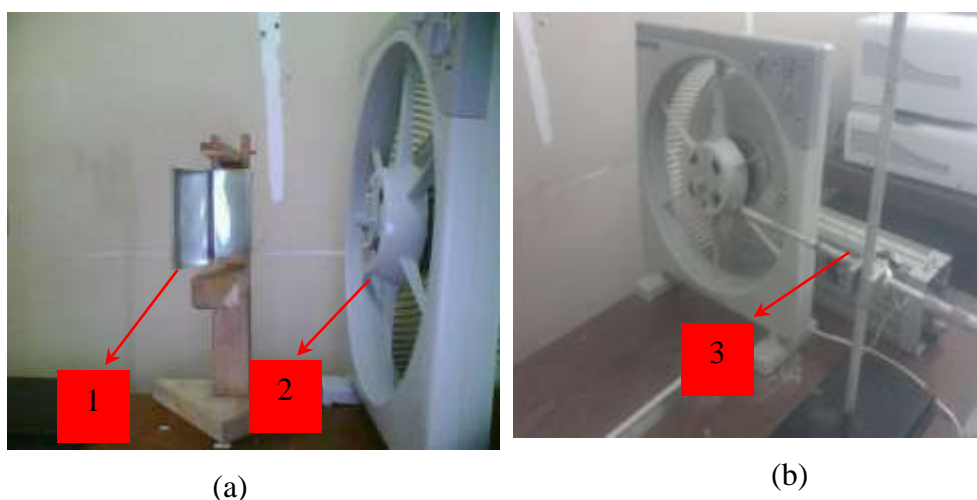
### 3.4.2. Pembuatan Turbin

Bahan turbin terbuat dari aluminium dengan ketebalan 0,3 mm, dengan panjang sudu sebesar 11 cm, dan tinggi 8 cm. Aluminium dipilih karena material ini tahan korosi dan mudah untuk dibentuk serta ringan. Setiap turbin membutuhkan dua buah *bearing* untuk bagian atas dan bawah turbin. Besi untuk poros turbin diambil dari ruji sepeda dan direkatkan dengan *bearing* agar posisi turbin terhadap ruji tidak berubah. Ruji yang digunakan memiliki panjang 10 cm dan diameter luar *bearing* sebesar 0,8 mm. Pemotongan aluminium dilakukan dengan gunting aluminium atau *cutter*, kemudian dibentuk sesuai dengan desain. Perekatan bagian-bagian sudu turbin menggunakan lem alteco dan isolatip. Selain itu dibuat juga penyangga turbin yang terbuat dari kayu.

### 3.4.3. Set up Alat

Setelah semua alat dan bahan sudah lengkap maka tahap selanjutnya adalah *set up* alat. Harus dipastikan bahwa seluruh bagian dapat bekerja dengan baik sesuai dengan fungsinya. Alat ukur yang digunakan seperti anemometer, dan *stroboscope* juga dipastikan dalam keadaan baik sehingga dapat digunakan dalam penelitian.

Berikut adalah skema alat yang digunakan dalam penelitian (Gambar 3.3)



Keterangan: 1. Turbin  
2. Kipas angin  
3. Anemometer

Gambar 3.3 Skema Alat Penelitian

#### **3.4.4. Pengambilan Data**

Pengambilan data terdiri dari pengukuran kecepatan angin dari sumber angin dengan menggunakan anemometer. Penempatan anemometer berada di antara sumber angin dan turbin. Pada saat pengukuran kecepatan angin, turbin tidak dipasang (lihat Gambar 3.3.b). Hal ini dilakukan agar kecepatan angin yang diukur anemometer sama dengan kecepatan angin yang menumbuk turbin. Pada penelitian ini pengambilan data dilakukan dengan tiga variasi kecepatan angin, yaitu 4,2 m/s, 4,6 m/s, dan 5,2 m/s. Setelah kecepatan angin ditentukan, kemudian diukur banyaknya rotasi per menit (rpm) dari turbin yang diujikan dengan menggunakan *stroboscope*.

#### **3.4.5. Analisa Data**

Dari pengambilan data diperoleh hubungan antara putaran turbin (rpm) terhadap kecepatan angin dari masing-masing variasi sudut turbin. Dari data yang diperoleh maka selanjutnya data dianalisis dengan acuan teori yang ada.

#### **3.4.6. Kesimpulan dan Saran**

Selanjutnya menyimpulkan hasil penelitian berdasarkan analisis yang telah dilakukan dan memberikan saran untuk perbaikan penelitian selanjutnya.



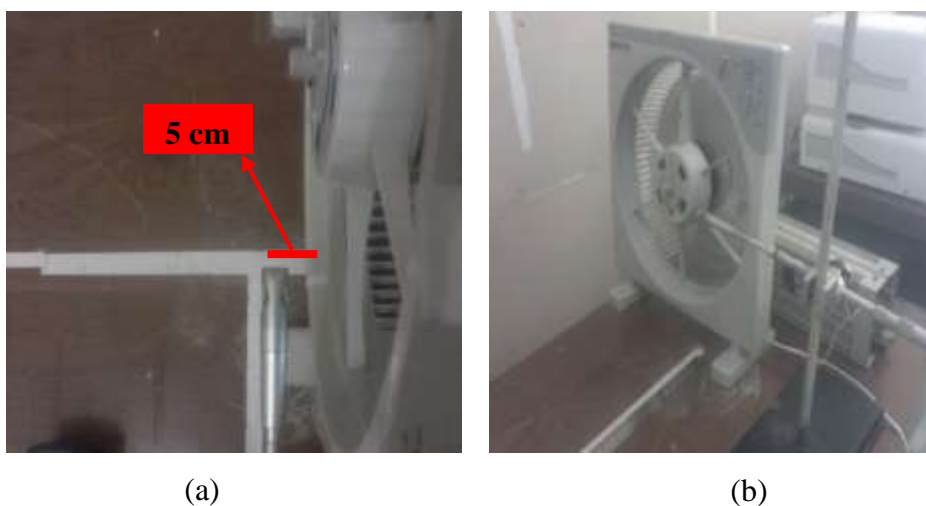
## BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Pengujian Karakteristik Turbin

Turbin Savonius L Modifikasi merupakan penyempurnaan dari desain turbin Savonius L. Pengujian karakteristik turbin ini terdiri dari pengukuran kecepatan angin dari sumber angin, dan pengukuran putaran turbin (rpm) pada masing-masing variasi sudut kelengkungan turbin dan variasi kecepatan angin.

Kecepatan angin diukur dengan menggunakan anemometer. Pengambilan data dilakukan dengan mengambil nilai rata-rata kecepatan angin dalam waktu 60 detik. Pengukuran ini diulang beberapa kali dan diambil nilai yang paling banyak muncul. Ketika pengambilan data, anemometer disangga dengan statif agar posisinya konstan terhadap sumber angin.

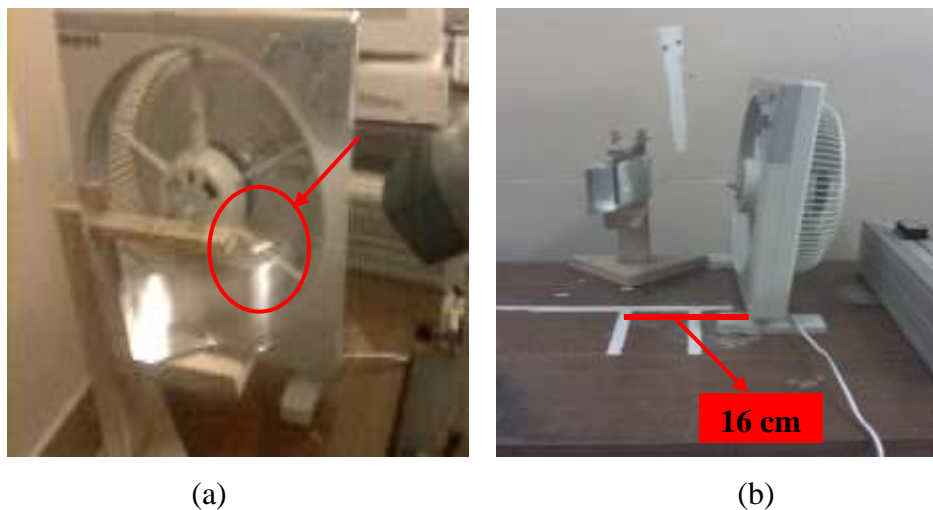
Pengukuran kecepatan angin dilakukan dengan tidak menyertakan turbin, hal ini bertujuan untuk mengetahui kecepatan awal angin sebelum menumbuk turbin. Apabila pengukuran kecepatan angin dilakukan bersamaan dengan pengukuran kecepatan putar turbin, hasil pengukuran akan sedikit berbeda karena putaran turbin akan mempengaruhi nilai kecepatan angin yang diukur oleh anemometer.



Gambar 4.1 Posisi anemometer terhadap sumber angin

Posisi anemometer berada pada jarak 5 cm di depan sumber angin (lihat Gambar 4.1.a). Jarak ini merupakan jarak maksimum jika ingin memperoleh kecepatan angin maksimum. Jika anemometer digeser menjauhi sumber angin, maka besarnya kecepatan angin yang terukur anemometer akan berkurang. Data kecepatan angin diperoleh sebanyak tiga variasi sesuai dengan variasi kecepatan angin pada sumber angin. Data yang terukur pada anemometer, yaitu sebesar 4,2 m/s, 4,6 m/s, dan 5,2 m/s. Hasil ini sesuai dengan data untuk kecepatan angin rendah yaitu berkisar 3 m/s hingga 5 m/s.

Pengukuran selanjutnya adalah pengukuran putaran turbin (rpm) terhadap variasi kecepatan angin. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan *stroboscope*. *Stroboscope* ini menggunakan sumber cahaya yang dapat disinkronisasi dengan setiap putaran benda. Pengukuran dilakukan secara manual, yaitu dengan cara memutar putaran pada *stroboscope* yang berfungsi mengatur pengulangan gerak sumber cahaya sehingga benda yang berputar sangat cepat terlihat tidak bergerak atau berpindah perlahan (lihat Gambar 4.2.a).



Gambar 4.2 (a) Pengukuran putaran turbin, (b) penempatan turbin

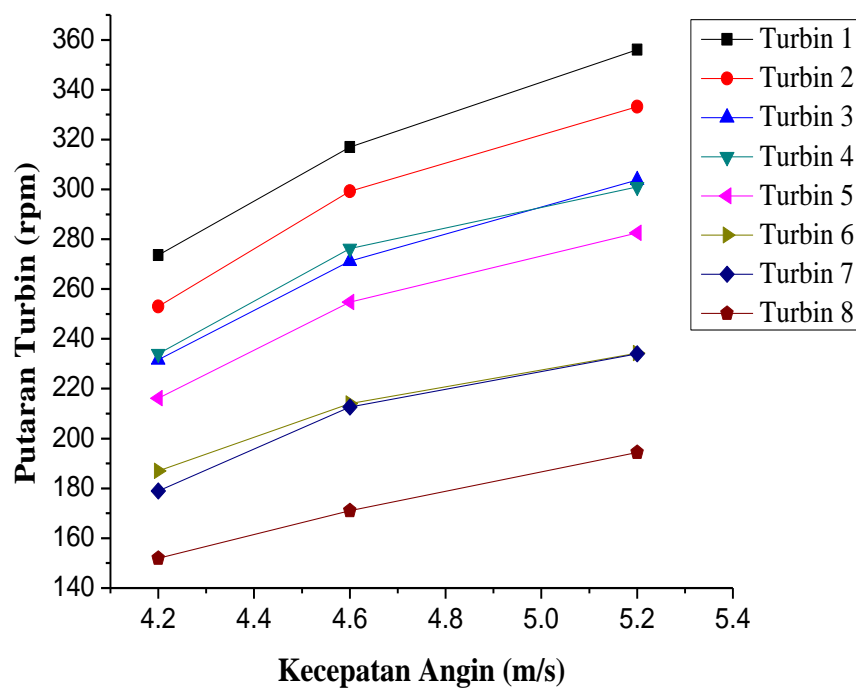
Sebelum pengukuran dilakukan, turbin diberi tanda terlebih dahulu, misalnya dengan menempelkan kertas putih pada permukaan turbin untuk mempermudah penentuan nilai rpm. Pada penelitian ini pengukuran dilakukan sebanyak lima kali pengulangan untuk setiap turbin kemudian diambil nilai rata-

ratanya (lihat Lampiran 1, Tabel 1.I). Ketika pengukuran rpm, turbin berada pada jarak yang konstan untuk setiap pengukuran, yaitu sebesar 16 cm dari sumber angin.

## 4.2. Hasil Penelitian

Data hasil penelitian dapat dilihat pada Lampiran 1, yaitu pada Tabel 1.I. Dari hasil tersebut dibuat grafik hubungan antara putaran turbin dengan kecepatan angin (lihat Gambar 4.3).

**Grafik Hubungan Putaran Turbin Terhadap Kecepatan Angin**



Gambar 4.3 Grafik hubungan putaran turbin terhadap kecepatan angin

### 4.2.1. Aerodinamika Turbin

Secara umum terdapat dua gaya yang bekerja pada turbin angin, yaitu gaya hambat (*drag*) dan gaya angkat (*lift*). Gaya yang bekerja pada turbin Savonius adalah gaya hambat, gaya ini sejajar dengan arah hembusan angin dan bekerja pada permukaan rotor. Untuk gaya angkat, bekerja tegak lurus dengan arah angin. Untuk turbin Savonius sudut serangnya (*angle of attack*) bernilai  $90^\circ$ . Sudut

serang ini merupakan sudut antara turbin dan arah angin. Dengan sudut serang  $90^\circ$ , gaya angkat akan bernilai nol dan gaya hambat akan maksimal.

Gambar 4.3 menunjukkan grafik hubungan antara putaran turbin terhadap kecepatan angin untuk setiap variasi sudut kelengkungan. Dilihat dari grafik di atas, Turbin 1 dengan  $\theta = 20^\circ$  mengalami putaran terbesar, yaitu sebanyak 273,6 rpm adalah dan Turbin 8 dengan  $\theta = 80^\circ$  mengalami putaran terkecil, yaitu sebanyak 152 rpm untuk kecepatan angin sebesar 4,2 m/s. Hal yang sama juga terjadi pada variasi kecepatan angin lainnya.

Jika dilihat dari ukuran turbin, Turbin 1 memiliki jari-jari paling kecil dibandingkan turbin lainnya, yaitu sebesar 7,3 cm, sehingga gaya hambatnya pun kecil. Jika dibandingkan dengan Turbin 8 dengan  $\theta = 80^\circ$  yang memiliki jari-jari sebesar 9,8 cm putaran turbin yang dihasilkan merupakan putaran yang paling rendah.

Dari penjelasan di atas, dapat diketahui bahwa penyebab dari perbedaan nilai rpm terdapat pada perbedaan dimensi turbin, dimana semakin besar sudut kelengkungan turbin, semakin besar pula jari-jari turbin. Spesifikasi rancangan turbin Savonius L Modifikasi dapat dilihat pada Tabel 3.1. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa setiap turbin mengalami penambahan panjang jari-jari sejalan dengan penambahan sudut kelengkungan. Penambahan panjang turbin bervariasi antara 0,2 cm sampai 0,6 cm.

Dengan adanya perubahan dimensi, gaya hambat yang bekerja pada turbin juga mengalami perubahan. Menurut Persamaan (2.18) besarnya gaya hambat dipengaruhi oleh luas permukaan turbin yang diterpa angin. Jadi, semakin besar jari-jari turbin, semakin besar pula luasan turbin yang bergesekan dengan udara sehingga menyebabkan gaya hambat semakin besar sehingga putaran turbin menjadi semakin berkurang. Selain luasan permukaan turbin, gaya hambat juga dipengaruhi oleh koefisien *drag* ( $C_D$ ).  $C_D$  memiliki nilai yang berbeda untuk setiap desain, tergantung dari bentuk geometri turbin.

Selain gaya hambat, besarnya daya angin yang berhembus juga mempengaruhi putaran turbin. Menurut Persamaan (2.4) besarnya daya angin

dipengaruhi oleh kecepatan angin dan luas permukaan turbin. Dari grafik di atas terlihat jelas bahwa semakin besar kecepatan angin, semakin besar pula putaran turbin.

Pada grafik terlihat ada beberapa turbin yang putarannya memiliki nilai yang sangat berdekatan, yaitu terjadi pada Turbin 3 dan Turbin 4, dan Turbin 6 dan Turbin 7. Untuk Turbin 3 dan Turbin 4, putaran Turbin 4 lebih besar dari Turbin 3 pada kecepatan angin sebesar 4,2 dan 4,6 m/s. Penyebabnya, yaitu karena besar jari-jari diantara kedua turbin tersebut tidak terlalu jauh, yaitu hanya selisih 0,2 cm, begitu juga dengan Turbin 6 dan Turbin 7.

#### **4.2.2. Tip Speed Ratio (TSR)**

*Tip Speed Ratio* (TSR) merupakan sebuah perbandingan antara kecepatan putar turbin terhadap kecepatan angin. Pada turbin Savonius nilai TSR tidak lebih dari 1 (lihat Gambar 2.2). Ini karena turbin Savonius hanya memanfaatkan gaya hambat, sehingga kecepatan putar turbin tidak mungkin lebih besar dari kecepatan angin. Berbeda dengan turbin yang memanfaatkan gaya angkat, nilai TSR-nya bernilai lebih dari 1, karena kecepatan putar turbin bisa melebihi kecepatan angin.

Nilai TSR dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (1.15) dan data perhitungan dapat dilihat pada Lampiran 1, Tabel 1.J. Dari data tersebut nilai TSR maksimum untuk setiap turbin terjadi ketika kecepatan angin sebesar 4,6 m/s. Pada kecepatan tersebut perbandingan antara kecepatan putar turbin Savonius L Modifikasi terhadap kecepatan angin bernilai maksimum. Walaupun bernilai maksimum, kecepatan putar turbin tidak melebihi kecepatan angin.

Nilai TSR dari suatu turbin berhubungan dengan efisiensi. Semakin besar TSR, semakin besar pula efisiensi turbin dengan nilai efisiensi maksimum adalah sebesar 60 % (faktor Betz). Turbin Savonius memiliki TSR yang rendah, yaitu bernilai kurang dari 1 sehingga efisiensi yang dihasilkan dari turbin ini juga rendah.

### 4.2.3. Torsi Turbin

Torsi menggambarkan usaha memutar atau melingkar dari suatu gaya. Nilai torsi dapat diketahui dengan menggunakan Persamaan (2.30) dan data perhitungan dapat dilihat pada Lampiran 1, Tabel 1.K. Dari data tersebut dapat dilihat bahwa nilai torsi semakin bertambah seiring dengan bertambahnya sudut kelengkungan turbin. Ini berarti semakin besar jari-jari turbin, semakin besar pula torsi, namun putaran yang dihasilkan turbin semakin kecil.

Secara umum untuk turbin tipe *vertikal axis* khususnya turbin Savonius memiliki nilai torsi yang lebih besar dibandingkan dengan turbin *horizontal axis*. Turbin ini mampu melakukan *self start* pada kecepatan angin relatif rendah. Dengan nilai torsi yang besar, turbin Savonius mampu berputar secara optimal walaupun dengan kecepatan angin yang rendah.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1. Kesimpulan**

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan:

1. Kecepatan putar terbesar dialami oleh Turbin 1 dengan  $\theta = 20^\circ$  dan putaran terkecil dialami oleh Turbin 8 dengan  $\theta = 80^\circ$  untuk setiap perubahan kecepatan angin.
2. Semakin besar sudut kelengkungan turbin, jari-jari turbin semakin besar, ini menyebabkan gaya hambat yang dialami turbin pun semakin besar sehingga kecepatan putar turbin berkurang.
3. Kecepatan putar turbin bertambah sebanding dengan penambahan kecepatan angin.
4. Nilai TSR maksimum untuk setiap turbin Savonius L Modifikasi terjadi ketika kecepatan angin sebesar 4,6 m/s.
5. Semakin besar jari-jari turbin, semakin besar pula torsinya, namun putaran yang dihasilkan turbin semakin kecil

#### **5.2. Saran**

Beberapa saran yang diperlukan untuk perbaikan penelitian selanjutnya adalah:

1. Menambah jumlah rotor agar turbin lebih mudah bergerak.
2. Menggunakan terowongan angin agar aliran angin menjadi lebih fokus.
3. Menambah variasi kecepatan angin agar karakteristik masing-masing turbin terlihat lebih jelas.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ajao, K.R., dan Adeniyi, J.S.O., 2009. *Comparison of Theoretical and Experimental Power output of Small 3-bladed Horizontal-axis Wind Turbine*. Journal of American Science Volume 5, No 4
- Ajao, K.R., dan Mahamood, M.R., 2009. *Wind Energy Conversion System: The Past, The Present And The Prospect*. Journal of American Science. Volume 5, No. 6, pp 17-22
- Anwar, M.S., 2008. *Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Angin Pada Stasiun Pengisian Accu Mobil Listrik*. Tugas Sarjana. Surabaya: ITS
- Culp, Archie W., 1991. *Prinsip-Prinsip Konversi Energi*. Jakarta: Erlangga. Terjemahan: *Principles of Energy Conversion*. 1979. McGraw-Hill, Ltd
- Daryanto, Y., 2007. *Kajian Potensi Angin Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu*. Balai PPTAGG - UPT-LAGG
- Dutta, Animesh. 2006. *Basics of Wind Technology*. Asian Institute of Technology Thailand. 6 Juli 2006
- Giles, Ranald V., 1990. *Mekanika Fluida dan Hidraulika (SI-Metrik) Edisi Kedua (Terjemahan)*. Jakarta: Erlangga.
- Guntoro, W., 2008. *Studi Pengaruh Panjang dan Jumlah Baling-Baling Terhadap Efisiensi Daya Listrik Pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin*. Bandung: ITB
- Kamal, Faizul M., 2008. *Aerodynamics Characteristics of A Stationary Five Bladed Vertical Axis Vane Wind Turbine*. Journal of Mechanical Engineering, Vol. ME39, No. 2, pp. 95-99
- Khan, N.I., Iqbal, M.T., Hinchey, Michael, dan Masek, Vlastimil. 2009. *Performance of Savonius Rotor As A Water Current Turbine*. Journal of Ocean Technology. Vol. 4, No. 2, pp. 71-83
- Mittal, Neeraj. 2001. *Investigation of Performance Characteristics of a Novel VAWT*. Thesis. UK: Departement of Mechanical Engineering University of Strathclyde
- Nakajima, M., Lio, S., dan Ikeda, T., 2008. *Performance of Double-step Savonius Rotor for Environmentally Friendly Hidroulic Turbine*. Journal of Fluid Science And Technology. Volume 3 No. 3, pp 410-419



- Nakajima, M., Lio, S., dan Ikeda, T., 2008. *Performance of Savonius Rotor for Environmentally Friendly Hidroulic Turbine*. Journal of Fluid Science And Technology. Volume 3 No. 3, pp 420-429
- Olson, Reuben M., dan Wright, Steven J., 1993. *Dasar-Dasar Mekanika Fluida Teknik Edisi Kelima (Terjemahan)*, Jakarta: Gramedia Pustaka Utama
- Reksoatmodjo, Tedjo Narsoyo. 2004. *Vertical Axis-Differential Drag Windmill*. Jurnal Teknik Mesin Volume 6, No 2, Oktober 2004: 65 – 70
- Rosidin, Nanang. 2007. *Perancangan, Pembuatan, dan Pengujian Prototipe SKEA Menggunakan Rotor Savonius dan Windside Untuk Penerangan Jalan Tol*. Bandung: ITB
- RWE npower renewables. 2009. *Wind Turbine Power Calculatios*. Di akses: 20 Februari 2010. Website: <http://www.rwe.com/web/cms/de/8/rwe/>
- Soelaiman, F., Tandian, Nathanael P., dan Rosidin, N., 2006. *Perancangan, Pembuatan dan Pengujian Prototipe SKEA Menggunakan Rotor Savonius dan Windside untuk Penerangan Jalan Tol*; Bandung. ITB
- Tipler, P.A., 1998, *Fisika untuk Sains dan Teknik–Jilid I (terjemahan)*, Jakarta: Erlangga
- Young, Hugh D, dan Freedman, R.A., 2002. *Fisika Universita. Jilid 1*. Edisi ke-10. Jakarta: Erlangga. Terjemahan: *University Physics*. Edisi ke-8. 2000. Addison Wesley Longman, Inc.