



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI KOMPARASI TEKNOLOGI TURBIN ANGIN DAN PEMETAAN  
TEKNOLOGI TURBIN ANGIN UNTUK WILAYAH INDONESIA**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**SETO RESPATI  
0806454954**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JULI 2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul:

### **STUDI KOMPARASI TEKNOLOGI TURBIN ANGIN DAN PEMETAAN TEKNOLOGI TURBIN ANGIN UNTUK WILAYAH INDONESIA**

Yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Skripsi ini merupakan bagian dari skripsi yang dikerjakan bersama dengan rekan saya, saudara **AKBAR RACHMAN (0806454595)**, **AGUS IRAWAN (0806454563)**, dan **LUKMANUL HAKIM (0806454834)**. Sehingga harap maklum jika ada beberapa bagian dari buku ini yang memiliki kesamaan.

Nama : Seto Respati

NPM : 0806454954

Tanda Tangan : 

Tanggal : 5 Juli 2012

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Seto Respati

NPM : 0806454954

Program Studi : Teknik Mesin

Judul Skripsi : Studi Komparasi Teknologi Turbin Angin dan Pemetaan  
Teknologi Turbin Angin untuk Wilayah Indonesia

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Warjito, M.Eng.



Penguji : Prof. Dr. Ir. Budiarmo, M.Eng.



Penguji : Prof. Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng.



Penguji : Dr. Ir. Ahmad Indra Siswantara



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 5 Juli 2012

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT, karena atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Banyak pihak yang telah membantu penulis sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini. Untuk itu penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu penulis dalam penyelesaian skripsi ini. Ucapan terima kasih penulis ucapkan kepada :

1. Dr. Ir. Warjito M.Eng, selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, waktu, pikiran, dan kesabarannya sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.
2. Orang tua dan keluarga yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan doa kepada penulis.
3. Akbar Rachman, Agus Irawan, dan Lukmanul Hakim selaku rekan satu tim penelitian yang telah banyak memberikan bantuan, saran, dan motivasinya dalam mengerjakan skripsi ini.
4. Para dosen Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia yang selama 4 tahun ini memberikan ilmu-ilmunya yang sangat bermanfaat.
5. Teman – teman Departemen Teknik Mesin 2008.

Penulis berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan pihak-pihak yang telah membantu. Akhir kata, penulis mengucapkan terima kasih dan semoga skripsi ini dapat membawa manfaat bagi kemajuan Indonesia, serta kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Depok, Juli 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Seto Respati

NPM : 0806454954

Program Studi : Teknik Mesin

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

demikian pengembalian ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**STUDI KOMPARASI TEKNOLOGI TURBIN ANGIN DAN PEMETAAN  
TEKNOLOGI TURBIN ANGIN UNTUK WILAYAH INDONESIA**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok (Universitas Indonesia)

Pada tanggal : 5 Juli 2012

Yang menyatakan



(Seto Respati)

## ABSTRAK

Nama : Seto Respati  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : Studi Komparasi Teknologi Turbin Angin dan Pemetaan  
Teknologi Turbin Angin untuk Wilayah Indonesia

Perkembangan teknologi turbin angin di dunia meningkat secara pesat. Dengan banyaknya teknologi tersebut, maka perlu adanya suatu penelitian untuk melakukan studi komparasi terhadap teknologi turbin angin. Dari studi komparasi tersebut, maka diharapkan dapat dilakukan pemetaan dan pemilihan teknologi turbin angin untuk wilayah Indonesia. Komparasi teknologi dalam penelitian ini menggunakan dua macam metode, yaitu dengan menghitung nilai  $C_p$  dan nilai daya per satuan panjang untuk masing-masing turbin angin. Setelah dilakukan komparasi, maka dilakukan pemetaan teknologi turbin angin untuk wilayah Indonesia dengan mempertimbangkan aspek-aspek dan hasil dari studi komparasi yang dilakukan. Dari studi komparasi yang dilakukan, maka dapat terlihat bahwa turbin angin dengan teknologi selubung diffuser merupakan teknologi yang memiliki keunggulan dalam berbagai aspek.

**Kata kunci** : turbin angin, pemetaan, teknologi, komparasi

## ***ABSTRACT***

Name : Seto Respati  
Study Program : Teknik Mesin  
Title : Comparative Study of Wind Turbine Technology and Mapping for Indonesia Region

The development of wind turbine technologies in the world has increased rapidly. With many of these technologies, it is necessary to make a research for a comparative study of wind turbine technology. From that comparative study, it is expected to make a mapping and selection of wind turbine technology for the Indonesian territory. There are two comparison methods using in this comparative study, which is by calculating the value of  $C_p$  and the power per unit length for each wind turbine. After doing the comparison, mapping of wind turbine technology was made by considering many aspects and the result of the comparative study. From the comparative study, it can be seen that a diffuser-shrouded wind turbine has advantages in many aspects.

**Key Words** : wind turbine, mapping, technology, comparison

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....</b>	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN.....</b>	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>iv</b>
<b>HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xiv</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Pembatasan Masalah .....	3
1.5 Sistematika Penulisan .....	4
<b>BAB 2 LANDASAN TEORI .....</b>	<b>6</b>
2.1 Energi Alternatif.....	6
2.1.1 Energi Alternatif, Baru, dan Terbarukan.....	6
2.1.2 Korelasi hubungan sumber daya energi angin dengan kebutuhan energi masa kini .....	7
2.1.3 Angin sebagai Sumber Daya Energi .....	10

2.2	Turbin Angin .....	11
2.2.1	Sejarah dan Perkembangan Turbin Angin .....	11
2.2.2	Dasar Perhitungan Turbin Angin .....	14
2.2.3	Teori Selubung Turbin Angin .....	18
2.2.4	Konstruksi Turbin Angin .....	23
2.2.5	Tipe-tipe Turbin Angin .....	25
2.2.6	Turbin Angin Skala Kecil .....	26
2.2.7	Turbin Angin di Indonesia .....	28
2.3	Kebijakan Pengembangan Energi Angin .....	28
2.3.1	Regulasi Terkait Pengembangan Energi Angin .....	28
2.3.2	Kebijakan Pengembangan Energi Angin .....	29
2.3.3	Implementasi Sistem PLTB di Indonesia .....	30
<b>BAB 3</b>	<b>METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>33</b>
3.1	Metode Penelitian.....	33
3.1.1	Peralatan Simulasi .....	33
3.1.2	Alur Kerangka Penelitian .....	34
3.2	Pengumpulan Data Sekunder.....	35
3.2.1	Data Potensi Angin .....	35
3.2.2	Data Teknologi Turbin Angin .....	35
3.2.2	Pemodelan Selubung Turbin Angin .....	36
3.3	Simulasi.....	37
3.3.1	Simulasi Selubung Jenis Diffuser .....	37
3.3.2	Simulasi Selubung Jenis Nozzle .....	38

<b>BAB 4 DATA DAN ANALISIS.....</b>	<b>39</b>
4.1 Pengolahan Data Teknologi Turbin Angin .....	39
4.2 Komparasi Turbin Angin dengan Perhitungan Nilai $C_p$ .....	43
4.3 Komparasi Turbin Angin dengan Perhitungan <i>Power per Unit Length</i> ....	49
4.4 Simulasi.....	52
4.4.1 Simulasi Selubung Diffuser .....	52
4.4.2 Simulasi Selubung Nozzle .....	56
4.4.3 Perbandingan Karakteristik Kecepatan Diffuser dan Nozzle.....	58
4.4.4 Perhitungan Daya Maksimum.....	59
4.5 Karakteristik Kerja Masing-masing Turbin Angin .....	60
4.5.1 Energy Ball/ Venturi .....	60
4.5.2 Swift Wind Turbine.....	61
4.5.3 Wind Tamer Turbine.....	62
4.5.4 Counter Rotating .....	63
4.5.5 Direct Drive (AWE-54900).....	63
4.5.6 Broadstar Wind System.....	64
4.5.7 O Connor Hush Turbine.....	65
4.5.8 Enflo Windtech .....	65
4.5.9 Sky Stream .....	66
4.5.10 Diffuser Augmented Wind Turbine (AWR Energy).....	66
4.5.11 Wind dancer .....	67
4.5.12 Eco Whisper Turbine .....	68
4.5.13 Wind Spire .....	68
4.5.14 Turby .....	69

4.5.15 Ropatec.....	70
4.5.16 Seahawk Vertical Axis.....	70
4.5.17 Turbin Angin LAGG.....	71
4.6 Pemetaan Teknologi Turbin Angin.....	72
4.6.1 Hal-hal yang Perlu Dipertimbangkan dalam Pemilihan Turbin Angin.....	72
4.6.2 Data Potensi Angin .....	73
4.6.3 Data Teknologi Turbin Angin.....	76
4.6.4 Hasil Pemetaan.....	77
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>79</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>81</b>
<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Perkembangan Teknologi Turbin Angin (waktu vs kapasitas) .....	11
Gambar 2.2 Kincir Angin Belanda .....	12
Gambar 2.3 NASA MOD-2 7,5 MW Wind Turbine .....	14
Gambar 2.4 Actuator disc Model dari Turbin Angin.....	15
Gambar 2.5 Hubungan Tekanan dan Kecepatan dalam Diffuser Kosong .....	19
Gambar 2.6 Hubungan kecepatan dan tekanan optimal dalam sebuah DAWT....	22
Gambar 2.7 Komponen-komponen Turbin Angin Sumbu Horizontal.....	24
Gambar 2.8 HAWT dan VAWT .....	25
Gambar 2.9 <i>Rooftop Wind Turbines</i> .....	27
Gambar 3.1 Model Selubung Turbin Angin .....	37
Gambar 3.2 Selubung Diffuser .....	37
Gambar 3.3 Selubung Nozzle .....	38
Gambar 4.1 Grafik Perbandingan Nilai Cut in dan Rated Wind Speed.....	43
Gambar 4.2 Grafik Perbandingan Nilai Cut in dan Rated Wind Speed untuk Turbin Angin Nasional.....	43
Gambar 4.3 Grafik Nilai $C_p$ Tiap Jenis Teknologi.....	46
Gambar 4.4 Multiple-Actuator Disc Model Turbin Angin .....	47
Gambar 4.5 Multiple-Actuator Disc Model untuk Infinite Rotor .....	47
Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Nilai $C_{p_{total}}$ .....	48
Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Power per Unit Length Tiap Jenis Turbin .....	52
Gambar 4.8 Konsep dan Geometri DAWT .....	53
Gambar 4.9 Distribusi Kecepatan di Dalam Selubung Diffuser .....	53
Gambar 4.10 Grafik Distribusi Kecepatan pada Centerline Diffuser .....	55

Gambar 4.11 Distribusi Kecepatan di Dalam Selubung Nozzle .....	56
Gambar 4.12 Grafik Distribusi Kecepatan di Dalam Selubung Nozzle.....	57
Gambar 4.13 Perbandingan Karakteristik Kecepatan Diffuser dan Nozzle.....	58
Gambar 4.14 Perbandingan Karakteristik Kecepatan Diffuser dan Nozzle pada Jurnal .....	59
Gambar 4.15 Turbin Angin Energy Ball di Daerah Pemukiman.....	61
Gambar 4.16 Swift Wind Turbine.....	61
Gambar 4.17 WindTamer Turbine .....	62
Gambar 4.18 Counter Rotating Wind Turbine.....	63
Gambar 4.19 AWE-54900 .....	64
Gambar 4.20 Broadstar Wind Turbine.....	65
Gambar 4.21 Hush Turbine.....	65
Gambar 4.22 Enflo Windtech .....	66
Gambar 4.23 Turbin Angin Sky Stream .....	66
Gambar 4.24 DAWT (AWR Energy) .....	67
Gambar 4.25 WindDancer Turbine.....	67
Gambar 4.26 Eco Whisper Turbine .....	68
Gambar 4.27 Turbin Angin Wind Spire.....	68
Gambar 4.28 Turby 3-bladed VAWT .....	69
Gambar 4.29 <i>Turby 3-bladed VAWT on top of a building</i> .....	69
Gambar 4.30 Hybrid Darrieus and Savonious Ropatec VAWT .....	70
Gambar 4.31 Seahawk Vertical Axis .....	71
Gambar 4.32 Turbin Angin LAGG.....	71
Gambar 4.33 Peta rupa bumi Indonesia berdasarkan kecepatan angin rata-rata...	75

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Realisasi dan Proyeksi Kebutuhan Energi Listrik di Indonesia 2008-2027.....	7
Tabel 2.2 Realisasi dan Proyeksi Pembangkitan Listrik per Jenis Sumber Energi Indonesia 2008-2018.....	7
Tabel 2.3 Potensi dan Implementasi Energi Terbarukan pada tahun 2007.....	8
Tabel 2.4 Target Kapasitas Terpasang Penyediaan Energi Baru dan Terbarukan per Jenis Energi Hingga Tahun 2025.....	8
Tabel 2.5 Tahap Pengembangan PLTB Hingga 2025.....	9
Tabel 3.1 Karakteristik Angin untuk Propinsi Aceh Tahun 2000-2007.....	35
Tabel 3.2 Turbin Angin Skala Kecil dan Menengah yang Dibuat oleh Badan Hukum Pemerintah.....	36
Tabel 4.1 Data dan Spesifikasi Teknologi Turbin Angin.....	39
Tabel 4.2 Data dan Spesifikasi Turbin Angin di Indonesia.....	42
Tabel 4.3 Nilai $C_p$ Tiap-tiap Jenis Teknologi.....	44
Tabel 4.4 Perbandingan Nilai <i>Power per Unit Length</i> untuk HAWT.....	50
Tabel 4.5 Perbandingan Nilai <i>Power per Unit Length</i> untuk VAWT.....	51
Tabel 4.6 Distribusi Kecepatan di Sepanjang Centerline Diffuser.....	54
Tabel 4.7 Distribusi Kecepatan di Sepanjang Centerline Nozzle.....	56
Tabel 4.8 Data Kecepatan Angin Tahun 2000-2007.....	74
Tabel 4.9 Pengelompokkan Wilayah Berdasarkan Tingkat Kecepatan.....	75
Tabel 4.10 Perbandingan Teknologi Turbin Angin.....	75
Tabel 4.11 Data Hasil Pemetaan Turbin Angin untuk Wilayah Indonesia.....	77

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Energi terbarukan telah banyak dikembangkan dan sangat gencar dibicarakan seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi dunia dan cadangan energi fosil yang terus menipis. Hal itu juga diperkuat dengan adanya dampak negatif terhadap lingkungan yang cukup memprihatinkan yang terjadi akibat penggunaan energi fosil tersebut. Oleh karena itu, dunia dituntut untuk menggunakan energi yang dapat dimanfaatkan secara terus-menerus, serta ramah lingkungan demi keberlangsungan hidup umat manusia.

Di Indonesia, cukup banyak sumber energi alternatif yang dapat dimanfaatkan diantaranya air, panas bumi, biomassa, surya, dan angin. Hal tersebut dapat menjadi suatu tantangan bagi kita untuk melakukan penelitian dan pengkajian untuk memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat. Salah satu sumber energi alternatif yang dapat dimanfaatkan dan dikembangkan yaitu energi angin. Energi angin merupakan energi yang bersih dan ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi CO<sub>2</sub> atau gas-gas lain yang dapat berperan dalam pemanasan global.

Sumber listrik tenaga angin merupakan salah satu dari banyak sumber energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan energi dunia yang terus meningkat. Energi angin memiliki potensi yang cukup besar untuk dimanfaatkan menjadi energi listrik di Indonesia. Energi angin tersebut dapat dimanfaatkan dengan menggunakan turbin angin sebagai pembangkit dayanya.

Dari data Blueprint Pengelolaan Energi Nasional yang dipublikasikan oleh Departemen ESDM RI, maka dapat dilihat bahwa Indonesia memiliki potensi energi angin yang cukup besar yaitu sekitar 9,29 GW, sedangkan baru sekitar 2 MW yang sudah terpasang atau dimanfaatkan. Hal ini menunjukkan bahwa masih

sedikit jumlah peneliti yang tertarik terhadap pengembangan teknologi turbin angin [1]. Prospek pengembangan terhadap teknologi ini masih tinggi.

Turbin angin adalah kincir angin yang digunakan untuk membangkitkan energi listrik. Pada awalnya, kincir angin digunakan untuk kebutuhan pertanian, yaitu untuk menggiling padi, keperluan irigasi, dan lain-lain. Alat ini banyak dibangun di negara Denmark, Belanda, dan negara-negara Eropa terutama di bagian utara karena kapasitas angin di area-area tersebut sangat besar [2].

Pada masa kini, turbin angin lebih banyak digunakan untuk mengakomodasi kebutuhan energi listrik, menggunakan sumber daya energi yang dapat diperbaharui yaitu angin. Meskipun pembangunan dan teknologi turbin angin saat ini belum dapat menyaingi performa pembangkit listrik konvensional, namun masih terdapat banyak hal yang bisa dikembangkan dari turbin angin, mulai dari desain turbin angin itu sendiri, hingga ke pemilihan lokasi yang tepat untuk penyerapan energi angin.

Dalam penelitian kali ini, turbin angin lebih disesuaikan dengan kondisi pemukiman. Pada umumnya, turbin angin yang diperuntukkan untuk sektor ini sama saja dengan turbin angin pada pembangkit skala besar, namun ada beberapa hal yang harus diperhatikan. Pada area instalasi turbin angin, terutama turbin angin dengan desain skala kecil, terdapat aturan (*rule of thumb*) di mana turbin angin harus berada pada posisi 9 meter lebih tinggi, dari bangunan apapun dalam radius 152 meter [3]. Selain itu, dalam turbin angin skala kecil juga harus diperhatikan faktor lingkungan, polusi dan kebisingan. Hal ini kemungkinan akan menjadi masalah mengingat padatnya persebaran penduduk di kota-kota besar terutama di kota Jakarta. Namun masih terbuka kemungkinan untuk pengembangan desain alternatif dari model turbin angin yang sudah ada saat ini.

Dari hal-hal yang sudah diuraikan sebelumnya, maka dapat dikatakan bahwa potensi sumber daya angin di Indonesia masih sangat menarik untuk dikembangkan, karena masih banyak potensinya yang belum dapat kita manfaatkan. Sumber energi ini tidak hanya dapat mengatasi kebutuhan energi

listrik secara menyeluruh, namun juga dapat digunakan dalam skala kecil, yaitu pada residensial area atau sektor perumahan.

Turbin angin skala kecil merupakan pilihan yang cukup tepat untuk solusi energi alternatif, yaitu pada area permukiman. Oleh karena itu, dalam penelitian kali ini, dilakukan analisis dan perhitungan mengenai pemetaan teknologi turbin angin untuk wilayah Indonesia dan bagaimana korelasinya dengan potensi sumber daya angin yang ada.

## **1.2. Perumusan Masalah**

Pada penelitian kali ini, dilakukan analisis terhadap jenis teknologi turbin angin yang dapat diaplikasikan pada skala kecil, yaitu pada area permukiman (perkotaan). Pemetaan dilakukan dengan mencocokkan karakteristik kerja teknologi turbin angin dengan potensi persebaran angin yang ada di wilayah Indonesia.

## **1.3. Tujuan Penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk:

- a) Melakukan studi komparasi terhadap jenis-jenis teknologi turbin angin yang ada di dunia
- b) Membuat peta teknologi turbin angin untuk wilayah Indonesia
- c) Mengetahui teknologi turbin angin yang sesuai dengan keadaan angin di tiap wilayah di Indonesia
- d) Mempelajari katakteristik teknologi selubung turbin angin dengan melakukan simulasi
- e) Memberikan kontribusi langsung mengenai pemanfaatan energi terbarukan

## **1.4. Pembatasan Masalah**

Asumsi dan batasan masalah dalam penelitian ini adalah :

- a) Data yang digunakan dalam analisis penelitian ini adalah data sekunder.
- b) Komparasi dilakukan dengan melihat nilai cut in & rated wind speed turbin angin, perhitungan nilai  $C_p$ , dan perhitungan power per unit length.
- c) Data potensi angin yang digunakan dalam pemetaan merupakan data rata-rata kecepatan angin dalam kurun waktu 2000-2007
- d) Simulasi yang dilakukan hanya untuk jenis teknologi selubung saja, yaitu teknologi selubung diffuser dan nozzle

### 1.5. Sistematika Penulisan

Penyusunan laporan penelitian akan memiliki struktur yang baik dan segala tujuan penulisan tercapai, dengan mengikuti sistematika penulisan sebagai berikut:

#### BAB I PENDAHULUAN

Bagian ini berisi tentang latar belakang yang melandasi penelitian, perumusan masalah, tujuan penulisan, pembatasan masalah, dan sistematika penulisan.

#### BAB II LANDASAN TEORI

Bab ini menjelaskan teori-teori yang mendasari penelitian ini. Dasar teori meliputi energi alternatif, angin sebagai salah satu sumber daya energi, teknologi turbin angin, dan kebijakan-kebijakan yang dikeluarkan pemerintah RI terkait masalah energi alternatif dan sumber daya angin.

#### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisikan tentang deskripsi alat penelitian yang digunakan, metode persiapan dan metode pengumpulan data yang dilakukan

#### BAB IV DATA DAN ANALISIS

Bab ini berisikan sebagian data sekunder yang didapat, yang meliputi data mengenai teknologi turbin angin, karakteristik kerja, dan perhitungan untuk melakukan komparasi terhadap jenis-jenis teknologi turbin angin. Selain itu juga dilakukan analisis terhadap tiap-tiap jenis teknologi dan ketercocokannya dengan potensi sumber daya angin di tiap wilayah Indonesia.

#### BAB V KESIMPULAN

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari hasil penelitian dan beberapa saran yang diberikan untuk perbaikan pada percobaan yang akan datang.

## **BAB 2**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1 Energi Alternatif**

##### **2.1.1 Energi alternatif, baru dan terbarukan**

Energi alternatif yaitu energi yang dapat digunakan sebagai pengganti energi yang berasal dari bahan bakar konvensional. Sedangkan definisi dari energi terbarukan yaitu energi yang berasal dari proses alam yang berkelanjutan dan senantiasa tersedia di alam sehingga tidak perlu khawatir akan kehabisan sumbernya. Energi alternatif dan terbarukan ini tentu saja sangat dibutuhkan di masa sekarang dimana bahan bakar konvensional akan semakin habis sedangkan kebutuhan energi dunia terus meningkat. Dengan semakin berkurangnya energi fosil, muncullah alternatif-alternatif untuk mencari pengganti energi fosil yang dinamakan energi alternatif atau energi terbarukan. Energi alternatif ini meliputi energi surya, energi panas bumi, energi air, energi pasang surut, dan salah satu di antaranya yaitu energi angin.

Energi angin memiliki potensi yang cukup besar untuk dimanfaatkan menjadi energi listrik di Indonesia. Banyak wilayah di Indonesia yang potensi energinya tinggi. Wilayah tersebut antara lain Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan, Pantai Selatan Jawa, dan Karimun Jawa. Pengembangan turbin angin dengan pembangunan ladang angin di wilayah tersebut pun juga sudah banyak dilakukan disana. Kendati demikian, dalam tugas akhir kita kali ini, pengembangan turbin angin lebih ditujukan atau diaplikasikan pada daerah pemukiman atau perumahan yang padat penduduk. Hal ini tentu saja menjadi suatu tantangan yang menarik karena dengan adanya pemanfaatan energi tersebut maka dapat membuat beban listrik yang harus ditanggung oleh PLN dan pemerintah menjadi berkurang.

### 2.1.2 Korelasi hubungan sumber daya energi angin dengan kebutuhan energi masa kini

Tabel 2.1. Realisasi dan Proyeksi Kebutuhan Energi Listrik di Indonesia 2008-2027 [4]

Tahun	2008	2013	2018	2023	2027
<b>Jawa-Madura-Bali (TWh)</b>	112	176	282	458	684
<b>Rumah tangga</b>	42	77	140	254	406
<b>Komersial</b>	19	35	60	100	147
<b>Industri</b>	44	53	63	73	82
<b>Publik</b>	6	11	19	32	49
<b>Luar Jawa-Madura-Bali (TWh)</b>	28	41	61	91	129
<b>Rumah tangga</b>	14	20	28	40	53
<b>Komersial</b>	5	8	13	23	38
<b>Industri</b>	6	9	13	19	27
<b>Publik</b>	3	4	6	9	13
<b>Indonesia (TWh)</b>	140	217	342	549	813
<b>Rumah tangga</b>	57	97	168	293	459
<b>Komersial</b>	24	43	73	123	185
<b>Industri</b>	50	62	76	92	108
<b>Publik</b>	9	15	25	41	61

Sumber : Departemen ESDM 2008

Dari tabel di atas, dapat kita lihat bahwa kebutuhan listrik pada tahun 2008 untuk seluruh wilayah Indonesia mencapai 140 TWh, dan naik 55% untuk lima tahun berikutnya hingga 2013. Hal ini menunjukkan bahwa secara pasti, dalam selang waktu 5 tahun ke depan, Indonesia akan terus mengalami peningkatan kebutuhan energi listrik, setidaknya minimal 20% dari periode 5 tahun sebelumnya.

Tabel 2.2. Realisasi dan Proyeksi Pembangkitan Listrik per Jenis Sumber Energi di Indonesia 2008-2018 [5]

Tahun	BBM	Gas	LNG	Batubara	Hydro	PS	PLTP	Jumlah
<b>2008</b>	36,618	25,790		66,088	11,020		8,105	147,621
<b>2009</b>	29,461	32,538		75,526	10,827		8,526	156,878
<b>2010</b>	8,115	36,736		108,029	12,251		8,687	173,818
<b>2011</b>	4,327	35,590		127,235	13,113		11,206	191,471
<b>2012</b>	3,051	39,502		136,814	14,808		16,945	211,120

<b>2013</b>	2,340	45,327		148,173	14,911		21,847	232,598
<b>2014</b>	2,706	45,063		163,799	14,952	862	27,971	255,353
<b>2015</b>	3,229	45,931	1,986	181,974	16,196	841	29,440	279,547
<b>2016</b>	3,712	49,895	4,832	196,174	19,623	772	31,048	306,056
<b>2017</b>	4,543	50,673	7,443	212,513	20,871	1,411	35,972	333,426
<b>2018</b>	5,554	54,828	8,544	229,370	20,919	2,304	43,283	364,802

Sumber : PLN 2008

Berikutnya pada tabel 2, ditunjukkan perihal realisasi dan proyeksi pembangkitan listrik di Indonesia dalam GWh, periode 2008-2018. Seperti pada tabel proyeksi kebutuhan energi listrik sebelumnya, terdapat peningkatan produksi listrik dalam periode 10 tahun secara keseluruhan, walaupun belum mencukupi 100% dari proyeksi kebutuhan energi listrik di Indonesia.

Tabel 2.3. Potensi dan Implementasi Energi Terbarukan pada tahun 2007 [4]

Jenis energi baru terbarukan	Potensi	Implementasi	Persentase Implementasi
<b>Energi Air (Skala besar dan kecil)</b>	75670 MW	4200 MW	5,55 %
<b>Panas bumi</b>	27000 MW	1052 MW	3,90 %
<b>Mini/ mikrohidro</b>	500 MW	210 MW	42 %
<b>Biomassa</b>	49810 MW	445 MW	0,89 %
<b>BBN</b>		133,2 kiloliter	
<b>Energi Surya</b>	4,8 kWh/m <sup>2</sup> /hari	12 MW	
<b>Energi Angin</b>	3,6 m/s (9290 MW)	2 MW	0,02%

Sumber : Departemen ESDM 2008

Tabel 2.4. Target Kapasitas Terpasang Penyediaan Energi Baru dan Terbarukan per Jenis Energi hingga tahun 2025 [4]

Jenis Energi	Unit	2007	2010	2015	2020	2025	Potensi
<b>BBN</b>							
<b>Biodiesel</b>	KL	133	482.000	1.700.000	5.784.000	14.819.000	
<b>Bioetanol</b>	KL		296.000	1.112.000	3.624.000	9.106.000	
<b>Minyak</b>	KL		208.000	1.016.000	2.644.000	5.901.500	
<b>Biomassa</b>	MW	445	500	590	710	870	49.810
<b>Panas bumi</b>	MW	1.052	1.260	4.156	7.788	12.332	27.000

<b>Angin</b>	MW	2	4	40	128	256	9.290
<b>Surya</b>	MW	12	25	75	324	580	
<b>PLTA kecil</b>	MW	210	245	417	760	1.425	
<b>PLTA</b>	MW	4.200	4.380	6.069	8.940	10.940	76.170

Sumber : Departemen ESDM 2008

Dari tabel nomor 3 di atas, dapat kita lihat perbandingan antara potensi energi dan implementasinya di Indonesia, pada tahun 2007. Untuk energi angin sendiri, dari 9,290 MW energi listrik yang dapat dibangkitkan, hanya 2 MW yang telah diimplementasikan; sekitar 0.02 % dari keseluruhan potensi angin yang bisa digunakan. Hal ini menunjukkan masih banyaknya potensi sumber energi terbarukan yang masih perlu dieksploitasi dan dikembangkan. Pada tabel nomor 4, diperkirakan hingga tahun 2025, baru 256 MW energi listrik yang dihasilkan dari konversi energi angin.

Tabel 2.5. Tahap Pengembangan PLTB hingga 2025 [4]

	<b>2007-2015</b>	<b>2015-2020</b>	<b>2020-2025</b>
<b>Pasar</b>	19 MW on grid; 19 MW off grid	44 MW on grid; 44 MW off grid	64 MW on grid; 64 MW off grid
<b>Investasi dan harga</b>	190 juta dolar; 5 ribu dolar/kW; 0,5 dolar/ kWh	352 juta dolar; 4 ribu dolar/kW; 0,4 dolar/ kWh	384 juta dolar; 3 ribu dolar/kW; 0,3 dolar/ kWh
<b>Produk</b>	PLTB skala s.d. 300 kW	PLTB skala s.d. 750 kW	PLTB skala s.d. > 1 MW
<b>Teknologi</b>	PLTB skala kecil, kandungan lokal tinggi	PLTB skala menengah, kandungan lokal tinggi	PLTB skala besar, kandungan lokal tinggi
<b>Litbang</b>	Generator magnet permanen, putaran rendah, advanced airfoil	Struktur ringan dan kuat, sistem kontrol	Efisiensi tinggi

Sumber : Departemen ESDM 2008

Tabel 2.6. Tahap Pengembangan PLTB hingga 2025 [4]

Tahun	Satuan	2007	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2020	2025
<b>Kapasitas</b>	MW	2	4	11	18	26	33	40	128	256
<b>Produksi</b>	GWh	5	11	29	48	67	86	105	336	673
<b>Investasi</b>	juta dolar	10	20	56	92	128	164	200	512	768
<b>Biaya Produksi</b>	juta dolar	3	5	15	24	34	43	53	135	202
<b>Pengurangan Emisi</b>	ton CO <sub>2</sub>	1,57 4	3,14 8	8,81 4	14,48 1	20,14 7	25,81 4	31,48 0	100,73 6	201,47 2

Sumber : Departemen ESDM 2008

Dari kedua tabel berikutnya, yaitu tabel 5 dan tabel 6, ditunjukkan bahwa tahap pengembangan energi baru terbarukan oleh pemerintah. Untuk energi angin, hingga tahun 2015 diharapkan terpasang 19 MW, dengan investasi 190 juta dolar, dengan tarif hingga 0.5 dolar/kWh. Pengurangan emisi hingga tahun 2015 dapat mencapai 31,480 ton CO<sub>2</sub>.

### 2.1.3 Angin Sebagai Sumber Daya Energi

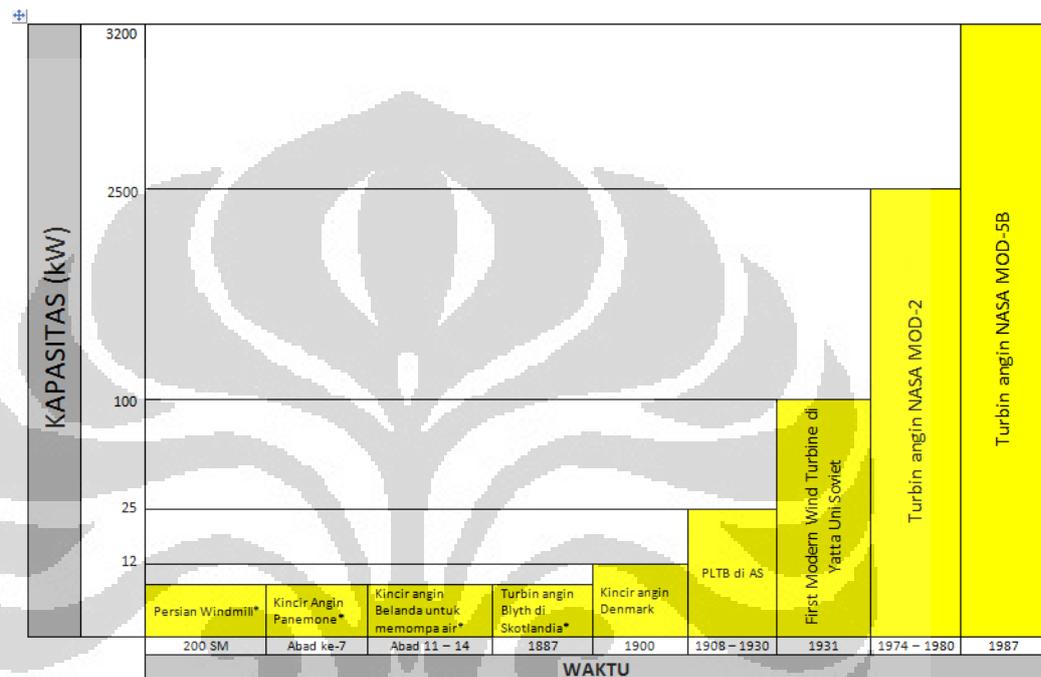
Energi angin adalah aliran angin yang timbul akibat adanya perbedaan suhu antara dua tempat dengan kecepatan tertentu. Udara yang panas di suatu tempat di permukaan bumi menjadi lebih ringan dan naik ke atas. Untuk mengisi kekosongan udara di tempat tersebut, maka udara yang lebih dingin di tempat lain akan bergerak ke tempat yang panas, sehingga terjadilah arus/pergerakan udara/angin.

Energi yang terkandung pada angin adalah energi kinetik yang dapat dikonversikan menjadi energi mekanik hingga energi listrik dengan menggunakan sebuah turbin angin; yang kemudian dapat digunakan untuk menggerakkan pompa air, menggiling padi, menggergaji kayu, hingga dapat membangkitkan energi listrik yang disebut dengan Sistem Konversi Energi Angin (SKEA).

## 2.2 Turbin Angin

### 2.2.1 Sejarah dan Perkembangan Turbin Angin

Merujuk kepada referensi-referensi yang didapatkan [6, 7, 9, 10, 11, dan 12] secara garis besar, perkembangan turbin angin apabila dilihat berdasarkan waktu dan kapasitas dapat dilihat pada grafik di bawah ini :



Ket: \*Data tidak tersedia (N/A)

Gambar 2.1. Perkembangan teknologi turbin angin (waktu vs kapasitas)

Seperti yang terlihat, kincir angin pertama digunakan di Persia, yang saat ini dikenal dengan negara Iran, sejak 200 tahun sebelum masehi. Kincir angin ini dikenal dengan nama “Panemone”. Panemone adalah kincir angin poros vertikal, yang memiliki poros penggerak vertikal yang panjang dengan blade yang berbentuk persegi panjang [6]. Kincir angin ini digunakan untuk mengolah dan menggiling gandum atau memompa air, dan juga digunakan dalam industri tebu [6]. Kincir angin muncul di Eropa pertama kali pada abad pertengahan. Catatan sejarah pertama penggunaannya yaitu di Inggris pada abad 11 dan 12. Pada abad ke-14, Belanda mulai menggunakan kincir angin untuk memompa air dan mengeringkan wilayah mereka [7]. Kincir angin yang mula-mula muncul di Eropa Utara semuanya memiliki sumbu horizontal. Kincir angin ini digunakan untuk

hampir semua tugas mekanis seperti memompa air, mengolah gandum, menggergaji kayu, dan untuk menggerakkan alat-alat perkakas [7].



Gambar 2.2. Kincir Angin Belanda [8]

Listrik pertama yang dihasilkan oleh turbin angin adalah mesin pengisian baterai yang dipasang pada Juli 1887 oleh James Blyth (Skotlandia) untuk menerangi rumahnya selama liburan di Marykirk, Skotlandia. Beberapa bulan kemudian, seorang penemu Amerika bernama Charles F. Brush membangun turbin angin pertama yang secara otomatis dioperasikan untuk produksi listrik di Cleveland, Ohio [9]. Meskipun turbin Blyth dianggap tidak ekonomis di Inggris namun pembangkit listrik dengan menggunakan turbin angin lebih hemat biaya diaplikasikan di negara-negara yang populasinya tersebar luas.

Di Denmark pada tahun 1900, ada sekitar 2500 kincir angin untuk peralatan mekanis seperti pompa, menghasilkan daya puncak gabungan yang diperkirakan dapat mencapai sekitar 30 MW [10]. Mesin terbesar berada pada menara setinggi 24 meter dengan empat bilah rotor yang diameternya mencapai 23 meter. Sejak 1908, ada 72 generator listrik tenaga angin yang beroperasi di Amerika Serikat dari kapasitas 5 kW sampai 25 kW. Selama masa perang dunia pertama, Amerika memproduksi 100.000 kincir angin pertanian setiap tahun, terutama untuk memompa air. Pada 1930, generator listrik tenaga angin sangat umum digunakan di pertanian, terutama di Amerika Serikat dimana instalasi sistem distribusi listrik belum dilakukan pada daerah-daerah terpencil [11].

Angin terus menjadi sumber energi utama di Eropa pada periode sesaat sebelum revolusi industri, namun mulai surut penggunaannya setelah itu. Alasan menurunnya penggunaan energi angin ini terutama disebabkan karena sifatnya yang *non-dispatchability* dan *non-transportability*-nya. Sumber energi batu bara memiliki keuntungan yang angin tidak miliki. Batubara dapat diangkut kemanapun di tempat yang dibutuhkan dan digunakan kapanpun ia inginkan. Ketika batubara digunakan untuk bahan bakar mesin uap, output dari mesin dapat disesuaikan dengan beban. Sumber energi air, yang memiliki kemiripan dengan energi angin tidak serta merta bernasib sama seperti sumber energi angin. Hal ini karena sumber daya air, sampai batas tertentu dapat dipindahkan (melalui kanal) dan sifatnya *dispatchable* (dengan menggunakan waduk sebagai penampungan sementara).

Turbin angin modern pertama dibangun di Yalta, Uni Soviet pada tahun 1931. Turbin angin ini memiliki kapasitas 100 kW dengan tinggi menara 30 meter, dan terhubung ke sistem distribusi 6,3 kV [12]. Turbin angin modern lain dengan kapasitas besar dibangun di Vermont. Turbin ini hanya mampu beroperasi selama 1100 jam sebelum mengalami kegagalan mekanis. Turbin ini tidak diperbaiki karena kekurangan material dan bahan selama perang.

Dari tahun 1974 sampai pertengahan tahun 1980, pemerintah Amerika Serikat bekerja sama dengan industri untuk membangun dan memajukan teknologi turbin angin skala besar untuk keperluan komersial. Turbin angin NASA dikembangkan untuk menciptakan industri turbin angin skala besar yang didanai oleh Departemen Energi AS. Program penelitian dan pengembangan ini memelopori banyak teknologi turbin angin dalam skala multi-megawatt. Turbin angin besar yang dikembangkan dalam usaha ini masuk dalam beberapa rekor dunia untuk diameter dan output dayanya. Salah satu diantaranya adalah MOD-2 yang menghasilkan 7,5 MW listrik pada tahun 1981. Turbin angin telah banyak berkembang selama 35 tahun terakhir, lebih dapat diandalkan, lebih hemat biaya, dan lebih tenang ketika beroperasi [11].



Gambar 2.3. NASA MOD-2 7,5MW Wind Turbine [13]

Saat ini turbin angin lebih banyak digunakan untuk mengakomodasi kebutuhan listrik masyarakat, dengan menggunakan prinsip konversi energi dan menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui yaitu angin. Walaupun sampai saat ini pembangunan turbin angin masih belum dapat menyaingi pembangkit listrik konvensional seperti PLTD, PLTU, dan lain lain, turbin angin masih dikembangkan oleh para ilmuwan karena dalam waktu dekat manusia akan dihadapkan dengan masalah kurangnya sumber daya alam tak terbarui seperti batubara dan minyak bumi sebagai bahan dasar untuk membangkitkan listrik.

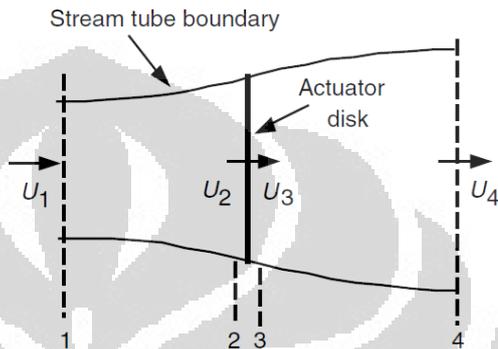
### 2.2.2 Dasar Perhitungan Turbin Angin

Teori tentang perhitungan suatu turbin angin pertama kali dikenalkan oleh Betz (1926). Betz menggunakan sebuah model sederhana yang dapat digunakan untuk menentukan kekuatan dari sebuah rotor turbin, gaya dorong angin pada rotor ideal, dan efek dari kerja rotor pada *local wind field*. Model sederhana ini didasarkan pada teori momentum linier yang dikembangkan lebih dari 100 tahun yang lalu untuk memprediksi kinerja baling-baling kapal.

Analisis ini mengasumsikan kontrol volume, dimana batas-batas kontrol volume adalah permukaan *stream tube* dan dua penampang *stream tube* (lihat gambar 2.1). Turbin digambarkan sebagai '*actuator disc*' seragam yang menciptakan diskontinuitas tekanan pada aliran udara yang mengalir melalui *stream tube*. Analisis ini tidak terbatas pada jenis tertentu dari turbin angin. Analisis ini menggunakan asumsi sebagai berikut [14] :

- Alirannya homogen, incompressible, dan steady state flow

- Tidak ada *frictional drag*
- Jumlah blade *infinite*
- *Uniform thrust* pada rotor area
- *Non-rotating wake*
- Tekanan statis *far upstream* dan *far downstream* pada rotor sama dengan tekanan statis di sekitarnya



Gambar 2.4. *Actuator disc* model dari turbin angin [14]

Dengan menerapkan kekekalan momentum linier untuk kontrol volume yang menutup seluruh sistem, dapat dihitung gaya total pada kontrol volume. Bahwa gaya adalah sama dan berlawanan dengan gaya dorong (*thrust*),  $T$ , yang merupakan gaya atau kekuatan angin pada turbin angin. Dari kekekalan momentum linier untuk satu dimensi aliran, *incompressible, time-invariant flow*, gaya dorong adalah sama dan berlawanan dengan laju perubahan momentum dari aliran udara<sup>[14]</sup>.

$$T = U_1(\rho AU)_1 - U_4(\rho AU)_4 \quad (2.1)$$

Dimana  $\rho$  adalah densitas udara,  $A$  adalah luas penampang, dan  $U$  adalah kecepatan udara.

Untuk *steady state flow*,  $(\rho AU)_1 = (\rho AU)_4 = \dot{m}$ , dimana  $\dot{m}$  adalah laju massa<sup>[14]</sup>. Sehingga :

$$T = \dot{m}(U_1 - U_4) \quad (2.2)$$

Gaya dorong adalah positif sehingga kecepatan di belakang rotor,  $U_4$ , lebih rendah daripada kecepatan *free stream*  $U_1$ . Dengan demikian, fungsi Bernoulli

dapat digunakan dalam 2 volume kontrol di kedua sisi *actuator disc*. Di sisi *upstream*<sup>[14]</sup>:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho U_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho U_2^2 \quad (2.3)$$

Di sisi *downstream* :

$$p_3 + \frac{1}{2}\rho U_3^2 = p_4 + \frac{1}{2}\rho U_4^2 \quad (2.4)$$

Dimana diasumsikan tekanan pada *far upstream* dan *far downstream* adalah sama ( $p_1 = p_4$ ) dan oleh karena itu kecepatan *free stream* yang melintas adalah sama ( $U_1 = U_4$ )<sup>[14]</sup>.

Gaya dorong juga dapat dinyatakan sebagai jumlah dari gaya-gaya di setiap sisi *actuator disc*:

$$T = A_2(p_2 - p_3) \quad (2.5)$$

Jika ( $p_2 - p_3$ ) dapat diselesaikan menggunakan persamaan 2.3 dan 2.4, dan disubstitusikan ke persamaan 2.5, sehingga menghasilkan persamaan [14] :

$$T = \frac{1}{2}\rho A_2(U_1^2 - U_4^2) \quad (2.6)$$

Menggunakan persamaan 2.2 dan 2.6 untuk nilai *thrust* dan mengenali laju massa sebagai  $\rho A_2 U_2$ , sehingga diperoleh [14] :

$$U_2 = \frac{U_1 + U_4}{2} \quad (2.7)$$

Dengan demikian, kecepatan angin di *rotor plane*, menggunakan model sederhana ini, adalah rata-rata dari kecepatan udara di sisi *upstream* dan *downstream*.

Jika didefinisikan *axial induction factor*,  $a$ , sebagai penurunan fraksional kecepatan udara antara *free stream* dan *rotor plane*, maka [14] :

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (2.8)$$

$$U_2 = U_1(1 - a) \quad (2.9)$$

dan

$$U_4 = U_1(1 - 2a) \quad (2.10)$$

Nilai  $U_1a$  sering disebut sebagai kecepatan *induced* pada rotor, dalam hal ini kecepatan angin pada rotor adalah kombinasi dari kecepatan *free stream* dan kecepatan *induced* angin. Karena *axial induction factor* meningkat dari 0, kecepatan angin di belakang rotor menjadi lebih lambat. Jika  $a = 1/2$ , angin melambat hingga kecepatan nol di belakang rotor sehingga teori sederhana ini tidak lagi dapat diberlakukan.

Daya keluaran,  $P$ , sama dengan *thrust times velocity* pada disk [14] :

$$P = \frac{1}{2}\rho A_2(U_1^2 - U_4^2)U_2 = \frac{1}{2}\rho A_2U_2(U_1 + U_4)(U_1 - U_4) \quad (2.11)$$

Substitusi  $U_2$  dan  $U_4$  dari persamaan 2.9 dan 2.10 memberikan :

$$P = \frac{1}{2}\rho AU^3 4a(1 - a)^2 \quad (2.12)$$

Dimana daerah kontrol volum pada rotor,  $A_2$ , digantikan oleh  $A$ , area rotor, dan kecepatan *free stream*  $U_1$  digantikan oleh  $U$ .

Rotor performance dari turbin angin biasanya dikarakteristikan oleh koefisien dayanya,  $C_p$ :

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U^3 A} = \frac{\text{Rotor power}}{\text{Power in the wind}} \quad (2.13)$$

Koefisien daya merupakan sebagian dari potensi daya angin yang diekstraksi oleh rotor. Dari persamaan 3.12, koefisien daya adalah:

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (2.14)$$

$C_p$  maksimum ditentukan dengan mengambil derivatif dari koefisien daya (Persamaan 2.14), menghasilkan  $a = 1/3$ . Sehingga :

$$C_{p,max} = 16/27 = 0,5926 \quad (2.15)$$

Dari persamaan 2.6, 2.9, dan 2.10, gaya dorong aksial pada disc adalah

$$T = \frac{1}{2}\rho AU^2[4a(1-a)] \quad (2.16)$$

Sama dengan daya, gaya dorong turbin angin dapat dikarakteristikan sebagai non dimensional, koefisien thrust [14] :

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} = \frac{\text{Thrust force}}{\text{Dynamic force}} \quad (2.17)$$

Betz Limit,  $C_{p,max} = 16/27$ , adalah koefisien daya rotor maksimum yang mungkin secara teoritis. Dalam aplikasinya, tiga faktor yang menyebabkan berkurangnya koefisien daya maksimum yang dapat tercapai diantaranya adalah :

- *Rotation of the wake* di belakang rotor
- Jumlah blade yang tidak *infinite* dan *losses* pada ujung tip blade
- Drag aerodinamis (tidak sama dengan nol) [14]

Efisiensi turbin secara keseluruhan adalah fungsi dari koefisien daya rotor dan efisiensi mekanis dari turbin angin [14] :

$$\eta_{overall} = \frac{P_{out}}{\frac{1}{2}\rho AU^3} = \eta_{mech} C_p \quad (2.18)$$

Sehingga :

$$P_{out} = \frac{1}{2}\rho AU^3(\eta_{mech} C_p) \quad (2.19)$$

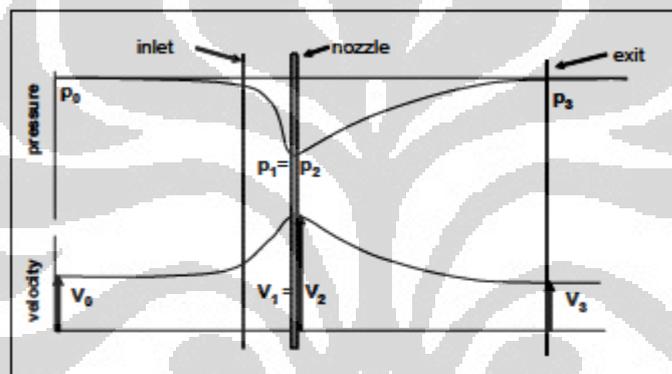
### 2.2.3 Teori Selubung Turbin Angin

Penelitian mengenai teori selubung turbin angin pertama kali dilakukan oleh Lilley dan Rainbird (1950). Studi yang dilakukan oleh Lilley dan Rainbird menunjukkan bahwa dengan penambahan selubung, dapat menghasilkan daya hingga dua kali lebih besar dibandingkan dengan tanpa selubung dengan diameter yang sama<sup>[15]</sup>. De Vries adalah salah satu yang pertama untuk mengembangkan teori dari DAWT (*Diffuser Augmented Wind Turbine*). Dia membedakan teori diffuser sederhana dari teori turbin berselubung. Dalam teori diffuser sederhana, dia memodelkan aliran 1 dimensi melalui diffuser, tapi mengantisipasi kenyataan bahwa tekanan di sisi keluar harus sama dengan sekitar. Dia memasukkan nilai

back pressure negatif seperti yang ditemukan dalam percobaan sebelumnya dengan memperkenalkan koefisien tekanan keluar empiris.

Dalam teori momentum satu dimensi, kecepatan dan tekanan dalam sebuah diffuser kosong secara langsung berhubungan dengan geometri, yaitu untuk variasi luas penampang. Gambar 2.5 menunjukkan indeks yang digunakan di berbagai lokasi. Luas penampang keluar dari diffuser yang digunakan sebagai referensi. Tekanan ambien  $p_0$  berada jauh di depan dan di belakang diffuser. Sepanjang diffuser, hubungan kecepatan dan tekanan dapat ditemukan dari persamaan kontinuitas dan hukum Bernoulli untuk tekanan total [15]:

$$p_{tot} = p_0 + \frac{1}{2}\rho V_0^2 = p_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = p_3 + \frac{1}{2}\rho V_3^2 = p_o + \frac{1}{2}\rho V_e^2 \quad (2.20)$$



Gambar 2.5. Hubungan tekanan dan kecepatan dalam diffuser kosong

dimana:  $p_0$  = tekanan di depan diffuser

$p_1$  = tekanan di nosel tepat sebelum *wind turbine*

$p_2$  = tekanan di nosel tepat setelah *wind turbine*

$p_3$  = tekanan di keluaran diffuser

$V_0$  = kecepatan jauh di depan diffuser

$V_1$  = kecepatan di *wind turbine*

$V_3$  = kecepatan di diffuser outlet

$V_e$  = kecepatan *in the wake of DAWT*

Dengan menggunakan persamaan kontinuitas dapat dilihat dengan mudah bahwa hubungan antara kecepatan pada nosel dan kecepatan di sisi keluar diffuser sebanding dengan rasio diffuser area  $\beta$  [15]:

$$V_1 = \beta V_3 \quad (2.21)$$

Tekanan total di nosel, menggunakan hubungan persamaan di atas dapat ditulis sebagai [15]:

$$p_{tot} = p_1 + \frac{1}{2}\rho(\beta V_3)^2 \quad (2.22)$$

Pada awalnya diasumsikan bahwa tidak ada *back pressure* di sisi keluar diffuser, sehingga  $p_3 = p_0$  dan  $V_0 = V_3$ . Sehingga tekanan pada nosel sama dengan [15] :

$$p_1 = p_0 + (1 - \beta^2)\frac{1}{2}\rho V_0^2 \quad (2.23)$$

Hal ini menunjukkan bahwa *under pressure* akan ada pada nosel, setiap kali rasio diffuser area  $\beta$  lebih besar dari 1. Hal ini jelas terjadi ketika luas area di sisi keluar lebih besar daripada area masuk, dan tidak ada separasi aliran yang muncul.

$$V_3 = \gamma V_0 \quad (2.24)$$

Di sisi keluar diffuser *back pressure* ( $\gamma$ ) dapat saja terjadi, misalnya ketika mengalami Kutta condition, aliran dipaksa untuk terdefleksi ke arah radial. Kemudian kecepatan di sisi keluar akan berbeda dari kecepatan ambient  $V_0$  di depan diffuser. Dengan melihat hubungan *back pressure* sebagai hubungan antara kecepatan  $V_0$  dan  $V_3$  di sisi keluar diffuser sehingga menghasilkan tekanan pada nozzle sebagai berikut [15] :

$$p_1 = p_0 + (1 - \beta^2\gamma^2)\frac{1}{2}\rho V_0^2 \quad (2.25)$$

Jadi untuk rasio diffuser area  $\beta$  lebih besar dari 1 dan untuk *back pressure* nol atau negatif ( $\gamma \geq 1$ ), akan ada *under pressure* di nosel.

Hubungan kecepatan di dalam diffuser akan lebih sederhana jika geometrinya diketahui. Dimulai dari kecepatan  $V_3$  di sisi keluar dari diffuser, kecepatan di lokasi lain dapat langsung dihitung dari perbandingan luas daerah tersebut dengan luas daerah keluar, dengan mengaplikasikan persamaan kontinuitas, dan menggunakan asumsi distribusi kecepatan seragam pada setiap bagian diffuser.

Rasio antara kecepatan dalam nosel diffuser (tanpa turbin angin) dan kecepatan masuk  $V_0$  di depan diffuser sering menyebabkan kesalahan dalam memprediksi daya yang mampu dicapai oleh sebuah DAWT. Dengan

menggabungkan persamaan (2.21) dan (2.25), menunjukkan bahwa kecepatan nozzle sama dengan  $\beta\gamma V_0$ . Namun daya maksimum yang dapat dicapai tidak sama dengan  $\beta^3\gamma^3 C_{pmax}$ , dimana  $C_{pmax}$  adalah daya maksimum yang dapat dicapai dari sebuah turbin angin tanpa diffuser. Secara signifikan, daya maksimum aktual lebih rendah dimana hal ini akan dijelaskan dibawah.

Dalam teori momentum satu dimensi yang dikembangkan oleh Van Bussel, terdapat hal yang harus diupayakan untuk mengembangkan teori yang memiliki kesetaraan atau kesamaan paling dekat dengan hubungan momentum untuk windturbines biasa. Oleh karena itu diasumsikan bahwa di sisi keluar dari diffuser, kondisi yang sama diberlakukan seperti halnya turbin angin biasa (dengan asumsi tidak ada back pressure tambahan). Sehingga dapat diekspresikan menggunakan persamaan [15]:

$$V_3 = (1 - a)V_0 \quad (2.26)$$

Jadi, *axial induction factor* ( $a$ ) didefinisikan di sisi keluar dari diffuser. Sama halnya seperti turbin angin biasa, teori momentum induksi ini adalah setengah dari faktor induksi ditemukan jauh di belakang DAWT ( $V_e = (1 - 2a)V_0$ ). Dari persamaan kontinuitas, menggunakan diffuser area ratio  $\beta$ , bahwa kecepatan di wind turbine pada nozel DAWT sama dengan  $V_1 = \beta V_3$ , sehingga<sup>[15]</sup>:

$$V_1 = \beta(1 - a)V_0 \quad (2.27)$$

Kecepatan di lokasi lain di dalam diffuser, seperti pada situasi tanpa turbin angin, dapat ditentukan dengan mengaplikasikan persamaan kontinuitas. Ketika ada sebuah back pressure tambahan di sisi keluar dari diffuser, kecepatan pada sisi keluar dapat diekspresikan [15]:

$$V_3 = \gamma(1 - a)V_0 \quad (2.28)$$

Melihat pada persamaan (2.8) untuk diffuser kosong. Maka kecepatan pada nozzle<sup>[15]</sup>:

$$V_1 = \beta\gamma(1 - a)V_0 \quad (2.29)$$

Hubungan tekanan dengan mudah dapat diperoleh dengan penerapan hukum Bernoulli pada aliran di depan dan di belakang rotor. Bila diasumsikan bahwa rotor terletak di nosel, maka:

$$p_1 = p_0 + [1 - \beta^2 \gamma^2 (1 - a)^2] \frac{1}{2} \rho V_0^2 \quad (2.30)$$

untuk tekanan di depan rotor dan:

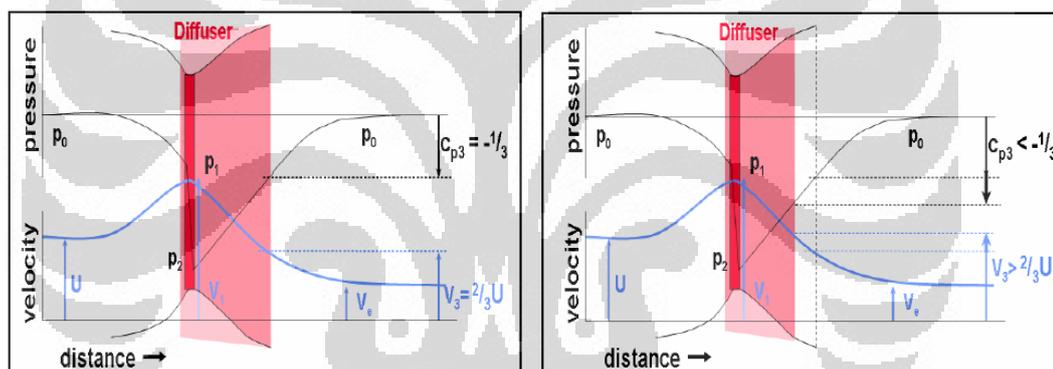
$$p_2 = p_0 + [(1 - 2a)^2 - \beta^2 \gamma^2 (1 - a)^2] \frac{1}{2} \rho V_0^2 \quad (2.31)$$

untuk tekanan di belakang rotor.

Dengan demikian perbedaan tekanan pada rotor dapat diekspresikan menggunakan persamaan:

$$p_2 - p_1 = 4a(1 - a) \frac{1}{2} \rho V_0^2 \quad (2.32)$$

Ini berarti bahwa jumlah energi yang diekstraksi per unit volume adalah identik dengan jumlah energi yang diekstraksi oleh turbin angin biasa (tanpa diffuser). Jumlah udara yang melewati turbin di diffuser telah ditingkatkan dengan faktor  $\beta\gamma$ . Dan seperti halnya dengan teori momentum untuk turbin angin biasa nilai optimal untuk  $a = 1/3$ .



Gambar 2.6. Hubungan kecepatan dan tekanan optimal dalam sebuah DAWT yang diperoleh dari teori momentum

Kiri : diffuser tanpa *back pressure* tambahan ( $\gamma = 1$ )

Kanan: diffuser dengan *back pressure* tambahan ( $\gamma > 1$ )

Power dan *thrust* untuk DAWT.

Koefisien daya dari DAWT mengikuti persamaan (2.27) dan (2.32):

$$C_{p,rotor} = \beta\gamma 4a(1 - a)^2 \quad (2.33)$$

Dan akibatnya koefisien daya pada sisi keluar diffuser:

$$C_{p,exit} = \gamma 4a(1 - a)^2 \quad (2.34)$$

Dari persamaan di atas, dapat ditarik kesimpulan berkaitan dengan distribusi gaya dorong (thrust) total yang bekerja pada DAWT tersebut. Thrust pada rotor di dalam diffuser adalah persis sama dengan thrust pada rotor biasa tanpa diffuser, seperti dapat dilihat dari persamaan (2.32):

Penerapan prinsip kekekalan momentum untuk aliran yang melalui DAWT dapat menggunakan persamaan berikut [15]:

$$C_{p,total} = \beta\gamma 4a(1 - a) \quad (2.35)$$

Hal ini memberikan kesimpulan bahwa gaya dorong pada diffuser tergantung pada tekanan dari rotor:

$$C_{T,diffuser} = C_{p,total} - C_{p,rotor} = (\beta\gamma - 1)4a(1 - a) \quad (2.36)$$

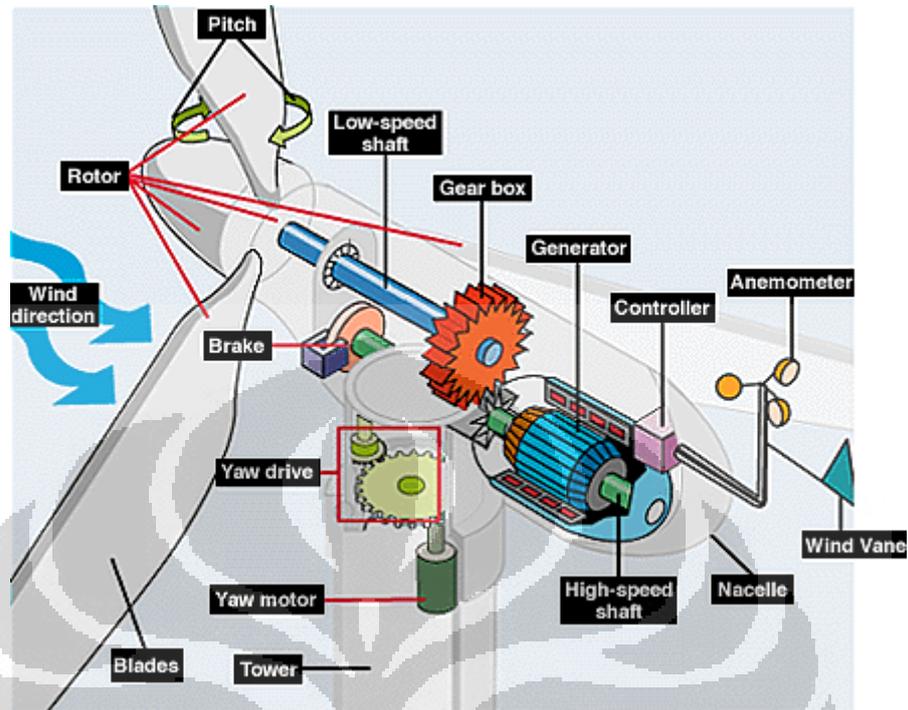
Oleh karena itu gaya dorong pada diffuser sebanding dengan laju massa tambahan yang diperoleh dalam DAWT. Koefisien daya optimal yang diperoleh untuk  $a = 1/3$ , sama seperti turbin angin biasa. Dalam karyanya pendekatan Van Bussel menekankan bahwa teori yang dikembangkan tidak mencakup penentuan *back pressure ratio* maksimum  $\gamma$  yang dapat dicapai [15].

#### 2.2.4 Konstruksi turbin angin

Turbin angin didesain untuk mengumpulkan dan mengeksploitasi energi angin yang mengalir melalui turbin tersebut. Untuk membuatnya, model aerodinamis digunakan untuk menentukan tinggi menara yang optimal, menentukan sistem kontrol, jumlah dan bentuk dari bilah turbin, serta bentuk keseluruhan.

Turbin angin dapat mengkonversi energi angin menjadi energi listrik. Sebuah turbin angin dengan sumbu horizontal terbagi menjadi tiga komponen utama, yaitu :

- Komponen rotor, membutuhkan sekitar 20% dari keseluruhan biaya
- Komponen generator, membutuhkan sekitar 34% dari keseluruhan biaya
- Komponen struktural, membutuhkan sekitar 15% dari keseluruhan biaya [16]



Gambar 2.7. Komponen-komponen dari turbin angin sumbu horizontal [16]

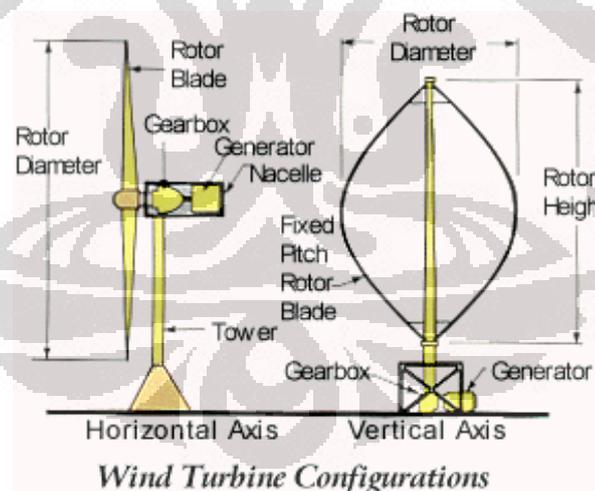
Seperti yang terlihat pada gambar, komponen-komponen turbin angin terdiri dari: (1) Anemometer, berfungsi mengukur kecepatan angin dan memberikan data tersebut pada sistem kontrol; (2) Blades, berfungsi untuk menangkap energi angin dan meneruskan putarannya ke poros dan generator; (3) Brake, berfungsi untuk menghentikan rotor dalam keadaan darurat; (4) Controller, berfungsi untuk mengontrol dan menjalankan mesin pada kecepatan tertentu, contohnya pada 8-16 mil/jam, dan otomatis mematikan mesin di saat kecepatan mencapai 55 mil/jam. (5) Gear box, berfungsi untuk menghubungkan shaft kecepatan rendah dengan yang berkecepatan tinggi, dan meningkatkan kecepatan rotasional, hingga generator dapat menghasilkan listrik; (6) Generator, berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik; (7) High & low-speed shaft, berfungsi mendistribusikan tenaga rotasional, dari bilah turbin yang berputar ke generator di dalam turbin; (8) Nacelle, body dari turbin angin, yang berfungsi melindungi/ membungkus komponen-komponen lain; (9) Pitch berfungsi Mengendalikan kecepatan rotor dan mempertahankan rotor dari berubah arah

putar karena fluktuasi pada kecepatan dan arah angin; (10) Tower, terbuat dari baja, atau beton. Turbin angin diletakkan jauh di atas menara untuk dapat menangkap energi angin; (11) Wind vane berfungsi menentukan arah angin, dan berkomunikasi dengan yaw drive untuk menentukan orientasi turbin angin; (12) Yaw drive, berfungsi mempertahankan posisi rotor agar tetap menghadap arah angin [17].

### 2.2.5 Tipe-tipe turbin angin

Terdapat dua jenis turbin angin; turbin angin dengan bilah bersumbu horizontal, dan bilah bersumbu vertikal.

HAWT, atau *Horizontal-axis Wind Turbines* memiliki shaft rotor utama dan generator pada puncak atas dari menara, dan diarahkan menghadap arah angin. Sementara VAWT, atau *Vertical-axis Wind Turbines* memiliki shaft rotor yang dipasang secara vertikal. Untuk lebih jelasnya, dapat dilihat pada gambar di bawah :



Gambar 2.8. HAWT dan VAWT [18]

Secara umum, HAWTs terbagi lagi menjadi upwind dan downwind, sementara VAWTs terbagi menjadi turbin Darrieus dan Savonius.

Turbin angin jenis upwind memiliki rotor yang menghadap ke arah angin. Keuntungan dari desain ini adalah rotor tidak terkena wind shade dari bagian

belakang menara. Kerugiannya adalah, rotor perlu menjadi lebih tidak fleksibel, dan diletakkan dengan jarak tertentu dari puncak menara. Desain ini juga memerlukan mekanisme yaw agar rotor terus menghadap arah angin.

Turbin angin jenis downwind memiliki rotor yang tidak menghadap ke arah angin. Keuntungannya adalah desain tidak memerlukan mekanisme yaw. Rotor juga dapat dibuat lebih fleksibel, dan beratnya menjadi lebih ringan secara keseluruhan. Kerugiannya adalah fluktuasi dari energi angin yang terjadi dapat memberikan beban lebih pada menara.

Turbin angin Darrieus ditemukan oleh George Darrieus dari Prances, yang mendapat hak paten dari desain tersebut pada tahun 1931 [19]. Karakteristik desainnya adalah bentuk C pada bilah rotor, hingga berbentuk menyerupai telur. Biasanya dibuat dalam konsep dua bilah, atau tiga bilah rotor.

Turbin Savonius ditemukan oleh Sigurd Savonius dari Finlandia, dan dipatenkan pada tahun 1922 [17]. Karakteristik desainnya adalah bentuk S pada bilah rotor, dan memiliki 2-3 atau lebih cekungan untuk menangkap angin. Desain turbin ini tidak dapat berputar lebih cepat dari kecepatan angin. Keuntungannya adalah, desain ini memiliki sumbu vertikal dan dapat bekerja secara efektif bahkan ketika arah angin berubah. Desainnya juga dapat bekerja baik pada kecepatan angin yang rendah, dan tidak diperlukan lokasi yang tinggi untuk meletakkannya. Kerugiannya adalah sistem cekungan pada bilah rotor tidak seefisien dengan penggunaan bilah rotor konvensional, sehingga menghasilkan energi yang lebih sedikit.

#### **2.2.6 Turbin angin skala kecil**

Turbin angin skala kecil adalah turbin angin dengan output energi lebih rendah dari turbin angin komersial. Turbin angin jenis ini mungkin hanya dapat menghasilkan listrik sekitar 50 watt, dan untuk konsumsi alat-alat listrik kecil.

Perihal instalasi, aturan yang berlaku untuk pemasangan turbin angin adalah tinggi minimalnya adalah 9 meter lebih tinggi dari gedung di sekitarnya dalam radius 152 meter [20]. Hal ini merupakan masalah karena tujuannya adalah

untuk menciptakan turbin angin yang dapat dipasang pada area permukiman, dan digunakan pada level aktivitas rumah tangga.



Gambar 2.9. *Rooftop Wind Turbines* [21]

Turbin angin skala kecil dapat dipasang pada atap-atap rumah, dengan masalah yang kemudian dihadapi adalah kekuatan atap itu sendiri, getaran yang dihasilkan, turbulensi yang dihasilkan oleh atap. Turbin angin skala kecil seperti ini lebih banyak terhambat oleh turbulensi dan jarang menghasilkan energi yang cukup, terutama pada daerah perkotaan. Masalah inilah yang ditemukan pada kota-kota di Indonesia, di samping kecepatan angin yang tidak dapat memenuhi standar normal kecepatan yang diperlukan untuk keperluan dasar turbin angin.

Turbin angin skala kecil untuk area residensial telah tersedia, biasanya berdiameter 2 hingga meter, dan menghasilkan energi sekitar 300 hingga 10,000 watt. Mayoritas dari turbin angin tersebut adalah HAWT. Banyak perusahaan besar dari industri turbin angin yang melaporkan peningkatan penjualan dari beberapa tahun belakangan.

Turbin angin skala kecil biasanya terdiri atas; bilah-bilah rotor, hub, generator DC, diode, dudukan turbin, kabel-kabel, dan menara kecil. Desain ini dapat berbeda pada tiap lokasi tergantung kebutuhan dan keinginan konsumen, serta karakteristik lokasi itu sendiri.

### 2.2.7 Turbin angin di Indonesia

Pada saat ini, naiknya permintaan terhadap energi yang bersih dapat diperbarui semakin tinggi, dan tidak dapat ditolerir. Penggunaan dan eksploitasi bahan bakar fosil, dan efeknya pada lingkungan, menjadi ancaman bagi kehidupan di masa yang akan datang. Tren yang sama juga terjadi di Indonesia. Indonesia memiliki energi yang bersih dan dapat diperbarui dalam jumlah yang banyak, namun teknologinya belum cukup untuk dapat mengolah energi-energi tersebut.

Dalam beberapa tahun ini, banyak insinyur yang mencoba untuk mengatasi situasi tersebut. Di Indonesia, energi 'hijau' dan terbarukan semakin dikembangkan, contohnya; bioetanol, biodiesel, energi geotermal, bahkan energi solar. Energi angin sendiri telah menjadi semacam sektor yang berkembang pesat dalam industri ini. Angin dengan kecepatan 3 m/s, atau 12 km/jam, atau 6.7 knot/jam cukup untuk turbin angin skala kecil [22].

## 2.3 Kebijakan Pengembangan Energi Angin

### 2.3.1 Regulasi terkait pengembangan energi angin

Pemerintah telah mengeluarkan beberapa kebijakan untuk pengembangan energi baru dan terbarukan di mana energi angin termasuk salah satunya. Kebijakan yang telah dikeluarkan dan dilakukan oleh pemerintah adalah sebagai berikut :

- Undang-undang Ketenagalistrikan No.30 tahun 2009
- Undang-undang Energi No.30 tahun 2007
- Peraturan Pemerintah No.26 tahun 2006, sebagai perubahan kedua atas Peraturan Pemerintah No.10 tahun 1989, tentang Penyediaan dan Pemanfaatan Tenaga Listrik
- Peraturan Presiden No.5 tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional.
- Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No.122K/30/MEM/2002 tentang Pedoman Pengusahaan Pembangkit Tenaga Listrik Skala Kecil.

- Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No.002 tahun 2006 tentang Pengusahaan Pembangkit Listrik Energi Terbarukan Skala Menengah.
- Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No.0010 tahun 2005 tentang Tata Cara Perizinan Usaha Ketenagalistrikan Untuk Lintas Provinsi Atau Yang Terhubung Dengan Jaringan Transmisi Nasional.
- Keputusan Menteri ESDM No.002 tahun 2004 tentang Kebijakan Energi Hijau, yakni kebijakan Pengembangan Energi Terbarukan dan Konservasi Energi
- Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No.5 tahun 2009, tentang Pedoman Harga Pembelian Tenaga Listrik oleh PT. PLN (Persero) dari Koperasi atau Badan Usaha Lain.

### **2.3.2 Kebijakan pengembangan energi angin**

- Kebijakan Investasi dan Pendanaan.
  - o Meningkatkan investasi di bidang pengembangan PLT Angin dengan memberikan kesempatan seluas-luasnya kepada kalangan swasta, koperasi, BUMN dan BUMD.
  - o Mendorong investasi di bidang pengembangan PLT Angin melalui :
  - o Penciptaan iklim investasi yang dapat memberikan rangsangan dalam segi finansial, moneter dan fiskal;
  - o Pemberian insentif berupa mekanisme sistem investasi yang kondusif dan suku bunga ringan;
  - o Pemberian insentif pajak berupa penangguhan, keringanan dan pembebasan PPN serta pembebasan pajak, bea masuk kepada dunia usaha yang bergerak di bidang PLT Angin.
  - o Mendorong industri usaha penunjang PLT Angin melalui pendidikan dan latihan serta sosialisasi.
- Kebijakan Standarisasi dan Sertifikasi

- Menyusun dan menerapkan standar PLT Angin Nasional dengan tujuan memberikan jaminan akan kualitas produk PLT Angin.
  - SNI PLT Angin yang menyangkut kesehatan, keamanan dan keselamatan diberlakukan standar wajib. Pemberlakuan standar wajib harus mempertimbangkan kesiapan produsen dan kesiapan lembaga sertifikasi penguji.
- Kebijakan Peningkatan Kualitas SDM
- Kualitas SDM ditingkatkan secara berkesinambungan terutama dalam hal proses penguasaan teknologi PLT Angin melalui pendidikan dan pelatihan;
  - Profesionalisme sumber daya manusia di bidang jasa PLT Angin juga terus ditingkatkan.
- Kebijakan Penelitian dan Pengembangan.
- Penelitian dan Pengembangan PLT Angin diarahkan untuk meningkatkan kemampuan nasional di bidang penguasaan Iptek dalam rangka pengembangan industri PLT Angin nasional.
  - Mengadakan program kemitraan antara lembaga penelitian dan industri PLT Angin.

### **2.3.3 Implementasi sistem PLTB di Indonesia**

Pemanfaatan energi angin secara langsung bagi masyarakat baru dilakukan pada tahun 1992 di Jepara Jawa Tengah, diawali dengan 3 unit turbin angin kecil di desa Bulak Baru Kecamatan Kedung Jepara bekerjasama dengan Pemerintah Daerah Tk I Jawa Tengah, Pemda Tk II Jepara, Universitas Diponegoro (Undip) dan swasta dan pada tahun 1994 menghasilkan pembangunan total 31 unit turbin angin dari kapasitas 250 W, 1000 W dan 2500 W di dua desa yakni 19 unit di Desa Bulak Baru Jepara (penduduk 182 KK) dengan kapasitas terpasang <40 kW dan 12 unit di desa Kalianyar (penduduk 82 KK) dengan kapasitas terpasang < 8 kW yang digunakan untuk penerangan rumah, sarana umum, jalan, mengisi

baterai, radio, televisi; dan selanjutnya peralatan listrik industri kerajinan lokal antara lain souvenir, ukiran/meubel, dan lain-lain.

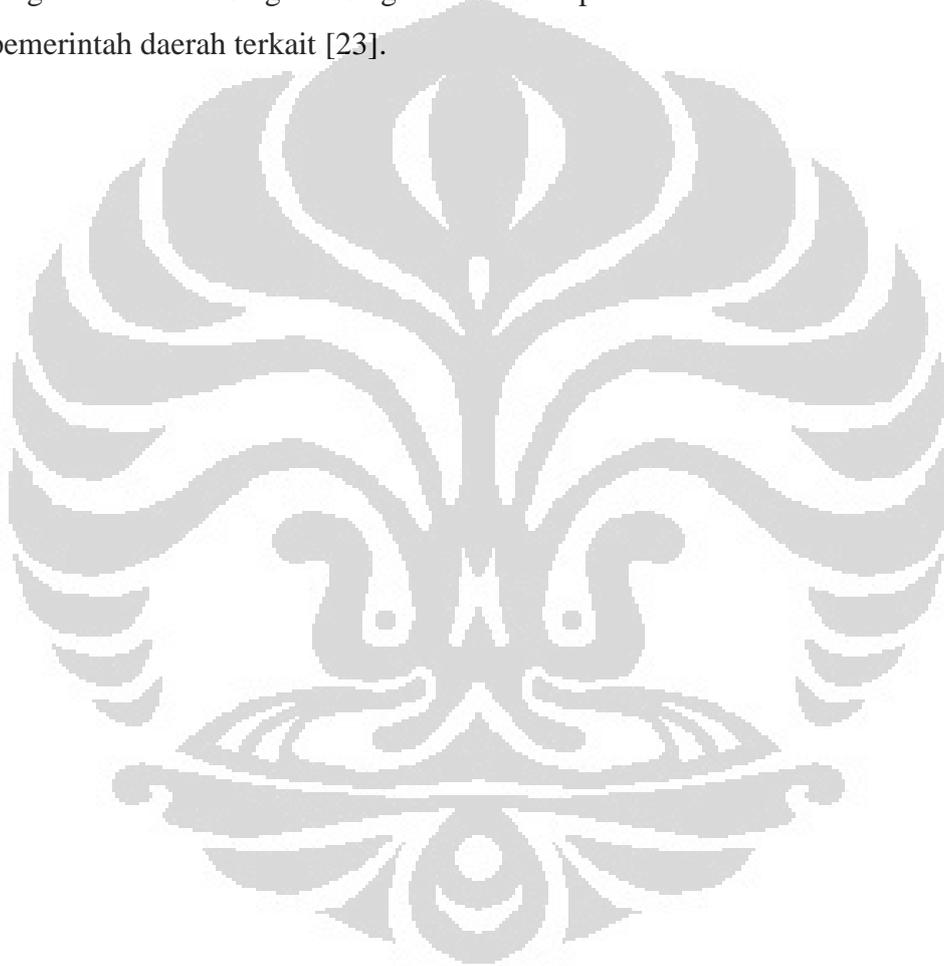
Proyek pemanfaatan di dua desa ini lebih dikenal dengan Desa Angin Percontohan Jepara yang telah diserahkan oleh LAPAN kepada Pemda Tk II Jepara pada tahun 1994 dan merupakan percontohan pertama energi angin di Indonesia yang telah dipublikasikan secara nasional maupun internasional [23]. Proyek pemanfaatan berikutnya adalah di desa Selayar Lombok Timur yakni 7 unit turbin angin dengan kapasitas terpasang 7000 kW untuk penerangan, radio, televisi, dan lain-lain. Terdapat berbagai instalasi lain di beberapa wilayah yang merupakan kegiatan perorangan, kelompok ataupun institusi untuk penggunaan penggunaan tertentu.

Uji-coba dan pemanfaatan energi angin sebagai penggerak mekanik (yang dikenal sebagai SKEA mekanik atau kincir angin) terutama dimaksudkan untuk pemompaan dangkal telah dilakukan lebih awal dan telah menghasilkan beberapa prototip yang telah diuji-coba dan dimanfaatkan di berbagai daerah yakni Lombok Timur, Serang, Indramayu, Subang, Jepara, dan lain-lain untuk pemompaan, menaikkan air dan pembuatan garam. Prototip-prototip yang telah dihasilkan adalah sudu majemuk (12-18 sudu) kapasitas 150 l/det, 90 l/det 45 l/det yang siap untuk di produksi<sup>[21]</sup>.

Hingga saat ini, semua uji-coba, percontohan maupun pemanfaatan turbin angin baru dilakukan dalam skala kecil (sampai 10 kW per unit terpasang) dan pemanfaatannya adalah di daerah-daerah yang belum terjangkau oleh listrik PLN. Kendala pokok yang dihadapi adalah biaya investasi yang masih mahal dan kontinuitas pasokan energi yang dihasilkan oleh SKEA (disebut juga PLTB-Pembangkit Listrik Tenaga Bayu) di lokasi. Pemanfaatan dengan sistem hibrida (angin fotovoltaik-diesel) dapat dikembangkan; namun menambah biaya investasi sistem.

Oleh karena itu, untuk memaksimalkan pemanfaatan terhadap potensi energi angin di Indonesia perlu dilakukan pemetaan di setiap wilayah di Indonesia. Pengukuran dan monitoring data angin yang lebih efektif sebenarnya baru di mulai pada tahun 1991 yakni menggunakan peralatan monitoring dilengkapi dengan data logger dan unit cetak (printer) di lokasi pengukuran.

Dalam hal ini, operator lapangan cukup mengambil data sebulan sekali, mencetak dalam printer dan mengirimkan ke LAPAN untuk pengolahan lanjut. Data yang lebih rinci misalnya setiap 3 bulan dapat diretrieval (diambil kembali) dan disimpan di dalam disket untuk diolah lebih lanjut menjadi data dan informasi yang aplikatif yakni dalam bentuk informasi statistik, daya, energi, distribusi, kondisi lull (kecepatan angin lebih rendah dari yang dibutuhkan) dan lain-lain. Hasil-hasil pengolahan ini selanjutnya disajikan dalam "Laporan Data/ Potensi Angin untuk masing masing lokasi setiap tahun" dan dikirimkan kepada pemerintah daerah terkait [23].



## BAB 3

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam skripsi ini yaitu dengan melakukan pengumpulan data sekunder. Data sekunder tersebut meliputi data potensi angin yang ada di seluruh wilayah Indonesia dan data mengenai teknologi turbin angin yang tersedia. Dari data-data tersebut, kemudian dilakukan pencocokan antara potensi sumber daya angin dengan teknologi turbin angin sehingga didapat hasil berupa pemetaan (*mapping*) teknologi turbin angin di tiap-tiap wilayah di Indonesia.

Dalam penelitian ini, juga dilakukan simulasi terhadap salah satu dari jenis teknologi turbin angin, yaitu turbin angin yang menggunakan selubung di sekitar rotornya. Sebelum melakukan simulasi, terlebih dahulu dilakukan pemodelan terhadap dua jenis turbin angin yang menggunakan selubung. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan Solidworks 2011 dan selanjutnya dilakukan simulasi dengan Solidworks Flow Simulation. Tujuan dilakukannya simulasi ini adalah untuk melihat distribusi kecepatan dan tekanan di dalam selubung sehingga dapat dibandingkan efektivitas dari kedua model selubung tersebut.

##### 3.1.1 Peralatan Simulasi

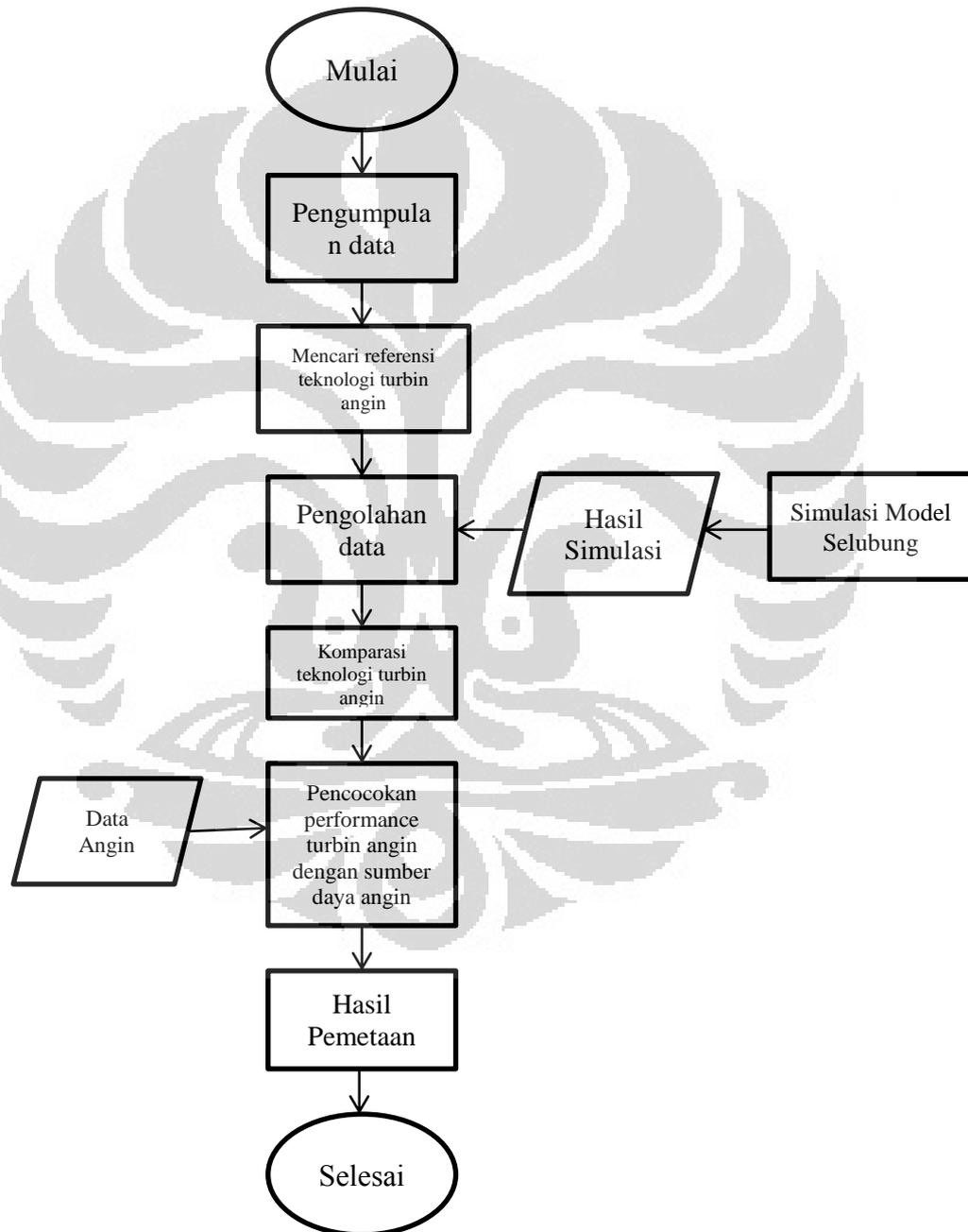
Adapun peralatan simulasi yang digunakan dalam penelitian ini yaitu berupa perangkat lunak Solidworks 2011 sebagai pemodelan dan Flow Simulation 2011 sebagai simulasi. Penelitian ini menggunakan perangkat keras (hardware) untuk komputasi sebagai media dari perangkat lunak yang digunakan.

Perangkat keras (hardware) komputasi yang digunakan yaitu ASUS A42JC dengan spesifikasi sebagai berikut :

- Intel Core i3 370M 2,4 GHz

- Memory SO-DIMM PC10600 2GB DDR3
- VGA Nvidia G310M
- HDD 320GB
- Windows 7 Ultimate 64-Bit
- Solidworks Premium 2011 dan Flow Simulation 2011

### 3.1.2 Alur Kerangka Penelitian



## 3.2 Pengumpulan Data Sekunder

### 3.2.1 Data Potensi Angin

Data potensi angin diperoleh dari badan-badan hukum pemerintah yang mempunyai wewenang untuk mengkaji potensi sumber daya angin di Indonesia. Data potensi angin ini meliputi potensi yang ada di seluruh wilayah di Indonesia. Data ini berfungsi sebagai input untuk tiap-tiap jenis teknologi turbin angin sehingga dapat dilakukan pemetaan teknologi turbin angin di seluruh wilayah di Indonesia. Data ini juga digunakan sebagai input dalam melakukan simulasi dan pemodelan. Sebagai contoh, di bawah ditampilkan tabel untuk propinsi Aceh dengan lokasi stasiun BMKG di Blang Bintang dan ketinggian instrumen ukur 21 meter.

Tabel 3.1. Karakteristik angin untuk propinsi Aceh tahun 2000-2007 [24]

Propinsi	Elevasi, m	Tahun	Tekanan, kPa	Temperatur, K	V rata-rata, m/s
Aceh	21	2000	100,89	299,15	0,43
		2001	101,03	299,32	0,77
		2002	101,01	299,65	2,01
		2003	101,01	300,13	2,27
		2004	101,43	299,92	2,10
		2005	101,39	299,99	2,01
		2006	101,41	300,23	2,01
		2007	101,22	299,38	2,01

Sumber : Data Iklim BMKG 2000-2007

### 3.2.2 Data Teknologi Turbin Angin

Data teknologi turbin angin diperoleh dari berbagai sumber, baik dari internet maupun badan-badan hukum pemerintah yang mengkaji dan melakukan penelitian tentang turbin angin. Data tersebut meliputi data mengenai spesifikasi teknis dan karakteristik kerja dari tiap-tiap jenis teknologi. Data ini digunakan untuk pemetaan teknologi turbin angin di tiap-tiap wilayah di Indonesia setelah terlebih dahulu dicocokkan dengan potensi sumber daya angin di tiap wilayah.

Berikut ini merupakan contoh data teknologi turbin angin yang sudah digunakan dan dibuat di Indonesia. Turbin ini dibuat dari badan-badan hukum pemerintah yaitu LAPAN (Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional) dan UPT-LAGG (Unit Pelaksana Teknis Laboratorium Aero-Gas Dinamika dan Getaran) BPPT. Turbin ini kebanyakan diperuntukkan untuk skala kecil dan menengah dan sudah dipasang di beberapa wilayah di Indonesia.

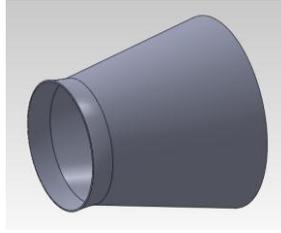
Tabel 3.2. Turbin angin skala kecil dan menengah yang dibuat oleh badan hukum pemerintah [25]

No	Wind Technology	Rotor Diameter (m)	Range of winds (m/s)	Cut in wind speed (m/s)	Rated wind speed (m/s)	Rated Power (Kw)
1	Turbin angin LAPAN 10 kW	7	3,1-54	3,5	12,4	8,5
2	Turbin angin LAGG 300W	3	2,5-25	2,5	7	0,3
3	Turbin angin LAGG 1 kW	3	2,5-25	2,5	8,35	1
4	Turbin angin LAGG 2,5 kW	4,7	2,5-25	2,5	8,35	2,5
5	Turbin angin LAGG 5 kW	6	2,5-25	2,5	9	5
6	Turbin angin LAGG 10 kW	8,2	2,5-25	2,5	9	10
7	Turbin angin LAGG 20 kW	12	2,5-25	2,5	9	20

*Sumber : Data Turbin Angin LAGG*

### 3.2.3 Pemodelan Selubung Turbin Angin

Pada langkah ini, dilakukan pemodelan terhadap salah satu jenis teknologi turbin angin, yaitu turbin angin yang menggunakan selubung di sekeliling rotornya. Model ini nantinya akan disimulasikan menggunakan Flow Simulation dengan konfigurasi yang berbeda, yaitu selubung dengan konfigurasi diffuser, dan dengan konfigurasi nozzle. Dimensi dari selubung ditetapkan dengan menggunakan penelitian yang dilakukan oleh rekan saya yaitu untuk diameter masuk sebesar 800 mm, L/D sebesar 1,25, dan besar sudut ekspansi sebesar 12°. Hal ini dapat ditunjukkan pada gambar di bawah.



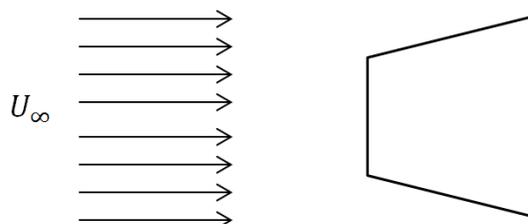
Gambar 3.1. Model selubung turbin angin

### 3.3 Simulasi

Simulasi dilakukan terhadap salah satu jenis teknologi turbin angin, yaitu turbin angin yang menggunakan selubung di sekeliling rotornya. Simulasi ini dilakukan untuk melihat distribusi kecepatan dan tekanan di dalam selubung sehingga dapat dilihat efektivitas dari kedua model selubung tersebut. Sebelum melakukan simulasi, terlebih dahulu dilakukan pemodelan terhadap dua jenis model selubung, yaitu selubung dengan konfigurasi diffuser dan selubung dengan konfigurasi nozel. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan Solidworks 2011 dan selanjutnya dilakukan simulasi secara CFD dengan Solidworks Flow Simulation 2011. Simulasi dilakukan dengan memasukkan variabel dan parameter-parameter yang dibutuhkan. Hasil yang dapat dilihat dari simulasi ini yaitu berupa tampilan geometri yang menunjukkan plot tekanan dan kecepatan fluida yang mengalir melalui selubung.

#### 3.3.1 Simulasi Selubung Jenis Diffuser

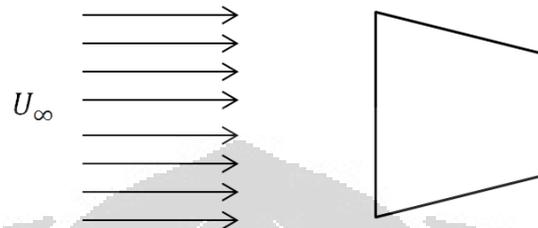
Simulasi selubung diffuser dilakukan pada kondisi dimana kecepatan free stream masuk ke selubung pada luas penampang yang lebih kecil. Hal ini dapat dilihat pada gambar di bawah.



Gambar 3.2. Selubung Diffuser

### 3.3.2 Simulasi Selubung dengan Jenis Nozzle

Lain halnya dengan diffuser, pada selubung nozzle, kecepatan free stream masuk ke selubung pada luas penampang yang lebih besar. Hal ini dapat dilihat pada gambar di bawah ini :



Gambar 3.3. Selubung Nozzle

Dari kedua konfigurasi tersebut, dapat dilihat dan dibandingkan bagaimana efektivitas dari kedua desain tersebut untuk aplikasinya pada turbin angin. Selain itu, dengan melakukan simulasi pada kedua model, dapat ditentukan peletakan rotor di dalam selubung tersebut.

## BAB 4

### DATA DAN ANALISIS

#### 4.1 Pengolahan Data Teknologi Turbin Angin

Data mengenai teknologi yang didapatkan dari berbagai referensi dikumpulkan dan diolah sehingga parameter-parameternya dapat dibandingkan.

Data-data tersebut meliputi :

- Rotor diameter : diameter rotor dari turbin angin
- Range of winds : merupakan rentang kecepatan angin yang digunakan oleh turbin angin untuk beroperasi
- Cut in wind speed : kecepatan angin saat turbin mulai menghasilkan daya
- Rated wind speed : kecepatan angin saat turbin mulai menghasilkan daya nominal/ maksimum
- Rated power : daya keluaran nominal dari turbin angin
- Swept area : luas area tangkap dari turbin angin

Tabel 4.1. Data dan Spesifikasi Teknologi Turbin Angin [26]

No	Wind Technology	Rotor Diameter (m)	Range of winds (m/s)	Cut in wind speed (m/s)	Rated wind speed (m/s)	Rated Power (kW)	Swept Area (m <sup>2</sup> )
1	Energy Ball/ Venturi [27] 	1,1	2-40	2	17	0,5	0,95
2	Swift Wind Turbine [28] 	2,1	3,6-64,8	3,6	11	1,5	3,46
3	WindTamer [29]	1,4	2-25	2	14	1,3	1,54

							
4	Counter rotating [30] 	4,4	2,5-40	2,5	8	3,6	15,28
5	Direct Drive (AWE-54900) [31] 	54	2-25	2	14	900	2289,06
6	Broadstar wind systems [32] 	3,05	1,8-35	1,8	13,5	10	46,63
7	O Connor Hush Turbine [33] 	1	N/A	N/A	15	0,68	0,78
8	Enflo Windtech [34] 	0,71	2,5-55	2,5	12,5	0,5	0,39
9	Sky Stream [35] 	3,72	3,5-63	3,5	13	2,4	10,86
10	Diffuser Augmented Wind Turbine [36] 	1,83	N/A	Controller Specific	6,3	1	2,63

11	WindDancer [37] 	2,98	N/A	1	17	3,2	6,97
12	Eco Whisper [38] 	6,5	N/A	3,5	14	20	33,16
13	Wind Spire [39] 	1,2	4-45	4	11,2	1,2	7,32
14	Turby [39] 	0,25	4-55	4	14	2,5	5,3
15	Ropatec [39] 	3,3	-	2	14	6	8,55
16	Seahawk Vertical Axis [39] 	0,76	N/A	3,1	12,5	0,5	0,93

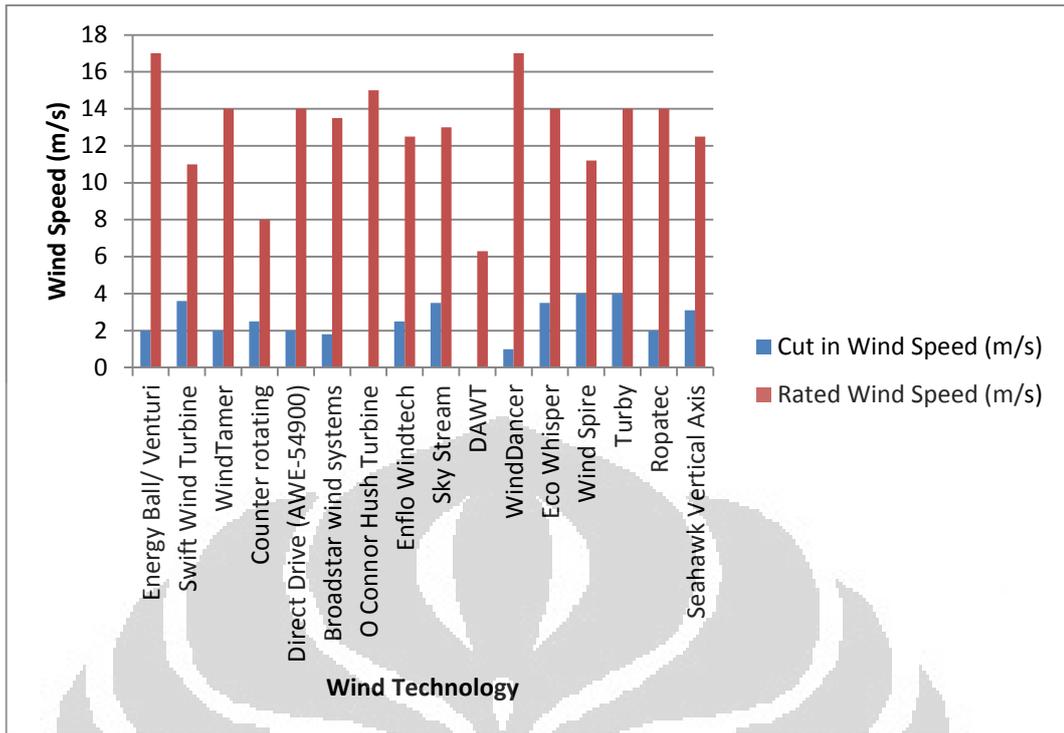
Teknologi turbin angin diatas merupakan turbin angin yang kebanyakan diproduksi dan digunakan untuk pasaran Eropa. Untuk turbin angin yang sudah digunakan di Indonesia, diantaranya dibuat oleh LAPAN (Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional) dan UPT-LAGG (Unit Pelaksana Teknis Laboratorium

Aero-Gas Dinamika dan Getaran) BPPT. Turbin ini kebanyakan diperuntukkan untuk skala kecil dan menengah dan sudah dipasang di beberapa wilayah di Indonesia.

Tabel 4.2. Data dan Spesifikasi Turbin Angin di Indonesia [25]

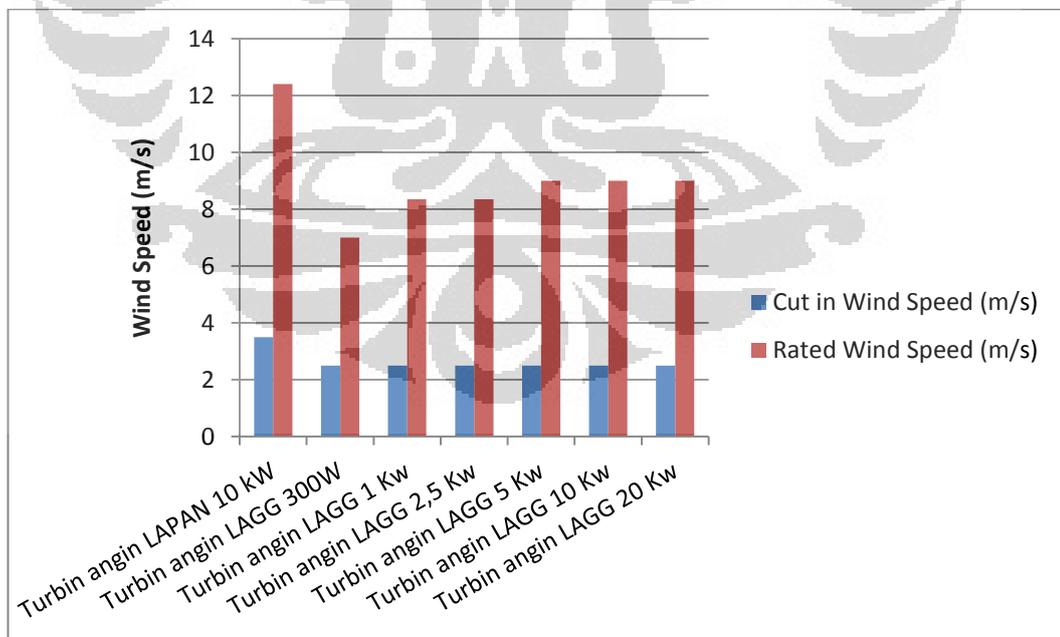
No	Wind Technology	Rotor Diameter (m)	Range of winds (m/s)	Cut in wind speed (m/s)	Rated wind speed (m/s)	Rated Power (Kw)	Swept Area (m <sup>2</sup> )
1	Turbin angin LAPAN 10 kW	7	3,1-54	3,5	12,4	8,5	38,465
2	Turbin angin LAGG 300W	3	2,5-25	2,5	7	0,3	7,065
3	Turbin angin LAGG 1 kW	3	2,5-25	2,5	8,35	1	7,065
4	Turbin angin LAGG 2,5 kW	4,7	2,5-25	2,5	8,35	2,5	17,34065
5	Turbin angin LAGG 5 kW	6	2,5-25	2,5	9	5	28,26
6	Turbin angin LAGG 10 kW	8,2	2,5-25	2,5	9	10	52,7834
7	Turbin angin LAGG 20 kW	12	2,5-25	2,5	9	20	113,04

Dari data yang sudah diolah, maka dapat diperoleh grafik berupa perbandingan nilai cut in dan rated wind speed untuk tiap-tiap jenis teknologi turbin angin :



Gambar 4.1. Grafik perbandingan nilai cut in dan rated wind speed

Untuk turbin angin nasional yang dibuat oleh LAPAN dan LAGG masuk ke dalam kategori turbin angin konvensional, diperoleh grafik sebagai berikut :



Gambar 4.2. Grafik perbandingan nilai cut in dan rated wind speed untuk turbin angin nasional

Dari kedua grafik yang dihasilkan, maka dapat dilihat bahwa turbin angin wind dancer memiliki kecepatan cut in yang paling rendah, yaitu 1 m/s, akan tetapi kecepatan yang dibutuhkan untuk mencapai daya nominalnya juga lebih tinggi yaitu 17 m/s. Secara umum, turbin angin yang diproduksi memiliki kecepatan cut in 2 m/s. Dari kecepatan cut in dan rated ini maka nantinya dapat dilakukan pemetaan potensi teknologi turbin angin.

#### 4.2 Komparasi Turbin Angin dengan Perhitungan Nilai Cp

Dari referensi spesifikasi yang didapatkan, maka dihitung nilai *Coefficient of Performance* ( $C_p$ ) tiap-tiap jenis teknologi turbin angin. Nilai  $C_p$  dihitung pada kondisi maksimal, yaitu pada saat daya dan kecepatan angin nominal tercapai. Nilai  $C_p$  dihitung menggunakan persamaan :

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho AV^3} \quad (4.1)$$

dimana

$P$  = keluaran daya turbin angin, (Watt)

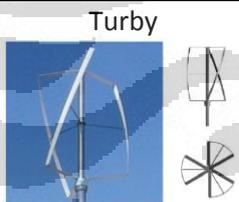
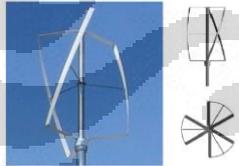
$\rho$  = densitas udara (1,23 kg/m<sup>3</sup>),

$A$  = luas area tangkap turbin angin (m<sup>2</sup>), dan

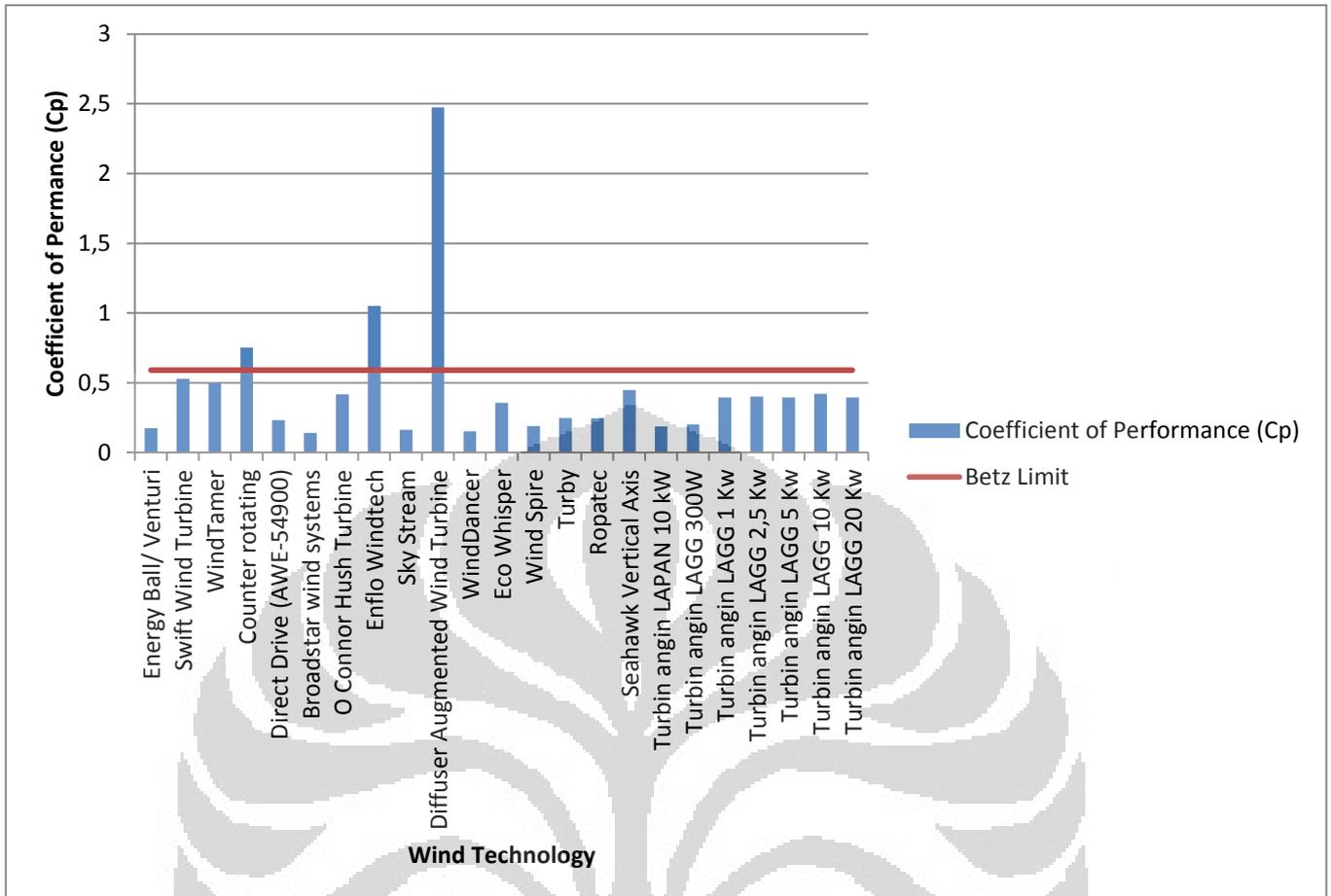
$V$  = kecepatan angin (m/s)

Tabel 4.3. Nilai Cp tiap-tiap jenis teknologi turbin angin

No	Wind Technology	Coefficient of Performance (Cp)	No	Wind Technology	Coefficient of Performance (Cp)
1	Energy Ball/ Venturi 	0,17	9	Broadstar wind systems 	0,14
2	Swift Wind Turbine 	0,53	10	O Connor Hush Turbine 	0,42

3	<p>WindTamer</p> 	0,50	11	<p>Seahawk Vertical Axis</p> 	0,45
4	<p>Counter rotating</p> 	0,75	12	<p>Enflo Windtech</p> 	1,05
5	<p>Savonius</p> 	0,41	13	<p>Sky Stream</p> 	0,16
6	<p>Turby</p> 	0,28	14	<p>WindDancer</p> 	0,15
7	<p>Ropatec</p> 	0,42	15	<p>Eco Whisper</p> 	0,38
8	<p>Direct Drive (AWE-54900)</p> 	0,23	16	<p>Diffuser Augmented Wind Turbine - AWR</p> 	2,47

Dari nilai  $C_p$  yang sudah dihitung dan didapatkan, maka dapat diperoleh grafik perbandingan nilai  $C_p$  tiap-tiap jenis teknologi :



Ket : untuk turbin angin LAPAN dan LAGG masuk ke dalam kategori turbin angin konvensional

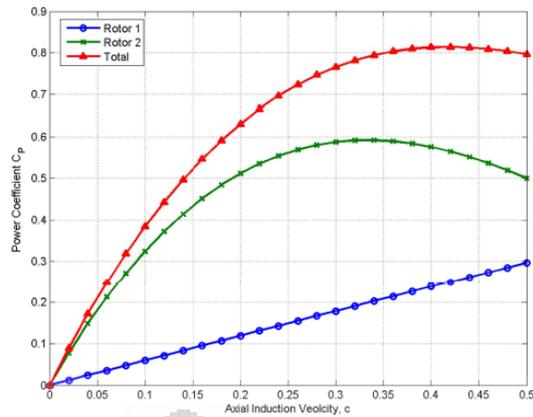
Gambar 4.3. Grafik nilai  $C_p$  tiap jenis teknologi

Dari grafik yang dihasilkan, maka dapat dilihat bahwa turbin angin *counter rotating* dan *enflo windtech* memiliki nilai  $C_p$  yang jauh lebih tinggi di antara para kompetitornya. Hal ini dapat saja terjadi karena beberapa alasan berikut :

#### Untuk counter rotating

*Counter rotating* menggunakan dua buah rotor yang bergerak secara berlawanan. Hal ini tentu saja membuat nilai  $C_p$  maksimum Betz limit tidak lagi dapat diberlakukan karena Betz limit hanya berlaku untuk turbin angin dengan rotor tunggal.





Gambar 4.6. Grafik perbandingan nilai  $C_{p\text{total}}$

Dengan demikian, maka turbin angin counter rotating memang memiliki nilai  $C_p$  yang melebihi Betz Limit.

#### Untuk *enflo windtech* dan DAWT-AWR

Pada *enflo windtech* dan DAWT-AWR, turbin menggunakan selubung berbentuk diffuser yang dapat berfungsi untuk mempercepat aliran udara. Pada perhitungan nilai  $C_p$ , nilai kecepatan angin yang digunakan adalah kecepatan free stream. Dengan adanya diffuser, maka tentu saja secara signifikan dapat mempengaruhi nilai  $C_p$  karena kecepatan angin yang melalui turbin lebih meningkat dibandingkan dengan kecepatan free stream. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Van Bussel mengenai DAWT (dapat dilihat pada gambar 2.5).

Pada penelitian yang dilakukan oleh Van Bussel, dikatakan bahwa perbandingan antara kecepatan di sisi masuk dan sisi keluar diffuser sebanding dengan rasio luas penampang diffuser.

$$V_1 = \beta V_3$$

Dimana

$V_1$  = kecepatan di sisi masuk diffuser

$V_3$  = kecepatan di sisi keluar diffuser

$\beta$  = rasio luas penampang

Secara teoritis, maka kecepatan aliran yang melalui sisi masuk diffuser dapat dihitung dengan melalui pendekatan :

- $C_{pmax} = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho AV^3}$
- $0,593 = \frac{500}{\frac{1}{2}(1,23)(0,4)V^3}$
- $V = 15,1 \text{ m/s}$

Dari kecepatan aliran ini, maka dengan menggunakan teori Van Bussel, maka dapat dicari rasio luas penampang diffuser, dengan menggunakan pendekatan bahwa kecepatan di sisi keluar diffuser sama dengan kecepatan free stream :

- $V_1 = \beta V_3$
- $15,1 = 12,5\beta$
- $\beta = 1,208$

Dari rasio luas penampang diffuser, maka dapat dicari dimensi penampang di sisi keluar diffuser :

- $\beta = A_3/A_1$
- $A_3 = 1,208 \cdot A_1$
- $0,48 \text{ m}^2$

Dari luas penampang tersebut maka secara teoritis dapat diketahui bahwa diameter penampang di sisi keluar diffuser yaitu sebesar 0,8 meter.

Jadi, turbin angin *enflo windtech* dan DAWT memang mungkin memiliki nilai  $C_p$  yang melebihi Betz Limit, karena perhitungan nilai  $C_p$  dilakukan dengan menggunakan kecepatan free stream, bukan kecepatan yang melewati sisi masuk diffuser.

### 4.3 Komparasi Turbin Angin dengan Perhitungan *Power per Unit Length*

Dalam melakukan komparasi terhadap jenis-jenis turbin angin, selain membandingkan nilai  $C_p$ , juga dapat dilakukan perbandingan terhadap nilai *power per unit length* (P/L). Dimana P adalah daya yang dihasilkan turbin dan L adalah panjang penampang blade yang menghadap angin. Nilai P/L ini menunjukkan besarnya daya yang dihasilkan oleh turbin per satuan panjang

penampang rotor. Dalam jurnal yang ditulis oleh Jean-Luc Menet yang berjudul “*A comparative calculation of the wind turbines capacities on the basis of the  $L - \sigma$  criterion*”, dijelaskan bahwa nilai *power per unit length* dapat dihitung melalui persamaan berikut.

#### Untuk HAWT

Berdasarkan persamaan 4.1 sebelumnya, maka daya turbin HAWT dapat dihitung dengan rumus [42] :

$$P = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot (\pi R^2) \cdot V^3 \quad (4.2)$$

Panjang penampang turbin angin yang menghadap angin adalah  $L = 2R$ , sehingga nilai daya per satuan panjang dapat dihitung dengan rumus :

$$P/L = \frac{1}{4} C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R \cdot V^3 \quad (4.3)$$

#### Untuk VAWT

Berdasarkan persamaan 4.1 sebelumnya, maka daya turbin VAWT dapat dihitung dengan rumus [42] :

$$P = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot (2RH) \cdot V^3 \quad (4.4)$$

dimana H adalah tinggi rotor turbin.

Panjang penampang turbin angin yang menghadap angin adalah  $L = 2R$ , sehingga nilai daya per satuan panjang dapat dihitung dengan rumus :

$$P/L = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot H \cdot V^3 \quad (4.5)$$

Setelah dilakukan perhitungan nilai P/L, maka nilai P/L tadi dirubah menjadi bilangan non dimensional, sehingga dapat dilakukan perbandingan terhadap jenis-jenis turbin yang lain. Dari data yang sudah diolah maka ditampilkan hasil pengolahan data pada tabel di bawah ini.

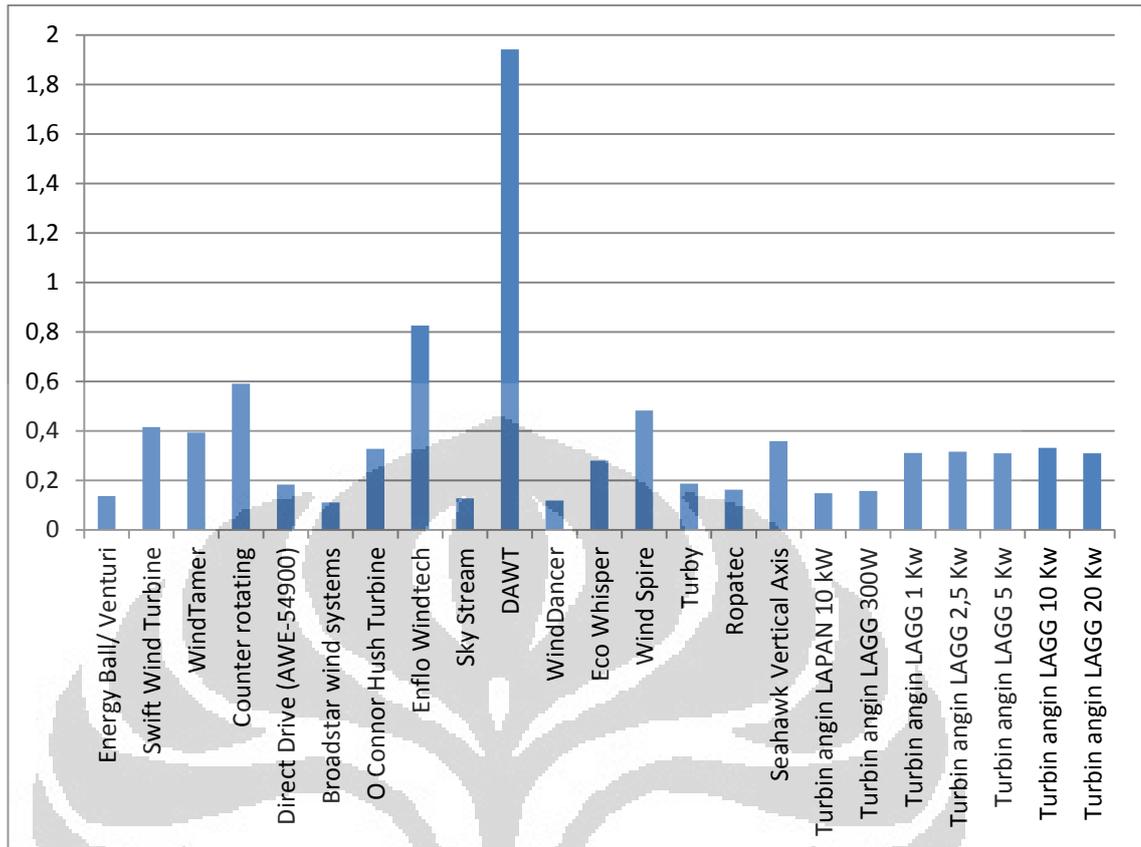
Tabel 4.4. Perbandingan nilai *power per unit length* untuk turbin angin HAWT

No	Wind Technology	Rotor Diameter (m)	Rated wind speed (m/s)	Rated Power (kW)	Swept Area (m <sup>2</sup> )	P/L	$\frac{\dot{P}}{\rho \cdot R \cdot V^3}$
1	Energy Ball/ Venturi	1,1	17	0,5	0,95	909,09	0,14
2	Swift Wind Turbine	2,1	11	1,5	3,46	1428,57	0,42
3	WindTamer	1,4	14	1,3	1,54	1857,14	0,39
4	Counter rotating	4,4	8	3,6	15,20	1636,36	0,59
5	Direct Drive (AWE-51000)	54	14	900	2289,06	33333,33	0,18
6	Broadstar wind systems	3,05	13,5	10	46,63	1026,24	0,11
7	O Connor Hush Turbine	1	15	0,68	0,79	1360,00	0,33
8	Enflo Windtech	0,71	12,5	0,5	0,40	1408,45	0,83
9	Sky Stream	3,72	13	2,4	10,86	1290,32	0,13
10	DAWT	1,83	6,3	1	2,63	1092,90	1,94
11	WindDancer	2,98	17	3,2	6,97	2147,65	0,12
12	Eco Whisper	6,5	14	20	33,17	6153,85	0,28
13	Turbin angin LAPAN 10	7	12,4	8,5	38,47	2428,57	0,15
14	Turbin angin LAGG	3	7	0,3	7,07	200,00	0,16
15	Turbin angin LAGG 1	3	8,35	1	7,07	666,67	0,31
16	Turbin angin LAGG 2,5	4,7	8,35	2,5	17,34	1063,83	0,32
17	Turbin angin LAGG 5	6	9	5	28,26	1666,67	0,31
18	Turbin angin LAGG 10	8,2	9	10	52,78	2439,02	0,33
19	Turbin angin LAGG 20	12	9	20	113,04	3333,33	0,31

Tabel 4.5. Perbandingan nilai *power per unit length* untuk turbin angin VAWT

No	Wind Technology	Rotor Diameter (m)	Rotor Height	Rated wind speed (m/s)	Rated Power (Kw)	Swept Area	P/L (W/m)	$\frac{\dot{P}}{\rho \cdot R \cdot V^3}$
1	Wind Spire	1,2	6,1	11,2	1,2	7,32	1000	0,48
2	Turby	0,25	21,2	14	2,5	5,3	10000	0,19
3	Ropatec	3,3	4,4	14	6	14,52	1818,182	0,16
4	Seahawk Vertical Axis	0,762	1,22	12,5	0,5	0,929	656,168	0,36

Dari pengolahan data dan tabel yang ditampilkan di atas, maka diperoleh grafik perbandingan.



Ket : untuk turbin angin LAPAN dan LAGG masuk ke dalam kategori turbin angin konvensional

Gambar 4.7. Grafik perbandingan power per unit length tiap jenis turbin

Dari grafik yang dihasilkan, maka dapat dilihat bahwa turbin angin dengan teknologi selubung diffuser masih lebih baik dibandingkan jenis turbin lainnya. Hal ini membuat teknologi ini memiliki keuntungan apabila diaplikasikan di pemukiman. Karena dengan nilai power per unit length yang besar, maka dimensi turbin dapat dibuat lebih ringkas dan tidak mengganggu tata ruang kota, namun tetap dapat menghasilkan daya yang besar.

## 4.4 Simulasi

### 4.4.1 Simulasi Selubung Diffuser

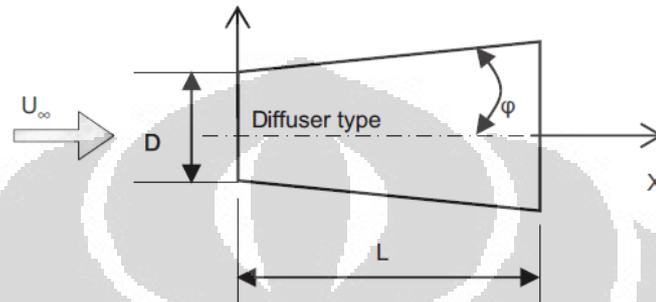
Sebelum dilakukan simulasi, sebelumnya dilakukan pemodelan geometri dan ukuran dari diffuser itu sendiri. Pemodelan dilakukan dengan mempertimbangkan penelitian tentang desain selubung yang optimal untuk daerah

pemukiman yang dilakukan oleh rekan setim saya. Model dan ukuran diffuser ditentukan dengan menggunakan spesifikasi sebagai berikut :

$$D = 800 \text{ mm}$$

$$L/D = 1,25$$

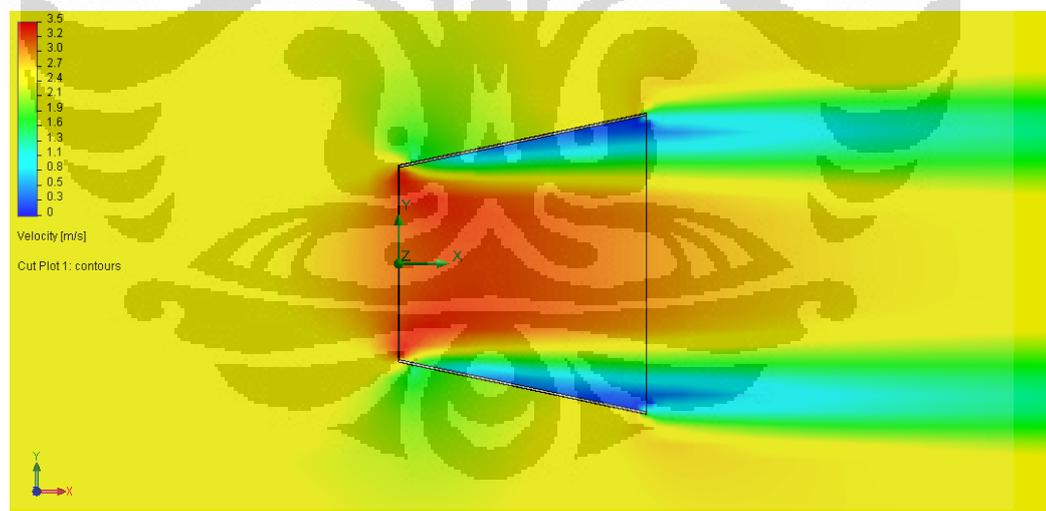
$$\varphi = 12^\circ$$



Gambar 4.8. Konsep dan geometri DAWT

Simulasi dilakukan dengan input parameter kecepatan free stream sebesar 2,5 m/s.

### Hasil Simulasi



Gambar 4.9. Distribusi kecepatan di dalam selubung diffuser

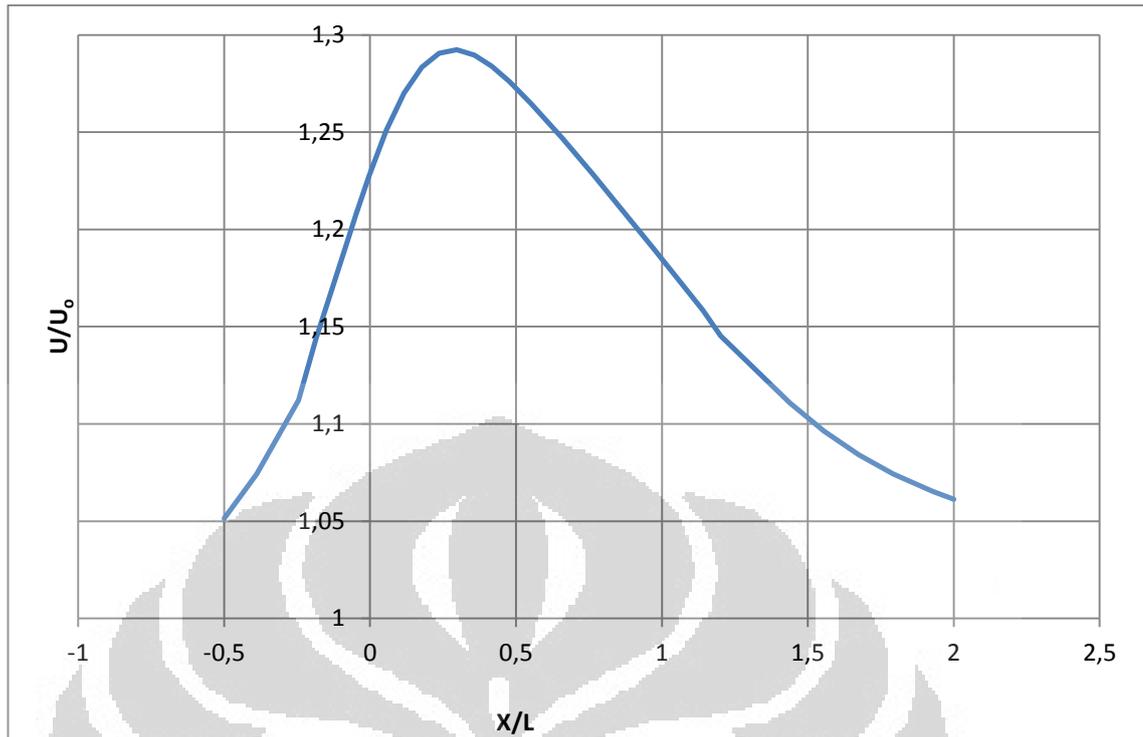
Dari hasil simulasi yang didapatkan, maka dibuat plot grafik kecepatan di titik tertentu di sepanjang centerline diffuser. Data-data yang diolah berupa parameter-parameter  $X/L$ ,  $U/U_0$ , dan kecepatan. Dimana  $X/L$  merupakan rasio posisi titik tertentu dengan panjang diffuser (0 terletak di sisi masuk diffuser dan 1

terletak di sisi keluar diffuser) dan  $U_0/U$  adalah rasio kecepatan di titik tertentu dengan kecepatan free stream.

Tabel 4.6. Distribusi kecepatan di sepanjang centerline diffuser

X/L	Velocity (m/s)	U/U <sub>0</sub>
-0,50	2,63	1,05
-0,39	2,69	1,07
-0,24	2,78	1,11
-0,18	2,86	1,14
-0,08	2,98	1,19
-0,05	3,02	1,21
0,00	3,07	1,23
0,06	3,13	1,25
0,12	3,18	1,27
0,18	3,21	1,28
0,24	3,23	1,29
0,30	3,23	1,29
0,36	3,22	1,29
0,42	3,21	1,28
0,48	3,19	1,28
0,55	3,16	1,26
0,66	3,12	1,25
0,76	3,07	1,23
0,98	2,97	1,19
1,14	2,90	1,16
1,20	2,86	1,15
1,44	2,78	1,11
1,56	2,74	1,10
1,67	2,71	1,08
1,79	2,69	1,07
1,93	2,66	1,07
2,00	2,65	1,06

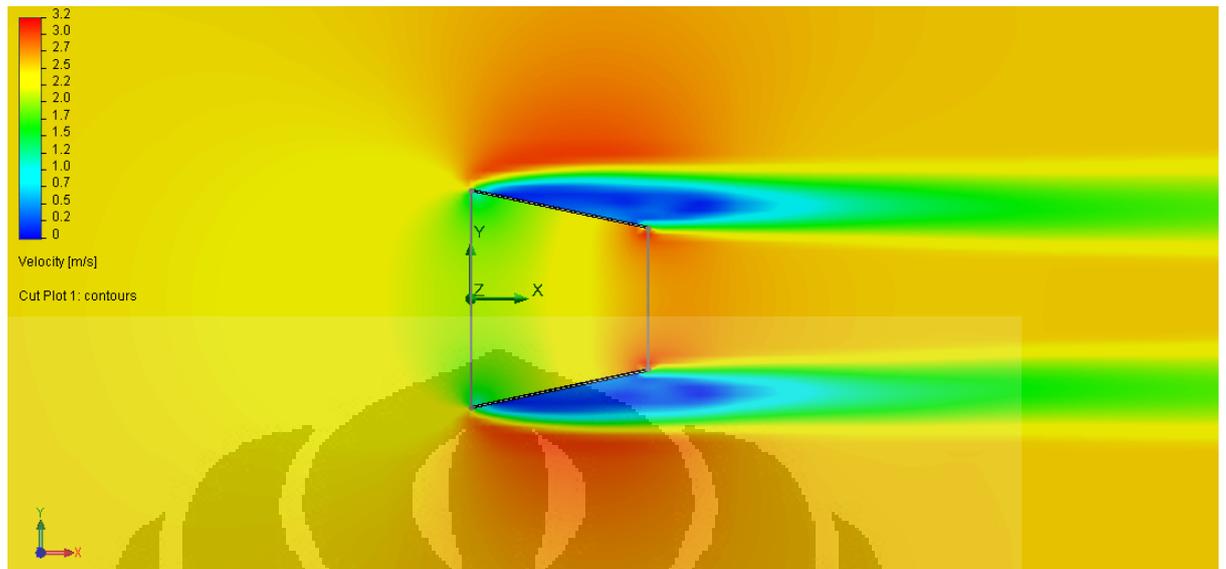
Dari data yang telah diolah, maka dapat diperoleh grafik



Gambar 4.10. Grafik distribusi kecepatan pada centerline diffuser

Dari grafik yang dihasilkan, maka dapat dilihat bahwa kecepatan di sisi masuk diffuser meningkat secara drastis, yaitu pada rasio  $X/L$  -0,25 sampai 0,25. Kecepatan tertinggi berada pada  $X/L$  0,25 dengan nilai kecepatan 3,23 m/s. Kecepatan yang dihasilkan mencapai 1,3 kali kecepatan free stream. Peningkatan kecepatan ini akan berpengaruh secara signifikan terhadap daya keluaran turbin angin yang dihasilkan, karena daya keluaran turbin angin nilainya berbanding lurus dengan nilai pangkat tiga kecepatan angin yang melalui rotor.

#### 4.4.2 Simulasi Selubung Nozzle



Gambar 4.11. Distribusi kecepatan di dalam selubung nozzle

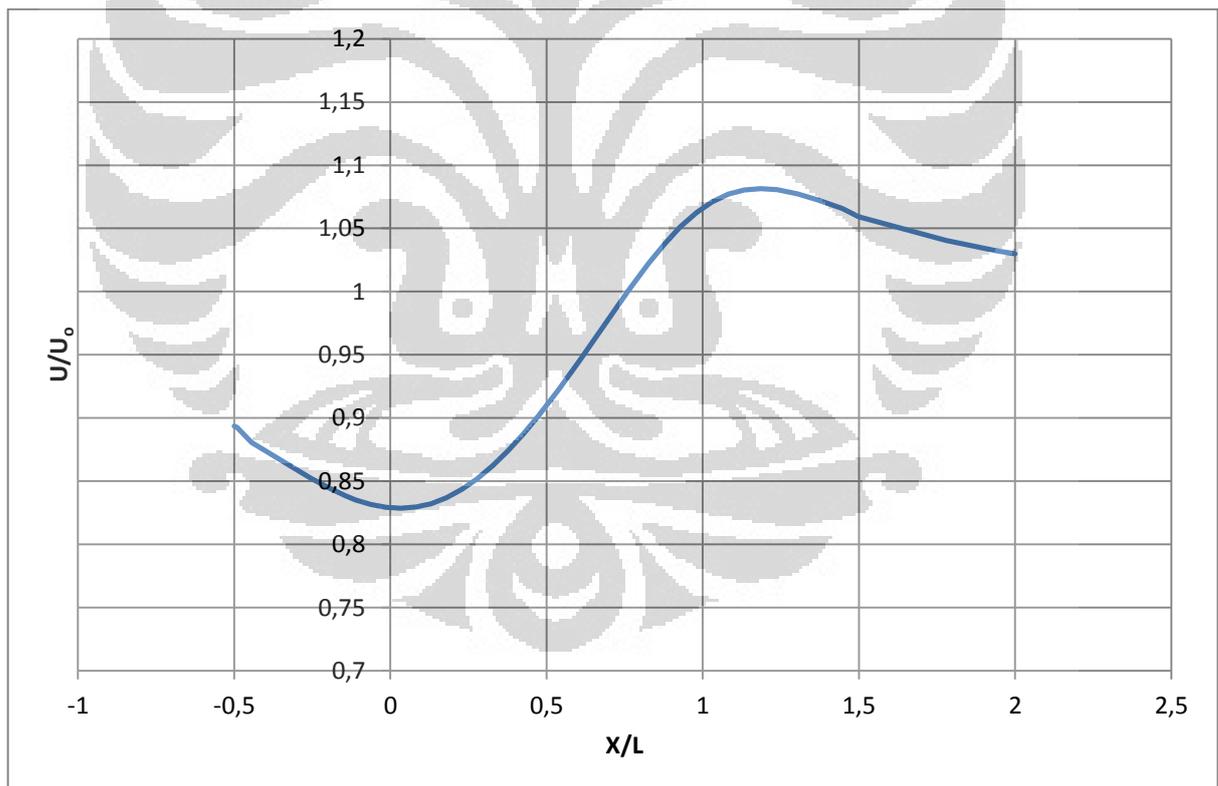
Seperti pada pengolahan data diffuser, maka dibuat plot grafik kecepatan di titik tertentu di sepanjang centerline diffuser. Data-data yang diolah berupa parameter-parameter  $X/L$ ,  $U/U_0$ , dan kecepatan.

Tabel 4.7. Distribusi kecepatan di sepanjang centerline nozzle

$X/L$	Velocity	$U/U_0$
-0,50	2,23	0,89
-0,49	2,23	0,89
-0,44	2,20	0,88
-0,25	2,13	0,85
-0,19	2,11	0,84
-0,14	2,10	0,84
-0,11	2,09	0,84
-0,06	2,08	0,83
-0,01	2,07	0,83
0,03	2,07	0,83
0,08	2,07	0,83
0,13	2,08	0,83
0,18	2,09	0,84
0,23	2,11	0,84
0,28	2,13	0,85
0,33	2,16	0,86
0,38	2,19	0,87
0,43	2,22	0,89
0,48	2,26	0,90
0,54	2,31	0,92
0,61	2,37	0,95

0,76	2,50	1,00
0,83	2,56	1,02
0,88	2,59	1,04
0,93	2,63	1,05
0,98	2,66	1,06
1,03	2,68	1,07
1,08	2,69	1,08
1,13	2,70	1,08
1,19	2,70	1,08
1,24	2,70	1,08
1,30	2,69	1,08
1,37	2,68	1,07
1,45	2,66	1,07
1,50	2,65	1,06
1,78	2,60	1,04
1,94	2,58	1,03
2,00	2,57	1,03

Dari data yang telah diolah, maka dapat diperoleh grafik

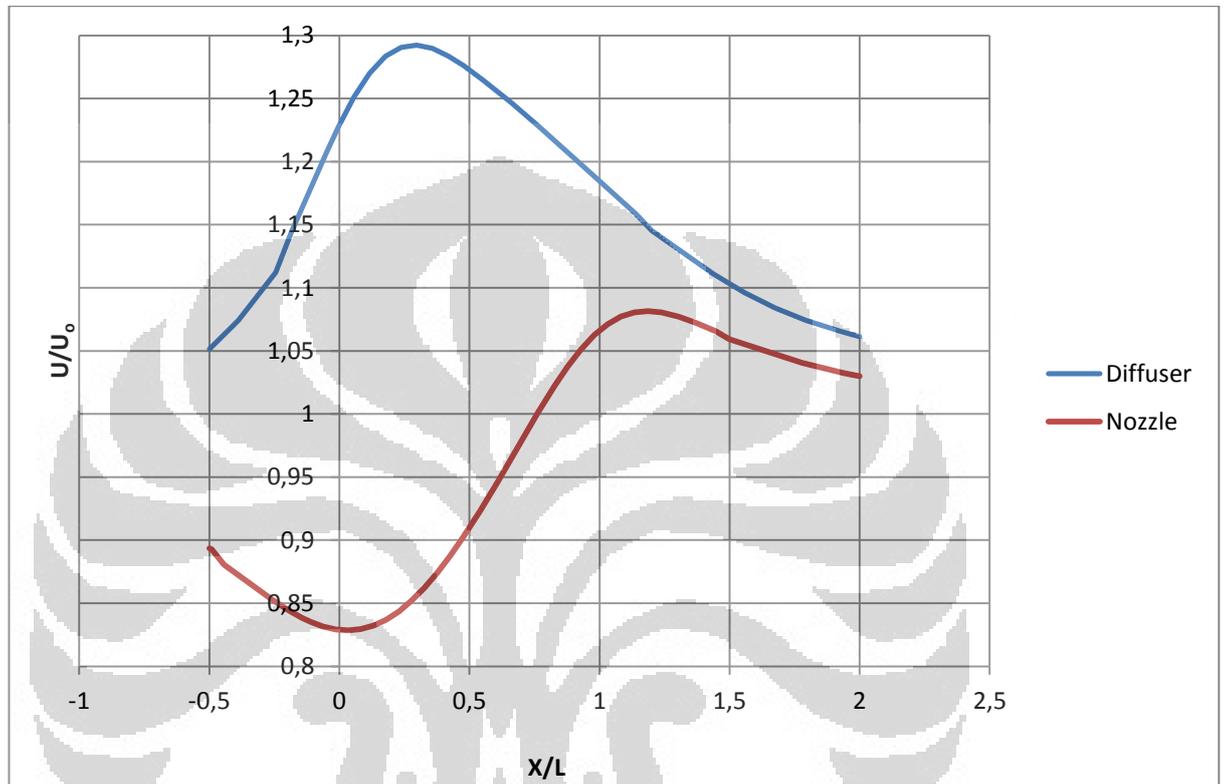


Gambar 4.12. Grafik distribusi kecepatan di dalam selubung nozzle

Dari grafik yang dihasilkan, maka dapat dilihat bahwa kecepatan di sisi masuk diffuser menurun. Hal ini karena bentuk penampang nozzle memiliki

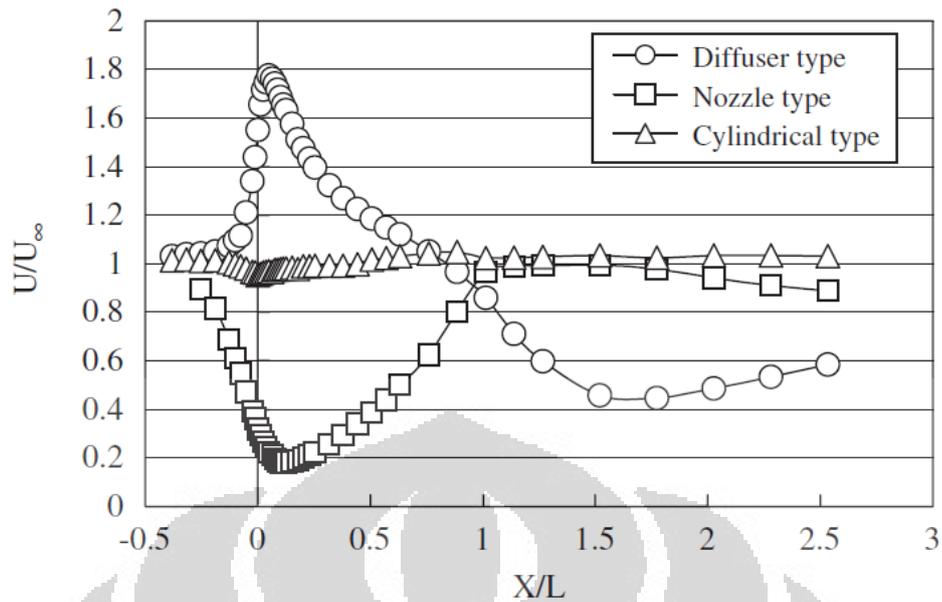
luasan area yang menyempit sehingga kecepatan angin tertahan di dinding-dinding selubung. Kecepatan kembali naik di sisi keluar diffuser. Kecepatan di sisi keluar diffuser yaitu sebesar 2,68 m/s atau 1,07 kali kecepatan free stream.

#### 4.4.3 Perbandingan karakteristik kecepatan diffuser dan nozzle



Gambar 4.13. Perbandingan karakteristik distribusi kecepatan diffuser dan nozzle

Grafik diatas menunjukkan hubungan antara rasio kecepatan yang tercapai ti titik tertentu dengan kecepatan free stream dan rasio X/L di centerline diffuser. Dari grafik maka dapat dilihat bahwa untuk aplikasi pada turbin angin, selubung jenis diffuser lebih cocok digunakan karena kecepatan angin yang dihasilkan lebih besar. Selain itu, juga dapat dilihat bahwa penempatan rotor turbin angin untuk selubung jenis diffuser dan nozzle berbeda. Pada diffuser, penempatan rotor lebih baik di tempatkan di sisi masuk, sedangkan pada sisi nozzle penempatan rotor dapat dilakukan pada sisi keluar. Dari simulasi yang dilakukan dan grafik yang telah didapatkan, maka dilakukan perbandingan terhadap jurnal atau penelitian yang dilakukan oleh Yuji Ohya, dengan jurnalnya yang berjudul “*Development of a shrouded wind turbine with a flanged diffuser*”



Gambar 4.14. Perbandingan karakteristik kecepatan diffuser dan nozzle pada jurnal [40]

Dari kedua grafik diatas, maka dapat dilihat bahwa terdapat kesamaan atau kecocokan mengenai hasil yang didapatkan antara selubung jenis diffuser dan nozzle. Pada jurnal yang dilakukan oleh Ohya, rasio L/D diffuser yang digunakan yaitu sebesar 2,5, sedangkan yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu sebesar 1,25. Namun secara umum, hasil yang didapatkan memiliki karakteristik yang sama, dimana pada diffuser kecepatan meningkat secara drastis di sisi masuk, berlawanan dengan sifat di sisi masuk nozzle.

#### 4.4.4 Perhitungan Daya Maksimum

Untuk mendapatkan besarnya daya maksimum yang dapat tersedia apabila turbin tersebut menggunakan selubung pada daerah pemukiman, maka digunakan data spesifikasi turbin angin yang pernah dibuat oleh LAGG. Turbin angin yang masuk ke dalam skala mikro memiliki kapasitas terbesar sebesar 5 kW dengan diameter rotor sebesar 6 meter. Berikut merupakan spesifikasi dari turbin angin LAGG 5 kW :

- Rated Power : 5 kW

- Swept Area : 28,26 m<sup>2</sup>
- Cut in speed : 2,5 m/s
- Rated wind speed : 9 m/s
- Rotor diameter : 6 meter
- Cp : 0,39

Dari hasil simulasi yang dilakukan dan spesifikasi yang didapatkan, maka dapat dihitung besarnya daya yang mampu dihasilkan oleh turbin angin untuk pemukiman (skala mikro). Jika turbin tersebut ditambahkan diffuser, maka daya yang dihasilkan :

U free stream : 9 m/s

U di inlet diffuser : 11,7 m/s

$$P = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot A \cdot U^3$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot 0,39 \cdot \rho \cdot 28,26 \cdot 11,7^3$$

$$P = 10.855 \text{ watt}$$

Jadi, besarnya daya yang dapat dihasilkan untuk turbin skala pemukiman jika turbin tersebut menggunakan diffuser adalah sebesar 10 kW.

Untuk tinggi tower, tergantung dari letak dan kondisi setempat. Pada desain turbin angin skala kecil, turbin angin harus berada 9 meter lebih tinggi dari bangunan sekitar.

## 4.5 Karakteristik Kerja Masing-masing Turbin Angin

### 4.5.1 Energy Ball/ Venturi

Dari referensi yang didapatkan, maka dapat dikatakan bahwa turbin angin Venturi cukup ideal untuk dipasang di daerah pemukiman. Turbin ini memiliki karakteristik tidak bising ketika beroperasi sehingga tidak menimbulkan polusi suara [28]. Faktor yang lainnya adalah karena dimensinya yang kecil dengan rotor diameter 1,1 m, sehingga tidak mempengaruhi tata ruang kota. Akan tetapi, melihat keadaan geografis di Indonesia, turbin ini juga sulit untuk mencapai daya

nominalnya. Walaupun kecepatan cut in turbin ini rendah (2 m/s), namun untuk mencapai daya nominal turbin ini yang hanya sebesar 500 watt, dibutuhkan angin dengan kecepatan 17 m/s. Sehingga akan lebih baik apabila turbin ini dibangun dalam jumlah yang banyak atau berjejer dalam suatu pemukiman.



Gambar 4.15. Turbin angin Energy Ball di daerah pemukiman [27]

#### 4.5.2 Swift Wind Turbine

Turbin angin Swift memiliki struktur tiang yang bersifat mountable sehingga pemasangan dapat dilakukan dengan mudah. Turbin dipasang pada mounting yang terdapat pada tiang aluminium dengan jarak terdekat blade dengan atap yaitu sekitar 2 kaki untuk faktor keamanan. Pada swift wind turbine ini juga terdapat diffuser yang berbentuk cincin di sekeliling rotor sehingga meminimalkan emisi suara yang dihasilkan, dan mencegah terjadinya vortisitas pada ujung blade [29]. Dilihat dari spesifikasinya, turbin ini memiliki nilai cut in dan rated yang lebih cocok untuk dataran Eropa.



Gambar 4.16. Swift Wind Turbine [28]

### 4.5.3 Wind Tamer

WindTamer Turbine dibuat oleh sebuah perusahaan bernama WindTamer Corporation yang berlokasi di bagian utara New York. Teknologi dan prototipe dari turbin ini dikembangkan, dipasang, dan disempurnakan di Clarkson University di Potsdam, New York. Dalam referensi disebutkan bahwa turbin ini hampir tidak memiliki vibrasi ketika beroperasi dan tidak bising. Perusahaan mengklaim bahwa turbin ini juga dapat dipasang di atas atap bangunan yang memiliki luas area atap yang besar. Kelebihan-kelebihan yang dimiliki oleh turbin angin ini antara lain : tidak dibutuhkannya menara yang tinggi sehingga mengurangi biaya instalasi, dapat menghasilkan daya keluaran dua kali lebih besar dibandingkan dengan turbin angin konvensional, dapat dipasang pada atap suatu bangunan, dan tidak bising ketika beroperasi sehingga lebih ramah lingkungan.



Gambar 4.17. *WindTamer Turbine* [29]

Dilihat dari spesifikasinya, turbin ini dapat menghasilkan daya dari kecepatan angin yang rendah (2 m/s), akan tetapi untuk mencapai daya nominalnya juga dibutuhkan kecepatan angin yang tinggi (14 m/s). Hal ini karena turbin tersebut dirancang sesuai dengan kondisi dan potensi angin di wilayah setempat sehingga apabila diaplikasikan di Indonesia, diperlukan beberapa penyesuaian sehingga daya nominal turbin dapat tercapai pada kondisi kecepatan angin yang lebih rendah.

#### 4.5.4 Counter Rotating

Satu hal yang membuat turbin ini terlihat berbeda dari turbin angin lainnya adalah rotornya yang berjumlah dua buah. Ketika berputar, kedua buah rotor ini bergerak secara berlawanan. Sebuah turbin angin dengan rotor tunggal akan menghasilkan aliran udara tangensial yang energinya dapat terbuang sia-sia tanpa dapat memanfaatkannya kembali. Untuk menggunakan energi yang terbuang tersebut, penempatan rotor kedua di belakang rotor pertama diperlukan sehingga aliran udara rotasional yang dihasilkan oleh rotor pertama dapat dimanfaatkan kembali sehingga dapat meningkatkan efisiensi dari turbin itu sendiri. Pemanfaatan energi angin dengan counter-rotation wind turbine ini dapat meningkatkan perolehan energi 40% lebih besar pada suatu luasan area angin dibandingkan dengan sistem rotor tunggal. Counter-rotating wind turbine dapat digunakan untuk meningkatkan kecepatan rotasi dari generator listrik.



Gambar 4.18. Counter-rotating wind turbine (double rotors) [30]

Dilihat dari spesifikasinya, turbin ini memiliki karakteristik yang sangat baik karena memiliki kecepatan cut in yang relatif rendah (2,5 m/s). Selain itu, daya nominalnya juga dapat dicapai dengan kondisi kecepatan angin yang tidak terlalu tinggi yaitu dengan kecepatan rated 8 m/s. Hal ini tentu saja dapat saja menjadi daya tarik tersendiri karena cukup cocok untuk diaplikasikan di wilayah Indonesia. Akan tetapi, ada faktor lain yang perlu dipertimbangkan mengingat turbin ini memiliki dimensi yang cukup besar apabila diaplikasikan di wilayah pemukiman.

#### 4.5.5 Direct Drive

Pada direct drive technology, jumlah komponen yang digunakan telah banyak diminimalisir. Rotor dan generator berputar sebagai satu kesatuan yang

terintegrasi, didukung oleh sistem bearing tunggal (single bearing system). Generator berputar dengan kecepatan 25-30 rpm, tidak seperti turbin angin biasa yang menggunakan gearbox yang berputar dengan kecepatan 900 rpm.



Gambar 4.19. AWE-54900 [31]

Keuntungan dalam teknologi direct drive :

- Tidak ada vibrasi gearbox, sehingga tidak menghasilkan kebisingan dan meminimalisir stress pada pondasi menara
- Frekuensi maintenance dapat dikurangi sehingga lebih hemat secara finansial
- Lebih efisien sehingga daya keluaran tahunan lebih besar
- Umur komponen yang panjang

#### 4.5.6 Broadstar Wind System

Turbin ini memiliki nilai cut in yang rendah dibandingkan dengan turbin angin lainnya (1,8 m/s). Namun dengan bentuk geometri yang kompleks dan jumlah sudu yang banyak, turbin ini lebih sulit untuk dimanufaktur.



Gambar 4.20. Broadstar wind turbine [32]

#### 4.5.7 O Connor Hush Turbine

Turbin ini dibuat oleh seorang berkebangsaan Australia bernama Arthur O'Connor yang telah dipatenkan secara internasional. Desain turbin ini sangat tenang, memiliki toleransi kecepatan angin yang tinggi, dapat beroperasi pada kecepatan yang rendah, dan biaya untuk infrastrukturnya sebanding dengan grid energy cost untuk aplikasi pada perumahan dan komersial. Karakteristik dari turbin angin ini diantaranya :

- Cocok untuk aplikasi perumahan
- Dapat beroperasi secara efisien pada kecepatan angin yang rendah
- Desain yang berkualitas tinggi sehingga mengurangi biaya pemeliharaan
- Dibangun untuk menahan kondisi angin yang ekstrim



Gambar 4.21. Hush Turbine [33]

#### 4.5.8 Enflo Windtech

Enflo windtech memiliki desain selubung berbentuk diffuser di sekitar rotornya, seperti halnya pada turbin angin Windtamer. Namun pada turbin ini dilengkapi dengan mekanisme yaw/ pointing untuk menyesuaikan arah angin.

Dilihat dari spesifikasinya, maka turbin ini dapat dikatakan memiliki nilai cut in dan rated yang tidak berbeda jauh dibandingkan dengan turbin lainnya. Akan tetapi, turbin ini memiliki karakteristik yang unik karena dengan luas area sapu angin yang kecil, turbin tersebut dapat menghasilkan daya keluaran yang cukup besar (0,5 kW).



Gambar 4.22. Enflo Windtech [34]

#### 4.5.9 Sky Stream

Turbin ini memiliki nilai cut in speed yang cukup tinggi bila dibandingkan dengan jenis turbin lainnya. Dengan bentuk sudu turbin angin yang kompleks, maka turbin ini lebih sulit dimanufaktur dibandingkan dengan turbin lainnya. Secara umum, karakteristik kerja dari turbin ini lebih diperuntukkan untuk daerah Eropa.



Gambar 4.23. Turbin angin Sky Stream [35]

#### 4.5.10 Diffuser Augmented Wind Turbine (AWR Energy)

Dari referensi yang didapatkan, turbin DAWT ini memiliki spesifikasi kecepatan rated yang rendah, yaitu sebesar 6,9 m/s. Turbin ini memiliki selubung berbentuk diffuser yang berfungsi untuk mempercepat aliran angin yang melalui selubung. Dari simulasi yang dilakukan terhadap model selubung diffuser, maka turbin ini memiliki efisiensi yang sangat baik karena dapat mempercepat

kecepatan angin hingga 1,3 kali lebih besar. Selain itu, dengan adanya selubung juga membuat putaran rotor turbin tidak bising sehingga tidak menimbulkan polusi suara. Turbin ini dapat dijadikan pilihan yang cukup baik untuk daerah pemukiman.



Gambar 4.24. Diffuser Augmented Wind Turbine (AWR Energy) [36]

#### 4.5.11 Wind Dancer

Turbin ini memiliki karakteristik yang cukup unik, yaitu dapat menghasilkan daya pada kecepatan angin yang sangat rendah yaitu 1 m/s. Akan tetapi, untuk mencapai daya nominalnya, turbin ini juga membutuhkan kecepatan angin yang tinggi (17 m/s). Turbin ini memiliki blade berbentuk airfoil yang bentuk penampangnya mirip seperti sayap kupu-kupu. Dilihat dari spesifikasinya, maka turbin ini dapat saja diletakkan pada tempat yang kondisi kecepatannya rendah, namun dengan daya keluaran yang sangat kecil (tidak maksimal).



Gambar 4.25. Winddancer turbine [37]

#### 4.5.12 Eco Whisper

Secara umum, dilihat dari spesifikasinya, maka turbin ini akan lebih cocok ditempatkan pada kondisi daerah yang kecepatan anginnya tinggi. Turbin ini memiliki kecepatan cut in 3,5 m/s dan kecepatan rated 14 m/s. satu hal yang membuat turbin ini terlihat berbeda diantara turbin lainnya adalah bladenya yang berjumlah 30 buah yang membentuk sebuah parabola. Dari referensi yang didapatkan, turbin ini memiliki karakteristik tidak bising ketika beroperasi dan cukup handal digunakan dalam waktu yang lama.



Gambar 4.26. Eco Whisper turbine [38]

#### 4.5.13 Wind Spire

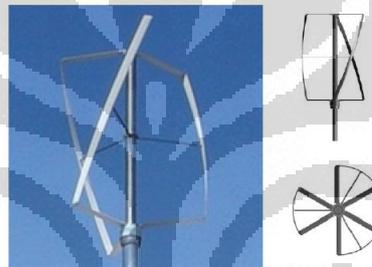
Turbin angin windspire memiliki tinggi 30ft dan radius rotor 2ft. Turbin ini dilengkapi generator efisiensi tinggi, integrated inverter, hinged monopole, dan wireless performance monitor. Desain vertikalnya yang ramping memungkinkan turbin beroperasi pada tip speed ratio (TSR) yang rendah. Secara umum, dilihat dari spesifikasinya, maka turbin ini kurang cocok digunakan di wilayah Indonesia karena nilai cut in speednya yang tinggi (4 m/s).



Gambar 4.27. Turbin angin windspire [39]

#### 4.5.14 Turby

Turbin ini didesain untuk lingkungan perkotaan. Vibrasi, tingkat kebisingan yang tinggi, dan efisiensi yang rendah merupakan karakteristik dari turbin Darrius disebabkan oleh aliran udara di sekitar blade. Sudut serang dijaga agar tetap dibawah  $20^{\circ}$ . Kecepatan rotasi dari turbin untuk semua bagian blade adalah konstan. Dalam turbin Darrius, jarak antara blade dan poros bervariasi mengikuti kecepatan yang bervariasi.



Gambar 4.28. Turby 3-bladed VAWT [39]

Konsep blade pada Turby ini didesain agar jarak antara shaft dan blade tetap. Untuk mengurangi getaran yang pasti terjadi, karena perubahan sudut serang antara  $-20$  sampai  $+20^{\circ}$ , mengakibatkan mechanical stress pada blade dua kali dalam satu putaran. Pengembangnya menggunakan 3 blade berbentuk heliks.



Gambar 4.29. Turby triple blade wind turbine design on top of a building [39]

#### 4.5.15 Ropatec

Dilihat dari bentuknya, maka turbin angin Ropatec dapat dikatakan sebagai gabungan/ hybrid dari turbin angin Darrieus dan Savonious. Sebuah panel sentral yang terletak di antara sayapnya berperan sebagai diffuser dan mengarahkan angin ke sayap, sehingga dapat memutar rotor pada kecepatan angin yang rendah.



Gambar 4.30. Hybrid Darrieus and Savonious Ropatec VAWT [39]

Dari spesifikasinya, kecepatan cut in turbin ini cukup rendah yaitu pada 2 m/s, dan secara umum sama dengan jenis teknologi lainnya. Kecepatan rated turbin ini yang sebesar 14 m/s tentu saja dapat menjadi nilai minus apabila turbin ini diaplikasikan di Indonesia. Akan tetapi, terdapat keuntungan yang dapat dipertimbangkan dalam memilih teknologi ini. Pada turbin Ropatec, tidak dibutuhkan menara yang tinggi untuk penempatan rotor turbin sehingga proses pembangunan dan perawatannya akan lebih mudah dibandingkan dengan turbin angin konvensional.

#### 4.5.16 Seahawk Vertical Axis

Secara umum, dilihat dari spesifikasinya, maka turbin ini akan lebih cocok ditempatkan pada kondisi daerah yang kecepatan anginnya tinggi. Turbin ini memiliki kecepatan cut in 3,1 m/s dan kecepatan rated 12,5 m/s. Dengan

konfigurasi VAWT, maka turbin ini memiliki keuntungan yang dapat dipertimbangkan dalam pemilihan turbin ini, yaitu tidak dibutuhkannya menara yang tinggi sehingga memudahkan proses pemasangan dan pemeliharaan.



Gambar 4.31. Seahawk Vertical Axis [39]

#### 4.5.17 Turbin Angin LAGG

Turbin angin LAGG merupakan turbin angin yang dibuat oleh BPPT di Indonesia. Turbin ini telah dipasang di beberapa wilayah di Indonesia, diantaranya di Garut, Baron – Yogyakarta, dan Belu – NTT. Secara umum, turbin ini sama seperti turbin HAWT lainnya, namun generatornya lebih disesuaikan dengan kondisi angin yang ada di Indonesia. Dilihat dari spesifikasinya, turbin ini memiliki rated wind speed yang rendah. Dengan rated wind speed yang rendah, maka daya nominal dari turbin ini dapat lebih mudah dicapai.



Gambar 4.32. Turbin angin LAGG [25]

## 4.6 Pemetaan Teknologi Turbin Angin

### 4.6.1 Hal-hal yang Perlu Dipertimbangkan dalam Pemilihan Turbin Angin

Dalam melakukan penentuan dan pemilihan turbin angin, terdapat beberapa aspek yang perlu dipertimbangkan. Menurut jurnal/ penelitian yang dilakukan oleh Sandra Eriksson yang berjudul “*Evaluation of different turbine concepts for wind power*”, aspek-aspek yang dapat dibandingkan dan dipertimbangkan tersebut diantaranya dari sisi desain, aerodinamika, lingkungan, dan aspek cost atau harga[]. Dalam jurnal tersebut dinyatakan bahwa walaupun VAWT memiliki efisiensi yang lebih kecil dibanding HAWT, namun pada beberapa aspek VAWT lebih unggul dibandingkan HAWT [43].

#### 4.6.1.1 Aspek Desain

Aspek desain merupakan aspek yang paling mencolok dan terlihat secara kasat mata. Dalam aspek desain sendiri terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi perbedaan masing-masing jenis turbin. Faktor tersebut diantaranya dapat dilihat dari sisi mekanisme pengarahannya, sumbu putar, mekanisme gearbox/ direct drive, konstruksi, struktur mekanik, dan ukuran.

- Mekanisme pengarahannya merupakan perbedaan paling mencolok antara HAWT dan VAWT. Pada VAWT, tidak dibutuhkan mekanisme pengarahannya dan turbin dapat menerima sumber tenaga angin dari berbagai arah. Dengan karakteristik tersebut, maka part pada VAWT lebih sedikit dan sederhana.
- Sumbu putar. Pada VAWT, generator dapat ditempatkan di bawah menara. Dengan konfigurasi ini, maka instalasi, pengoperasian, dan pemeliharaan turbin ini dapat lebih mudah dilakukan.
- Mekanisme gearbox/ direct drive. Turbin angin modern umumnya menggunakan mekanisme direct drive untuk rotornya. Dengan teknologi direct drive, maka keberadaan gearbox dapat diminimalisir dan turbin dapat lebih mudah merespon perubahan beban dan kecepatan angin.
- Konstruksi.

#### **4.6.1.2 Aspek Aerodinamis**

Performa kerja dari turbin angin tergantung dari koefisien dayanya,  $C_p$ , yang menyatakan seberapa banyak daya potensi angin yang dapat diserap oleh turbin angin. Koefisien daya maksimum teoritis dikenal dengan Betz Limit, seperti yang sudah dijelaskan pada landasan teori. Umumnya, turbin HAWT selama ini dikenal memiliki koefisien daya yang lebih besar dibandingkan VAWT. Hal ini karena turbin HAWT umumnya beroperasi dengan kecepatan putar yang lebih tinggi.

#### **4.6.1.3 Aspek Lingkungan**

Turbin angin yang diperuntukkan di pemukiman harus memperhatikan kenyamanan dan keamanan dalam aspek lingkungan. Polusi yang dihasilkan oleh turbin angin biasanya berupa polusi suara yang dapat mengganggu kenyamanan lingkungan. Suara itu sendiri biasanya berasal dari gerakan aerodinamis turbin itu sendiri yang dihasilkan oleh blade tip. Selain itu, suara juga dapat timbul dari komponen drive-train atau komponen berputar lainnya. Oleh karena itu, turbin angin yang diperuntukkan di pemukiman harus memperhatikan aspek kenyamanan lingkungan, terutama dari sisi suara.

#### **4.6.1.4 Aspek Biaya**

Biaya keseluruhan turbin angin terdiri dari biaya manufaktur, biaya persiapan tempat dan pemasangan, dan biaya pemeliharaan [43]. Menurut analisis yang dilakukan oleh Walters, VAWT sangat kompetitif dari segi biaya dibandingkan dengan HAWT [43]. Selain itu, dengan mempertimbangkan biaya pemeliharaan dan pengoperasian, maka dapat menjadi keuntungan bagi VAWT, karena generator VAWT terletak di bawah sedangkan pada HAWT lebih sulit dilakukan pemeliharaan karena letak generator di atas.

### **4.6.2 Data Potensi Angin**

Data potensi angin yang didapat yaitu berupa data sekunder yang didapat dari badan hukum pemerintah yang mengkaji potensi energi angin. Data tersebut

didapatkan dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). Berikut merupakan data potensi angin yang telah diolah oleh rekan setim penelitian saya :

Tabel 4.8. Data kecepatan angin tahun 2000-2007 [24]

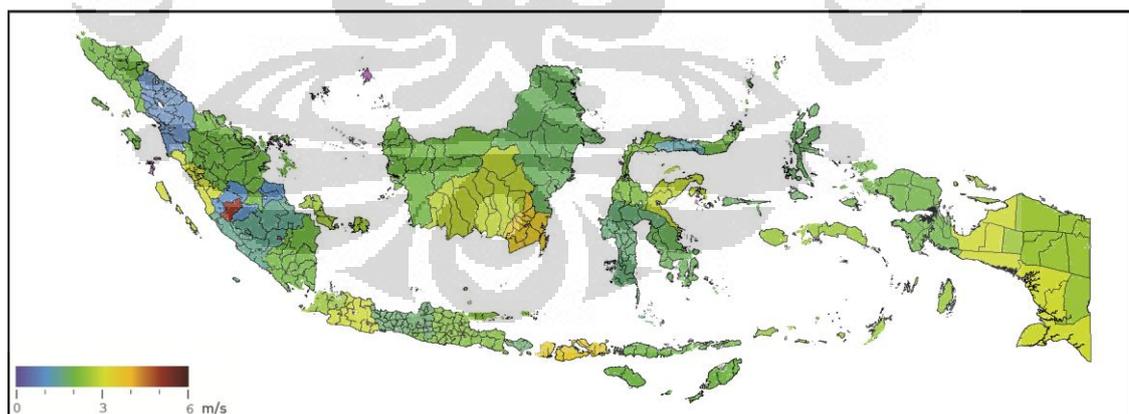
Area	Propinsi	Kota	Stasiun	Elevasi, m	Rata-rata kecepatan 2000-2007 (m/s)
Sumatera	Aceh	Banda Aceh	Blang Bintang	21	2,0
	Sumatera Utara	Medan	Polonia	27	1,4
	Sumatera Barat	Padang	Tabing Padang	2	3,1
	Riau	Pekanbaru	Simpang-Tiga	31	0,8
	Kepulauan Riau	Tanjung Pinang	Kijang	17	1,3
	Jambi	Jambi	Palmerah	26	2,6
	Sumatera Selatan	Palembang	Talang Betutu	11	1,4
	Bangka-Belitung	Pangkal Pinang	Pangkal-Pinang	33	2,6
	Bengkulu	Bengkulu	Padang Kemiling	15	1,7
	Lampung	Bandar Lampung	Astra Ksetra	19	2,4
	Jawa	DKI Jakarta	Jakarta	Cengkareng	9
Banten		Serang	Serang	26	2,5
Jawa Barat		Bandung	Ciledug	26	3,3
Jawa Tengah		Semarang	Cilacap	6	0,8
DI Yogyakarta		Yogyakarta	Wonocatur	63	2,2
Jawa Timur		Surabaya	Mojosari	28	2,5
Kepulauan Sunda Kecil	Bali	Denpasar	Denpasar	3	0,8
	NTB	Mataram	Rembiga-Ampenan	15	3,1
	NTT	Kupang	Waingapu	10	2,3
Kalimantan	Kalimantan Barat	Pontianak	Supadio-Pontianak	30	2,1
	Kalimantan Tengah	Palangkaraya	Palangkaraya	27	2,9
	Kalimantan Selatan	Banjarmasin	Banjarmasin	20	3,4
	Kalimantan Timur	Samarinda	Samarinda-Temindung	10	2,0
Sulawesi	Sulawesi Utara	Manado	Meteo Bitung	3	1,9
	Gorontalo	Gorontalo	Gorontalo	20	1,4
	Sulawesi Tengah	Palu	Mutiara-Palu	6	2,4
	Sulawesi Barat	Mamuju	Majene	313	2,3

	Sulawesi Selatan	Makasar	Hasanudin	14	1,8
	Sulawesi Tenggara	Kendari	Betoambari	50	1,9
Kepulauan Maluku	Maluku	Ambon	Ternate	33	2,4
	Maluku Utara	Sofifi	Sanana	15	2,0
Irian Jaya Barat	Papua Barat	Manokwari	Kaimana	3	2,7
	Papua	Jayapura	Jayapura	10	2,6

Dari data-data tersebut, maka daerah-daerah tersebut dikelompokkan menurut beberapa tingkat kecepatan angin.

Tabel 4.9. Pengelompokkan wilayah berdasarkan tingkat kecepatan

$V < 1 \text{ m/s}$	$1 \leq V < 2 \text{ m/s}$	$2 \leq V < 2,5 \text{ m/s}$	$V \geq 2,5 \text{ m/s}$
Riau, Jawa Tengah, Bali	Sumatera Utara, Kepulauan Riau, Sumatera Selatan, Bengkulu, Kalimantan Timur, Sulawesi Utara, Gorontalo, Sulawesi Selatan, Sulawesi Tenggara, Maluku Utara	Aceh, Lampung, DKI Jakarta, DI Yogyakarta, Jawa Timur, NTT, Kalimantan Barat, Sulawesi Tengah, Sulawesi Barat, Maluku	Sumatera Barat, Jambi, Bangka Belitung, Banten, Jawa Barat, NTB, Kalimantan Tengah, Kalimantan Selatan, Papua Barat, Papua



Gambar 4.33. Peta rupa bumi Indonesia berdasarkan kecepatan angin rata-rata

### 4.6.3 Data Teknologi Turbin

Dari data-data dan spesifikasi turbin angin yang diperoleh, maka dibuat analisis dalam bentuk tabel perbandingan. Analisis ini dibuat dengan mempertimbangkan aspek-aspek seperti yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya.

Tabel 4.10. Perbandingan teknologi turbin angin

Wind Technology	Rated power (kW)	Swept Area (m <sup>2</sup> )	Cut in wind speed (m/s)	Rated wind speed (m/s)	Number of blades	Rotor diameter (m)	Cp	Yaw Mechanism	Gear box	Overall Structure
Energy Ball/Venturi	0,5	0,95	2	17	6	1,1	0,174	Yes	No	Complicated
Swift Wind Turbine	1,5	3,46	3,6	11	5	2,1	0,529	Yes	Yes	Moderate
WindTamer	1,3	1,54	2	14	N/A	1,4	0,501	N/A	No	Complicated
Counter rotating	3,6	15,2	2,5	8	4	4,4	0,752	N/A	No	Complicated
Direct Drive (AWE-54900)	900	2289,06	2	14	3	54	0,233	Yes	No	Moderate
Broadstar wind systems	10	46,63	1,8	13,5	10	3,048	0,142	Yes	No	Complicated
O Connor Hush Turbine	0,68	0,78	N/A	15	N/A	1	0,417	N/A	Yes	Complicated
Enflo Windtech	0,5	0,4	2,5	12,5	5	0,71	1,052	Yes	N/A	Complicated
Sky Stream	2,4	10,86	3,5	13	3	3,72	0,164	Yes	Yes	Moderate
WindDancer	3,2	6,97	1	17	4	2,98	0,152	N/A	Yes	Complicated
Eco Whisper	20	33,17	3,5	14	30	6,5	0,357	N/A	Yes	Complicated
DAWT	1	2,63	Controller Specific	6,3	3	1,83	2,47	Yes	N/A	Moderate
Wind Spire	1,2	7,32	4	11,2	2	1,2	0,19	No	N/A	Complicated
Turby	2,5	5,97	4	14	3	0,25	0,28	No	N/A	Moderate
Ropatec	6	14,52	2	14	2	3,3	0,245	No	No	Simple
Seahawk Vertical Axis	0,5	0,93	3,1	12,5	N/A	0,762	0,448	No	N/A	Simple
Turbin angin LAPAN 10	8,5	38,47	3,5	12,4	3	7	0,188	Yes	Yes	Moderate

kW										
Turbin angin LAGG 300W	0,3	7,06	2,5	7	3	3	0,201	Yes	N/A	Moderate
Turbin angin LAGG 1 Kw	1	7,06	2,5	8,35	3	3	0,395	Yes	N/A	Moderate
Turbin angin LAGG 2,5 Kw	2,5	17,34	2,5	8,35	3	4,7	0,403	Yes	N/A	Moderate
Turbin angin LAGG 5 Kw	5	28,26	2,5	9	3	6	0,395	Yes	N/A	Moderate
Turbin angin LAGG 10 Kw	10	52,78	2,5	9	3	8,2	0,423	Yes	N/A	Moderate
Turbin angin LAGG 20 Kw	20	113,04	2,5	9	3	12	0,395	Yes	N/A	Moderate

#### 4.6.4 Hasil Pemetaan

Dari data potensi angin dan data teknologi turbin angin yang diperoleh, maka dilakukan mapping terhadap masing-masing teknologi. Mapping dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik kerja tiap-tiap jenis turbin dan aspek-aspek seperti yang sudah dijelaskan pada subbab sebelumnya.

Tabel 4.11. Data hasil pemetaan turbin angin untuk wilayah Indonesia

Propinsi	Rata-rata 2000-2007	Turbin Angin yang Cocok
Aceh	2,0	DAWT, Turbin Angin LAGG 1-2,5 kW, Counter Rotating, Ropatec
Sumatera Utara	1,4	DAWT, Turbin Angin LAGG 1-2,5 kW, Counter Rotating
Sumatera Barat	3,1	DAWT, Turbin Angin LAGG 5-20 kW, Seahawk
Riau	0,8	DAWT
Kepulauan Riau	1,3	DAWT, Turbin Angin LAGG 1-2,5 kW, Counter Rotating

Jambi	2,6	DAWT, Enflo, Turbin Angin LAGG 5-20 kW
Sumatera Selatan	1,4	DAWT, Turbin Angin LAGG 1-2,5 kW, Counter Rotating
Bangka-Belitung	2,6	DAWT, Enflo, Turbin Angin LAGG 5-20 kW
Bengkulu	1,7	DAWT, Turbin Angin LAGG 1-2,5 kW, Counter Rotating
Lampung	2,4	DAWT, Turbin Angin LAGG 1-2,5 kW, Counter Rotating, Ropatec
DKI Jakarta	2,1	DAWT, Turbin Angin LAGG 1-2,5 kW, Counter Rotating, Ropatec
Banten	2,5	DAWT, Enflo, Turbin Angin LAGG 5-20 kW
Jawa Barat	3,3	DAWT, Turbin Angin LAGG 5-20 kW, Seahawk
Jawa Tengah	0,8	DAWT
DI Yogyakarta	2,2	DAWT, Turbin Angin LAGG 1-2,5 kW, Counter Rotating, Ropatec
Jawa Timur	2,5	DAWT, Enflo, Turbin Angin LAGG 5-20 kW
Bali	0,8	DAWT
NTB	3,1	DAWT, Turbin Angin LAGG 5-20 kW, Seahawk
NTT	2,3	DAWT, Turbin Angin LAGG 1-2,5 kW, Counter Rotating, Ropatec
Kalimantan Barat	2,1	DAWT, Turbin Angin LAGG 1-2,5 kW, Counter Rotating, Ropatec
Kalimantan Tengah	2,9	DAWT, Enflo, Turbin Angin LAGG 5-20 kW
Kalimantan Selatan	3,4	DAWT, Turbin Angin LAGG 5-20 kW, Seahawk
Kalimantan Timur	2,0	DAWT, Turbin Angin LAGG 1-2,5 kW, Counter Rotating, Ropatec
Sulawesi Utara	1,9	DAWT, Enflo, Turbin Angin LAGG 1-2,5 kW
Gorontalo	1,4	DAWT, Turbin Angin LAGG 1-2,5 kW, Counter Rotating
Sulawesi Tengah	2,4	DAWT, Turbin Angin LAGG 1-2,5 kW, Counter Rotating, Ropatec
Sulawesi Barat	2,3	DAWT, Turbin Angin LAGG 1-2,5 kW, Counter Rotating, Ropatec
Sulawesi Selatan	1,8	DAWT, Turbin Angin LAGG 1-2,5 kW, Counter Rotating
Sulawesi Tenggara	1,9	DAWT, Turbin Angin LAGG 1-2,5 kW, Counter Rotating
Maluku	2,4	DAWT, Turbin Angin LAGG 1-2,5 kW, Counter Rotating, Ropatec
Maluku Utara	2,0	DAWT, Turbin Angin LAGG 1-2,5 kW, Counter Rotating, Ropatec
Papua Barat	2,7	DAWT, Enflo, Turbin Angin LAGG 5-20 kW
Papua	2,6	DAWT, Enflo, Turbin Angin LAGG 5-20 kW

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, maka diperoleh beberapa kesimpulan :

- Dari data pengolahan turbin angin, maka dapat dikatakan bahwa turbin angin dengan teknologi selubung diffuser memiliki efisiensi yang paling besar, dengan nilai  $C_p$  hingga sebesar 2,47 pada turbin yang dibuat oleh perusahaan AWE dan 1,05 pada turbin yang dibuat oleh perusahaan Enflo.
- Pada perhitungan nilai *power per unit length*, turbin angin dengan teknologi diffuser juga memiliki kelebihan dibandingkan dengan jenis turbin lainnya (dapat dilihat pada gambar 4.31). Dengan nilai *power unit length* yang besar, maka turbin angin dapat lebih efektif digunakan di daerah pemukiman.
- Dari hasil simulasi yang didapatkan maka dengan geometri diffuser L/D sebesar 1,25, sudut ekspan sebesar  $12^\circ$ , dan diameter inlet sebesar 800 mm, kecepatan aliran yang dihasilkan pada sisi masuk diffuser dapat mencapai 1,3 kali kecepatan free stream. Sedangkan pada konfigurasi nozzle dengan ukuran dan geometri yang sama, kecepatan aliran tertinggi berada pada sisi keluar diffuser dengan nilai kecepatan, 1,07 kali kecepatan free stream.
- Telah diperoleh hasil pemetaan teknologi turbin angin untuk seluruh wilayah/ propinsi di Indonesia (dapat dilihat pada tabel 4.11)
- Dari hasil pemetaan yang telah dilakukan, maka turbin angin dengan selubung diffuser cocok untuk diaplikasikan hampir di berbagai wilayah di Indonesia untuk skala kecil.

## 5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya :

- Simulasi dan eksperimen mengenai teknologi selubung diffuser dapat dilakukan, berikut dengan penempatan rotornya, sehingga distribusi kecepatan yang terjadi di dalam selubung dapat terlihat secara lebih real.
- Perlu adanya metode komparasi lain dalam membandingkan jenis-jenis turbin angin, sehingga aspek yang dipertimbangkan dapat lebih banyak dan pemetaan dapat dilakukan secara lebih khusus dan spesifik.



## DAFTAR PUSTAKA

1. Blueprint Pengelolaan Energi Nasional 2005-2025 Departemen ESDM RI
2. <http://digilib.its.ac.id/public/ITS-Research-10087-132311414-Chapter1.pdf>  
[diunduh tanggal 16-06-2012](#)
3. <http://pendercommunitytransition.ca/wp-content/uploads/Briefing-Wind-Energy.pdf> diunduh tanggal 17-04-2012
4. Departemen ESDM 2008
5. PLN 2008
6. [Ahmad Y Hassan](#), [Donald Routledge Hill](#) (1986). *Islamic Technology: An illustrated history*, p. 54. [Cambridge University Press](#). ISBN 0-521-42239-6
7. Lynn White Jr., *Medieval technology and social change* (Oxford, 1962) p. 87
8. [http://image.shutterstock.com/display\\_pic\\_with\\_logo/263746/263746,1251201243,4/stock-photo-old-dutch-windmill-35868412.jpg](http://image.shutterstock.com/display_pic_with_logo/263746/263746,1251201243,4/stock-photo-old-dutch-windmill-35868412.jpg) diunduh tanggal 20-03-2012
9. Price, Trevor J (3 May 2005). "James Blyth – Britain's First Modern Wind Power Engineer". *Wind Engineering* 29 (3): 191-200
10. <http://forgenrenewables.com/products/general/wind-generation-a-brief-history/> diakses pada tanggal 16-06-2012
11. [http://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_wind\\_power](http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_wind_power) diakses tanggal 20-03-2012
12. Hau, Erich. *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics*, Birkhauser, 2006
13. [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b5/Mod-2\\_Wind\\_Turbine\\_Cluster3.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b5/Mod-2_Wind_Turbine_Cluster3.jpg) diunduh tanggal 20-03-2012
14. [Manwell, JF. \*Wind Energy Explained – Theory, Design, and Application\*. A John Wiley Sons, Ltd, Publications](#)
15. Oman, R.A. Foreman, K.M. *Advantages of the Diffuser Augmented Wind Turbine*. Research Department Grumman Aerospace Corporation Bethpage, New York
16. "Wind Turbine Design Cost and Scaling Model," Technical Report

- NREL/TP-500-40566, December, 2006, page 35,36
17. [http://www1.eere.energy.gov/windandhydro/wind\\_how.html](http://www1.eere.energy.gov/windandhydro/wind_how.html) diunduh tanggal 20-03-2012
  18. [http://www.heliosbuzz.com/wp-content/uploads/2009/03/wind\\_turbine\\_configurations-300x247.gif](http://www.heliosbuzz.com/wp-content/uploads/2009/03/wind_turbine_configurations-300x247.gif) diunduh tanggal 16-06-2012
  19. [http://www.daviddarling.info/encyclopedia/W/AE\\_wind\\_turbine.html](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/W/AE_wind_turbine.html) diakses tanggal 20-03-2012
  20. <http://pendercommunitytransition.ca/wp-content/uploads/Briefing-Wind-Energy.pdf> diunduh tanggal 17-04-2012
  21. <http://www.scoraigwind.com/citywinds/> diunduh tanggal 20-03-2012
  22. <http://s2.wahyudiharto.com/2009/01/opini-alternatif-energi-listrik.html> diakses tanggal 17-04-2012
  23. <http://www.perpustakaan.lapan.go.id/jurnal/index.php/orasi/article/view/1559/1397> diunduh tanggal 16 Februari 2012
  24. Data Iklim BMKG 2000-2007
  25. Spesifikasi Manual Turbin Angin LAGG-BPPT
  26. Wind Turbine Manual Specification
  27. <http://www.treehugger.com/renewable-energy/the-energy-ball-another-innovative-option-in-home-wind-turbines.html> diakses tanggal 25-04-2012
  28. [http://www.swiftwindturbine.com/pdf/SWIFT\\_DataSheet\\_CRE\\_web.pdf](http://www.swiftwindturbine.com/pdf/SWIFT_DataSheet_CRE_web.pdf) diunduh tanggal 17-04-2012
  29. [http://aristapower.com/wp-content/themes/accelerate/pdf/wt45\\_combined.pdf](http://aristapower.com/wp-content/themes/accelerate/pdf/wt45_combined.pdf) diunduh tanggal 10-04-2012
  30. [http://www.infinetwindenergyllc.com/IWE\\_Small2.pdf](http://www.infinetwindenergyllc.com/IWE_Small2.pdf) diunduh tanggal 10-04-2012
  31. <http://www.awewind.com/Portals/0/Downloads/AWE%2054%20900KW%20data%20sheet.pdf> diunduh tanggal 10-04-2012
  32. <http://www.broadstarwindsystems.com/assets/AeroCam1.pdf> diakses tanggal 17-04-2012
  33. [http://peswiki.com/index.php/Directory:O'Conner\\_Hush\\_Turbine](http://peswiki.com/index.php/Directory:O'Conner_Hush_Turbine) diakses

- tanggal 17-04-2012
34. <http://www.allsmallwindturbines.com/files/enflo0071.pdf> diunduh tanggal 01-05-2012
  35. [http://www.windenergy.com/sites/www.windenergy.com/files/3-CMLT-1338-01\\_Skystream\\_spec\\_0.pdf](http://www.windenergy.com/sites/www.windenergy.com/files/3-CMLT-1338-01_Skystream_spec_0.pdf) diunduh tanggal 01-05-2012
  36. [http://www.awrenergy.com/assets/awr\\_energy\\_dawt\\_specs.pdf](http://www.awrenergy.com/assets/awr_energy_dawt_specs.pdf) diunduh tanggal 17-06-2012
  37. <http://www.windsimplicity.ca/windancerspecs.pdf> diunduh tanggal 01-05-2012
  38. [http://www.resau.com.au/attachments/ewt\\_tech\\_spec\\_5\\_digital.pdf](http://www.resau.com.au/attachments/ewt_tech_spec_5_digital.pdf) diunduh tanggal 01-05-2012
  39. <https://netfiles.uiuc.edu/mragheb/www/NPRE%20475%20Wind%20Power%20Systems/Vertical%20Axis%20Wind%20Turbines.pdf> diunduh tanggal 10-04-2012
  40. Ohya, Yuji. (2008) “*Development of a shrouded wind turbine with a flanged diffuser*”. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics
  41. BG, Newman. (1986). “*Multiple actuator-disc theory for wind turbines*”. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics
  42. Menet, Jean-Luc. (2000) “*A comparative calculation of the wind turbines capacities on the basis of the  $L - \sigma$  criterio*”
  43. Eriksson, Sandra. (2006) “*Evaluation of different turbine concepts for wind power*”