



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISIS DAN PEMETAAN POTENSI ENERGI ANGIN DI  
INDONESIA**

**SKRIPSI**

**AKBAR RACHMAN**

**0806454595**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

**DEPOK**

**JULI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISIS DAN PEMETAAN POTENSI ENERGI ANGIN DI  
INDONESIA**

**SKRIPSI**

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

**Sarjana Teknik**

**AKBAR RACHMAN**

**0806454595**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

**DEPOK**

**JULI 2012**

**ii**

## HALAMAN PERSETUJUAN

**Judul** : ANALISIS DAN PEMETAAN POTENSI ENERGI ANGIN DI  
INDONESIA  
**Nama** : AKBAR RACHMAN  
**NPM** : 0806454595

Laporan tugas akhir ini telah diperiksa dan disetujui.

Juli 2012



(.....)

Ir. Warjito M.Sc., Ph.D  
Pembimbing Tugas Akhir

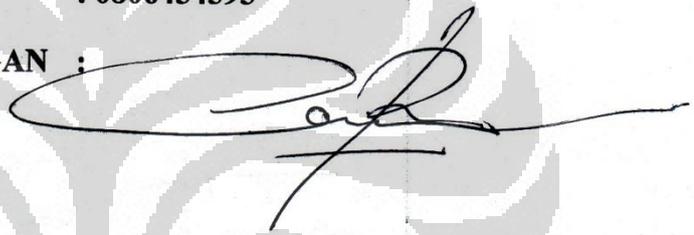
## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Tugas akhir ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun yang dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.

**NAMA : AKBAR RACHMAN**

**NPM : 0806454595**

**TANDA TANGAN :**

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Akbar Rachman', is written over a large, faint watermark of the University of Indonesia (UI) logo. The signature is fluid and cursive, extending to the right.

**TANGGAL : 19 Juni 2012**

## HALAMAN PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan oleh :

Nama : AKBAR RACHMAN

NPM : 0806454595

Program Studi : TEKNIK MESIN

Judul Tugas Akhir : ANALISIS DAN PEMETAAN POTENSI ENERGI ANGIN  
DI 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 : Ir. Warjito M.Sc., Ph.D



(.....)

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



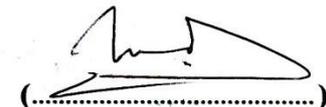
(.....)

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



(.....)

Penguji : Dr. Ir. Ahmad Indra M.Eng



(.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 5 Juli 2012

## KATA PENGANTAR

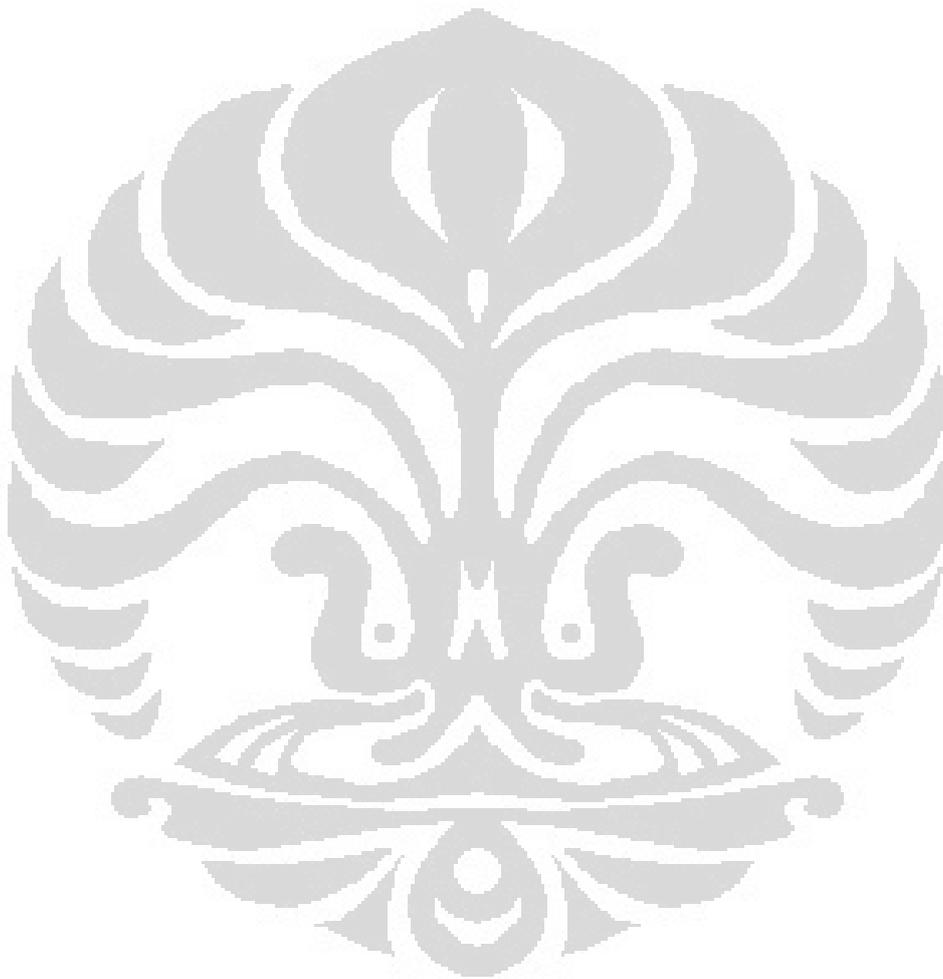
Puji dan syukur diucapkan kepada ALLAH SWT yang selalu memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis mendapatkan kesempatan menyelesaikan penelitian dengan judul “Analisis dan Pemetaan Potensi Energi Angin di Indonesia”. Terima kasih yang sebesar-besarnya turut disampaikan kepada:

1. Ir. Warjito M.Sc., Ph.D., dosen pembimbing sekaligus pembimbing akademis yang telah bersedia membantu serta meluangkan waktu, memberikan arahan dan nasihat sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dengan baik.
2. Prof. Dr. Ir. Harinaldi M.Eng., selaku Kepala Departemen Teknik Mesin; Prof. Dr. Ir. Budiarmo M.Eng., dan Dr. Ir. Ahmad Indra M.Eng; beserta segenap dosen serta karyawan Departemen Teknik Mesin, yang bersedia membagi pengetahuan dan pengalaman kepada penulis.
3. Bpk. Hasan dan Bpk. Hadi Purnomo dari Kementerian ESDM.
4. Bpk. Amin dan Ibu Karni dari bagian Database BMKG
5. Rekan-rekan tim Turbin Angin; Agus Irawan, Lukmanul Hakim, dan Seto Respati; yang selalu memberikan bantuan dan saran kepada penulis.
6. Rekan-rekan mahasiswa/i Departemen Teknik Mesin FTUI lainnya, khususnya angkatan 2008, yang telah memberikan pengalaman-pengalaman berharga selama penulis menjadi seorang mahasiswa.
7. Irma Savitri; yang selalu memberikan dukungan, dan nasihat, serta atas kesabarannya dalam menghadapi penulis dalam berbagai situasi dan kondisi.
8. Keluarga penulis; kedua orangtua, Papa dan Mama; kedua adik, Endy Maresya dan Dimmy Rachmadana; serta keluarga besar; yang selalu memberikan inspirasi dan motivasi tanpa akhir kepada penulis.

Akhir kata, semoga hasil penelitian dan skripsi ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 19 Juni 2012

Penulis



## HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : AKBAR RACHMAN  
NPM : 0806454595  
Program Studi : TEKNIK MESIN  
Fakultas : TEKNIK  
Jenis Karya : Skripsi

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

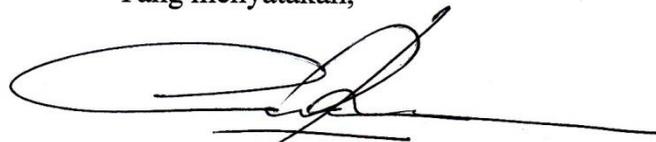
### **ANALISIS DAN PEMETAAN POTENSI ENERGI ANGIN DI INDONESIA**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-eksklusif 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 sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 19 Juni 2012

Yang menyatakan,



(AKBAR RACHMAN)

## ABSTRAK

Nama : AKBAR RACHMAN  
Program Studi : TEKNIK MESIN  
Judul : Analisis dan Pemetaan Potensi Energi Angin di Indonesia.

Sumber daya energi yang paling banyak digunakan adalah energi yang tidak dapat diperbarui. Memasuki akhir abad 20, tuntutan untuk semakin mengubah kebiasaan tersebut semakin besar. Energi angin muncul sebagai sumber energi alternatif sekaligus sumber energi terbarukan. Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki wilayah pesisir yang potensial untuk pengembangan listrik tenaga angin. Potensi energi yang siap dibangun lebih dari 9290 MW, dan kapasitas terpasang hingga tahun 2009 hanya mencapai 3 MW. Dilakukan studi analisis mengenai potensi energi angin secara lebih mendetil, serta pemetaan wilayah, dengan menggunakan metode distribusi probabilitas guna menghitung jumlah energi berdasarkan kecepatan rata-rata angin per provinsi di seluruh Indonesia dari tahun 2000 hingga tahun 2007. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah memiliki kecepatan angin rata-rata antara 2 m/s hingga 3 m/s, dan menghasilkan energi spesifik hingga mencapai 321 kW.hr/m<sup>2</sup>.

Kata Kunci : Energi angin, distribusi probabilitas, potensi energi angin, energi spesifik, peta angin.

## ABSTRACT

Name : AKBAR RACHMAN  
Program : MECHANICAL ENGINEERING  
Title : Mapping and Analysis of Wind Energy Potential in Indonesia.

The most common energy used up to now are unrenewable energy. As the 20th century coming to an end, the needs to change that habit are becoming bigger. Wind energy came up as one of the alternative energy, also as a renewable ones. Indonesia as a country with many islands has potentially coastal areas to produce wind-generated energy. The potential energy reached the value of 9290 MW, whereas only 3 MW that are already installed and running. An analysis study is needed to explore wind energy potential more thoroughly, also a mapping method, with probability distribution as a tool to calculate the wind mean speed based energy value from each provinces in Indonesia from 2000 until 2007. The results show that most of the areas have various wind mean speed between 2 m/s and 3 m/s, and also generating spesific energy at the utmost value of 321 kW.hr/m<sup>2</sup>.

Keywords : Wind energy, probability distribution, wind energy potential, spesific energy, wind map.

## DAFTAR ISI

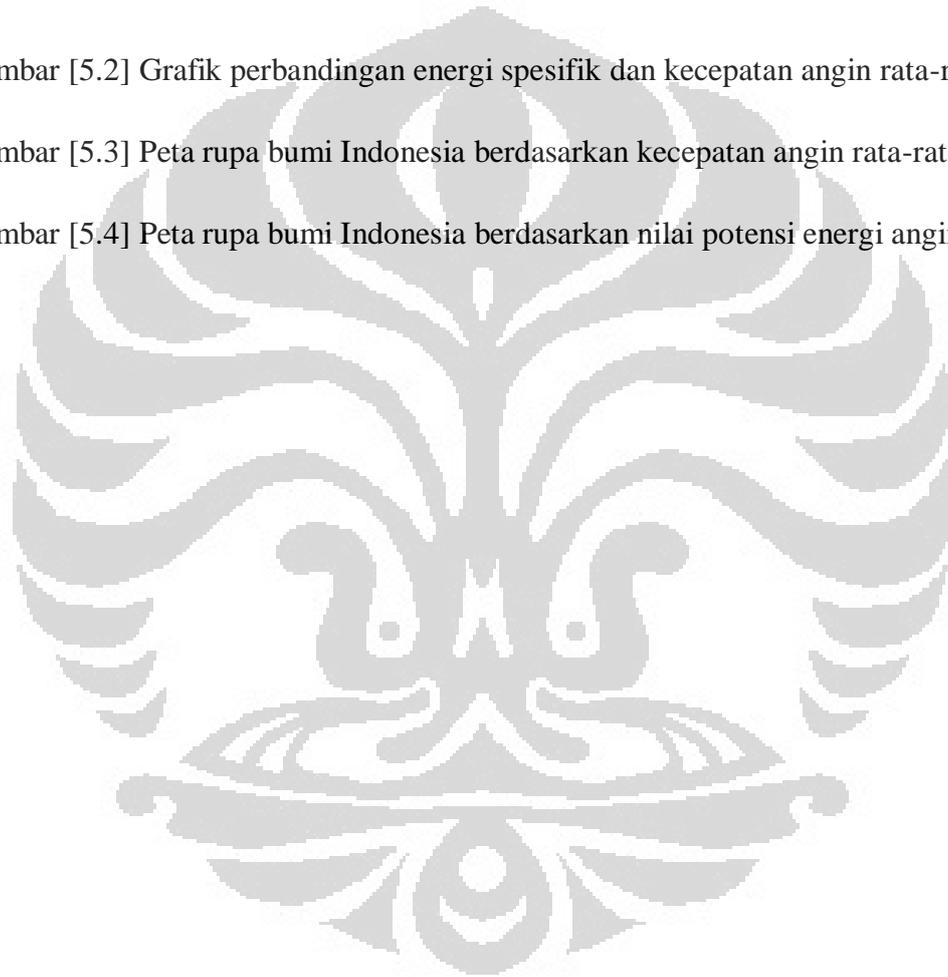
Halaman Judul .....	i
Halaman Persetujuan.....	iii
Halaman Pernyataan Orisinalitas .....	iv
Halaman Pengesahan .....	v
Kata Pengantar.....	vi
Halaman Persetujuan Publikasi Karya Ilmiah .....	viii
Abstrak .....	ix
Abstract .....	x
Daftar Isi.....	xi
Daftar Gambar .....	xiii
Daftar Tabel.....	xv
Bab I Pendahuluan .....	1
I. 1 Latar Belakang.....	1
I. 2 Perumusan Masalah .....	3
I. 3 Tujuan Penelitian .....	3
I. 4 Pembatasan Masalah.....	3
I. 5 Sistematika Penulisan .....	4
Bab II Landasan Teori.....	6
II. 1 Energi Alternatif.....	6
II. 2 Angin Sebagai Sumber Daya Energi .....	10
II. 3 Turbin Angin .....	18
II. 4 Kebijakan Pengembangan Energi Angin .....	24
Bab III Metodologi Penelitian .....	27
III. 1 Pengambilan Data Sekunder .....	27
III. 2 Penentuan Metode Hitung <i>Wind-mapping</i> .....	28
III. 3 Penentuan Referensi Teknologi Turbin Angin .....	32
III. 4 Komparasi <i>wind-map</i> dengan Teknologi Turbin Angin.....	34

Bab IV Data.....	36
IV. 1 Data Sekunder.....	36
IV. 2 Analisis Potensi Sumber Daya Angin .....	45
IV. 3 Peta Angin .....	45
Bab V Analisis Hasil Perhitungan .....	47
IV. 1 Analisis Data Angin .....	47
IV. 2 Potensi Sumber Daya Angin.....	49
IV. 3 Peta Angin Nasional.....	50
Bab VI Kesimpulan.....	52
VI.1 Kesimpulan.....	52
VI.2 Saran.....	52
Referensi.....	53
Daftar Pustaka.....	57
Lampiran A.....	58
Lampiran B.....	60
Lampiran C.....	62
Lampiran D.....	64

## DAFTAR GAMBAR

Gambar [2.1] Grafik realisasi dan proyeksi kebutuhan energi listrik di Indonesia .....	7
Gambar [2.2] Grafik realisasi dan proyeksi pembangkitan listrik per jenis sumber energi di Indonesia.....	7
Gambar [2.3] Grafik target kapasitas terpasang penyediaan energi baru dan terbarukan di Indonesia per jenis energi hingga tahun 2025 .....	8
Gambar [2.4] Contoh peta angin.....	17
Gambar [2.5] Komponen-komponen dari turbin angin dengan sumbu horizontal.....	19
Gambar [2.6] HAWT dan VAWT. ....	20
Gambar [2.7] Turbin angin skala kecil pada atap rumah. ....	22
Gambar [3.1] Grafik perbandingan nilai <i>cut-in</i> dan <i>rated wind speed</i> terhadap beragam tipe turbin angin.....	33
Gambar [3.2] Grafik perbandingan nilai $C_p$ terhadap beragam jenis turbin angin .....	33
Gambar [3.3] Grafik perbandingan kecepatan <i>cut-in</i> per jenis turbin angin.....	34
Gambar [3.4] Peta Indonesia .....	35
Gambar [4.1] Grafik frekuensi kecepatan angin per bulan untuk daerah Blang Bintang, Aceh periode 2000-2007 .....	37
Gambar [4.2] Grafik probabilitas kecepatan angin rata-rata di daerah Blang Bintang, Aceh periode 2000-2007 .....	39
Gambar [4.3] Grafik probabilitas kecepatan angin rata-rata di daerah Blang Bintang, Aceh periode 2000-2007 .....	39
Gambar [4.4] Grafik probabilitas kecepatan angin rata-rata di daerah Blang Bintang, Aceh periode 2000-2007 .....	40
Gambar [4.5] Grafik perbandingan kecepatan rata-rata angin dan kecepatan karakteristik turbin angin.....	45

Gambar [4.6] Peta persebaran kecepatan angin rata-rata untuk pulau Sumatera, periode 2000-2007.....	46
Gambar [4.7] Peta persebaran potensi energi spesifik angin untuk pulau Sumatera, periode 2000-2007 .....	47
Gambar [5.1] Grafik perbandingan daya spesifik turbin angin dan kecepatan angin rata-rata.....	49
Gambar [5.2] Grafik perbandingan energi spesifik dan kecepatan angin rata-rata .....	50
Gambar [5.3] Peta rupa bumi Indonesia berdasarkan kecepatan angin rata-rata .....	51
Gambar [5.4] Peta rupa bumi Indonesia berdasarkan nilai potensi energi angin .....	51



## DAFTAR TABEL

Tabel [2.1] Potensi dan implementasi energi terbarukan pada tahun 2007 .....	8
Tabel [2.2] Tahap pengembangan PLTB hingga tahun 2025.....	10
Tabel [2.3] Tahap pengembangan PLTB hingga tahun 2025.....	10
Tabel [3.1] Karakteristik angin untuk provinsi Aceh tahun 2000-2007 .....	27
Tabel [3.2] Klasifikasi Kelas Potensi Energi Angin.....	28
Tabel [3.3] Tipe Turbin Angin .....	32
Tabel [4.1] Kecepatan Angin Rata-rata tahun 2000-2007 di Blang Bintang, Aceh .....	36
Tabel [4.2] Kecepatan Angin Rata-rata tahun 2000-2007 di Blang Bintang, Aceh .....	37
Tabel [4.3] Hasil distribusi probabilitas kecepatan angin daerah Blang-Bintang, Aceh periode 2000-2007 .....	38
Tabel [4.4] Data tekanan (kPa) dan temperatur udara (K) rata-rata untuk propinsi Aceh tahun 2000-2007 .....	41
Tabel [4.5] Kerapatan udara ( $\text{kg/m}^3$ ) untuk daerah Blang-Bintang, Aceh tahun 2000-2007.....	41
Tabel [4.6] Daya spesifik ( $\text{W/m}^2$ ) untuk daerah Blang-Bintang tahun 2000-2007 .....	42
Tabel [4.7] Nilai energi potensial ( $\text{W.hr/m}^2$ ) untuk daerah Blang-Bintang, Aceh tahun 2000-2007.....	43
Tabel [4.8] Data parameter turbin angin (m/s) untuk daerah Blang-Bintang, Aceh tahun 2000-2007.....	44

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Memasuki akhir abad ke-20, dunia mulai dibayangi oleh masalah krisis energi. Sumber daya energi yang selama ini banyak digunakan adalah jenis energi yang tidak dapat diperbarui, sumber energi ini akan habis dan manusia harus beralih ke sumber energi lain, yang masih dapat digunakan.

Masalah energi yang berujung pada krisis tidak akan pernah usai jika kita hanya bisa memanfaatkan tetapi tidak dapat mengolah, atau bahkan memperbarui bentuk energi tersebut.

Di Indonesia, dampak dari krisis energi ini mulai terlihat secara nyata sejak awal tahun 1990 hingga memasuki tahun 2000. Data yang dikumpulkan dan disajikan dalam *Indonesia Energy Outlook and Statistics 2004*<sup>[1]</sup> memperlihatkan bahwa kemampuan Indonesia dalam kegiatan ekspor migas mulai turun sejak tahun 1995, dan pada saat yang sama kebutuhan akan impor minyak mentah serta bahan bakar lain mengalami kenaikan. Hal ini menunjukkan dampak krisis energi dunia, juga dialami oleh Indonesia.

Kondisi ini mendorong masyarakat dunia dan Indonesia untuk menggunakan energi dari sumber energi terbarukan. Konsumsi energi dari sumber ini terus meningkat. Data yang disajikan oleh *Energy Information Agency 2004*<sup>[2]</sup> menunjukkan peningkatan sebesar 10-30% antara tahun 1980 hingga tahun 2002, terutama pada sumber energi seperti air, panas bumi, dan angin.

Sumber energi angin memiliki potensi yang masih sangat besar. Pada tahun 1980, penggunaan energi angin untuk keperluan generator listrik diperkirakan mencapai 28 Billion Btu. Kemudian pada tahun 1989, tercatat penggunaan energi angin mencapai 22,033 Billion Btu. Hingga pada tahun 2000, penggunaan energi angin dunia sudah mencapai angka 106,311 Billion Btu berdasarkan data dari *Energy Information Agency 2004*<sup>[2]</sup>.

Di Indonesia, kecepatan angin berkisar antara 2m/s hingga 6m/s. Dengan karakteristik kecepatan seperti itu, Indonesia dinilai cocok untuk menggunakan pembangkit listrik tenaga angin skala kecil (10kW) dan menengah (10-100kW); untuk penggunaan energi seperti misalnya, lampu, pompa air, alat-alat elektronik, dan lain-lain. Pusat tenaga angin sebagian besar masih berada di Nusa Tenggara Timur yang memiliki kecepatan rata-rata angin hingga lebih dari 5m/s. Ditunjukkan bahwa potensi energi angin di Indonesia mencapai 9,286 MW; di mana penggunaan hingga tahun 2004 masih kurang dari 0.5 MW berdasarkan data dari *Indonesia Energy Outlook and Statistics 2004*<sup>[1]</sup>.

Dari penjelasan sebelumnya, dapat diambil kesimpulan bahwa potensi sumber daya energi terbarukan, terutama angin, di Indonesia, masih sangat luas. Energi angin, khususnya, tidak hanya dapat mengatasi keterbatasan pembangkit listrik secara menyeluruh, namun juga dapat digunakan dalam skala kecil; contohnya untuk sektor perumahan.

Turbin angin, sebagai fasilitas pengolah energi angin menjadi energi listrik yang paling banyak digunakan, dapat menjadi salah satu jawaban atas masalah krisis energi. Turbin angin diproduksi dengan daya keluaran berkisar antara 600kW hingga 1 MW, bahkan sudah ada yang dapat mencapai 2.5 MW. Teknologi harus dapat dikembangkan untuk penggunaan yang lebih luas, dan lebih mudah<sup>[1]</sup>.

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<sup>[3]</sup>. 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.

Turbin angin skala kecil untuk area permukiman dapat diciptakan untuk mengatasi masalah krisis energi, terutama pada sektor residensial yang seringkali terlewatkan. Turbin angin dapat menghasilkan energi listrik untuk kebutuhan sehari-hari; tidak membebani bangunan lain, tidak menimbulkan suara bising, dan dampaknya pada lingkungan adalah, turbin tidak menghasilkan polusi sedikit pun<sup>[4]</sup>.

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 potensi sumber daya angin dan perbandingan antara potensi tersebut dengan jenis turbin angin yang ada di pasaran.

## 1.2. Perumusan Masalah

Pada penelitian kali ini, dilakukan analisis terhadap desain turbin angin ideal yang dapat diaplikasikan pada skala kecil, yaitu pada area permukiman (perkotaan). Sebelumnya, dilakukan terlebih dahulu studi literatur dan analisis data sekunder mengenai potensi persebaran angin di seluruh wilayah Indonesia, serta ketersediaan teknologi turbin angin yang ada hingga saat ini.

## 1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

- a) Mengetahui peta potensi angin di Indonesia
- b) Mengetahui kecepatan rata-rata angin di daerah pemukiman ( kondisi angin)
- c) Membuat peta teknologi turbin angin
- d) Mengetahui teknologi turbin angin yang sesuai dengan karakteristik angin di Indonesia
- e) Membuat pengembangan teknologi turbin angin
- f) Memberikan kontribusi langsung mengenai pemanfaatan energi terbarukan

## 1.4. Pembatasan Masalah

Asumsi dalam batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

- a) Data yang digunakan dalam analisis penelitian ini adalah data sekunder
- b) Perhitungan desain *wind turbine* yang sesuai untuk area pemukiman

- c) Perhitungan yang digunakan berdasarkan rata-rata kecepatan angin yang akan disertakan
- d) Desain didasarkan atas persyaratan kemampuan untuk menyuplai kebutuhan listrik sebuah rumah

### 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 pengujian yang digunakan, metode persiapan dan metode pengambilan data yang dilakukan

#### BAB IV DATA

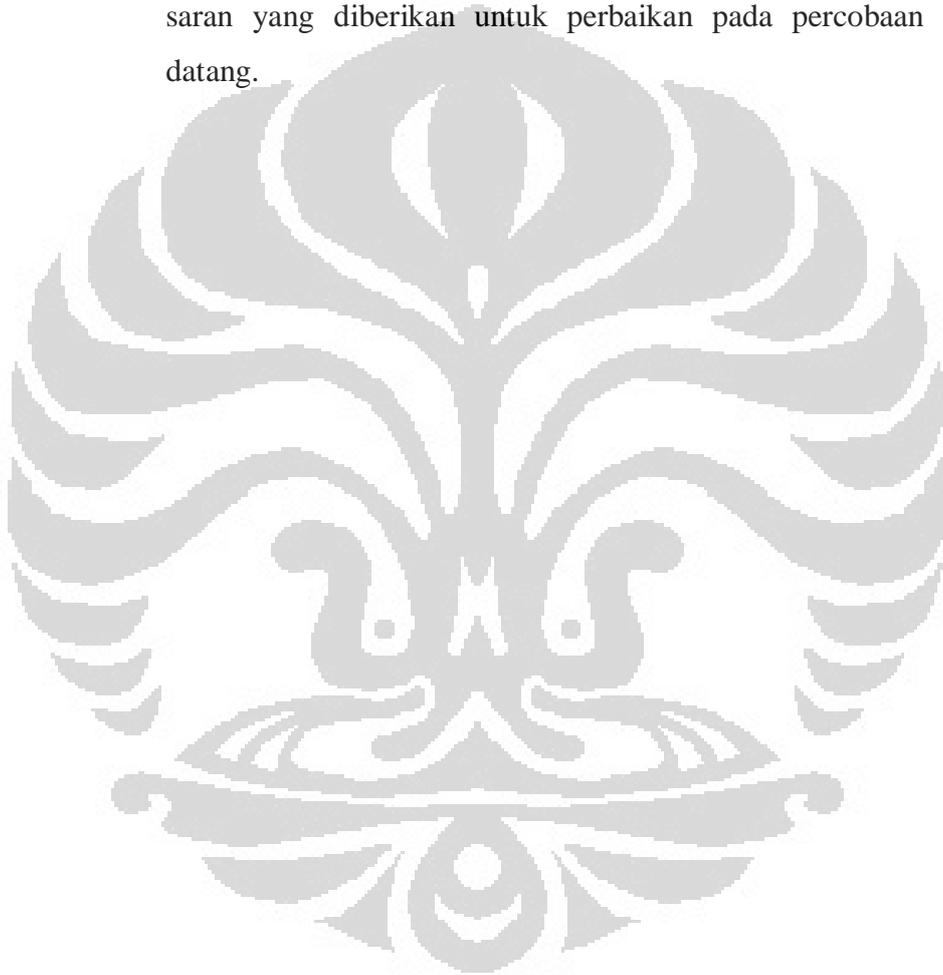
Bab ini berisikan sebagian data sekunder yang didapat, dan menyertakan contoh penjelasan mengenai perhitungan gerak mekanis angin, perkiraan potensi sumber daya angin, dan perhitungan produktivitas ideal turbin angin.

## BAB V ANALISIS HASIL PERHITUNGAN

Bab ini berisikan tentang hasil yang diperoleh dari proses pengujian, yaitu membandingkan antara hasil simulasi software dengan hasil percobaan dengan wind tunnel.

## BAB VI KESIMPULAN

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



## **BAB 2**

### **LANDASAN TEORI**

#### **2.1. Energi Alternatif**

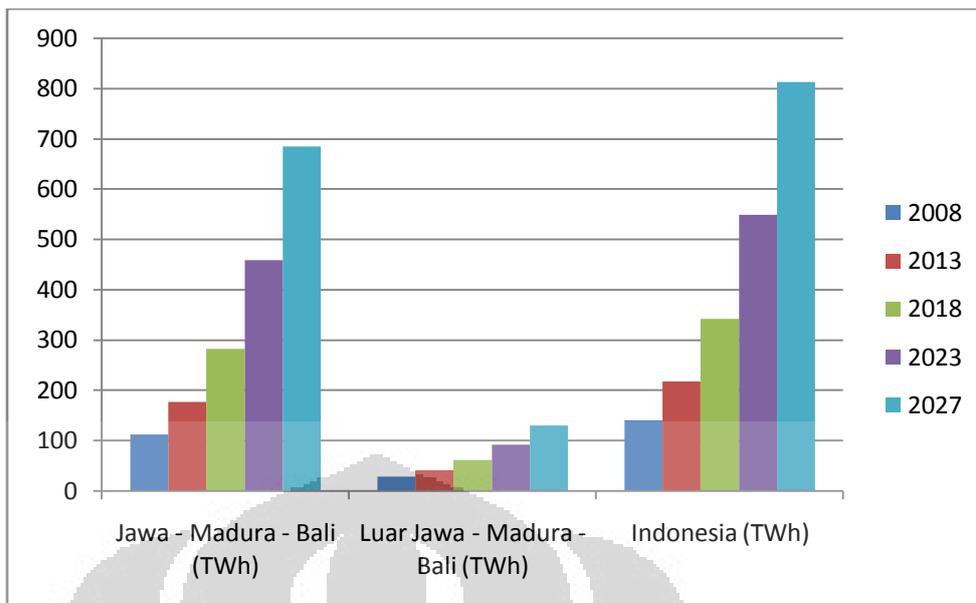
##### **2.1.1. Energi alternatif, baru dan terbarukan**

Energi alternatif adalah energi yang dapat digunakan sebagai pengganti energi yang berasal dari bahan bakar konvensional<sup>[5]</sup>. Sedangkan definisi dari energi terbarukan adalah energi yang berasal dari proses alam yang berkelanjutan dan senantiasa tersedia di alam sehingga tidak dikhawatirkan jumlahnya<sup>[6]</sup>. Energi alternatif dan terbarukan ini tentu saja sangat dibutuhkan di masa kini di mana bahan bakar konvensional semakin sedikit jumlahnya, sementara itu di sisi lain jumlah kebutuhan energi dunia semakin besar. Dengan semakin berkurangnya jumlah energi fosil, muncul beragam alternatif untuk mencari substitusi dari energi fosil tersebut. Energi alternatif meliputi energi surya, energi panas bumi, energi air, energi ombak, dan energi angin.

Energi angin memiliki potensi yang cukup besar untuk dimanfaatkan menjadi energi listrik di Indonesia. Beberapa wilayah di Indonesia memiliki potensi energi angin yang cukup besar, antara lain wilayah Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan, Pantai Selatan Jawa, dan Karimun Jawa<sup>[7]</sup>. Kendati demikian, dalam penelitian ini, pengembangan turbin angin sebagai pembangkit listrik lebih ditujukan serta diaplikasikan pada daerah permukiman.

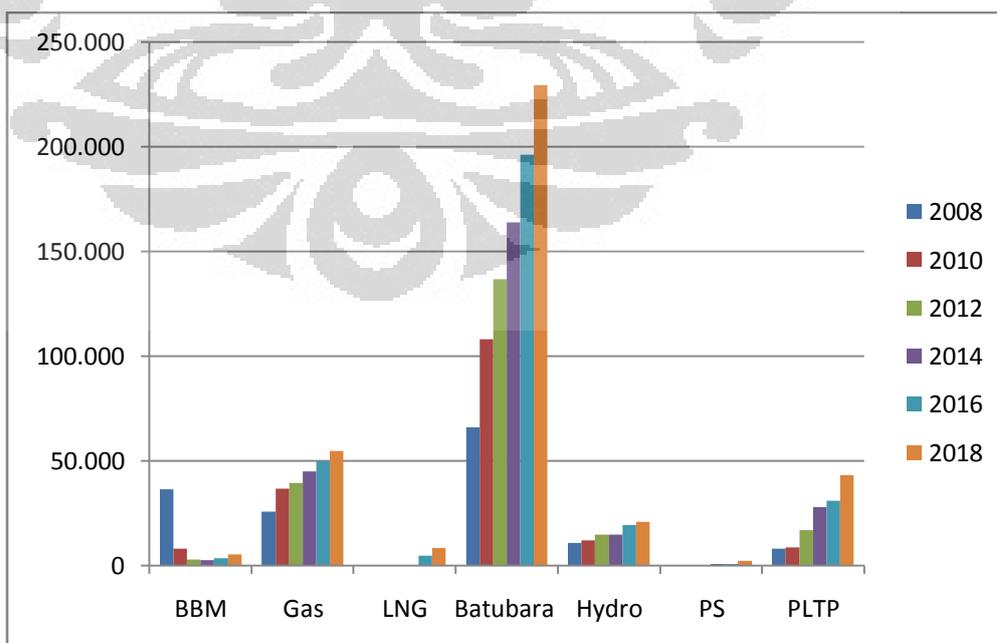
##### **2.1.2. Korelasi hubungan sumber daya energi angin dengan kebutuhan energi masa kini**

Sumber daya energi angin, sebagai salah satu sumber energi terbarukan, memiliki hubungan yang erat dengan konservasi energi. Data dari Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi Kementerian Energi Sumber Daya Mineral (Ditjen EBTKE Kementerian ESDM)<sup>[8]</sup> ditampilkan pada gambar [2.1] sebagai berikut:



Gambar [2.1] grafik realisasi dan proyeksi kebutuhan energi listrik di Indonesia

Dari gambar 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.

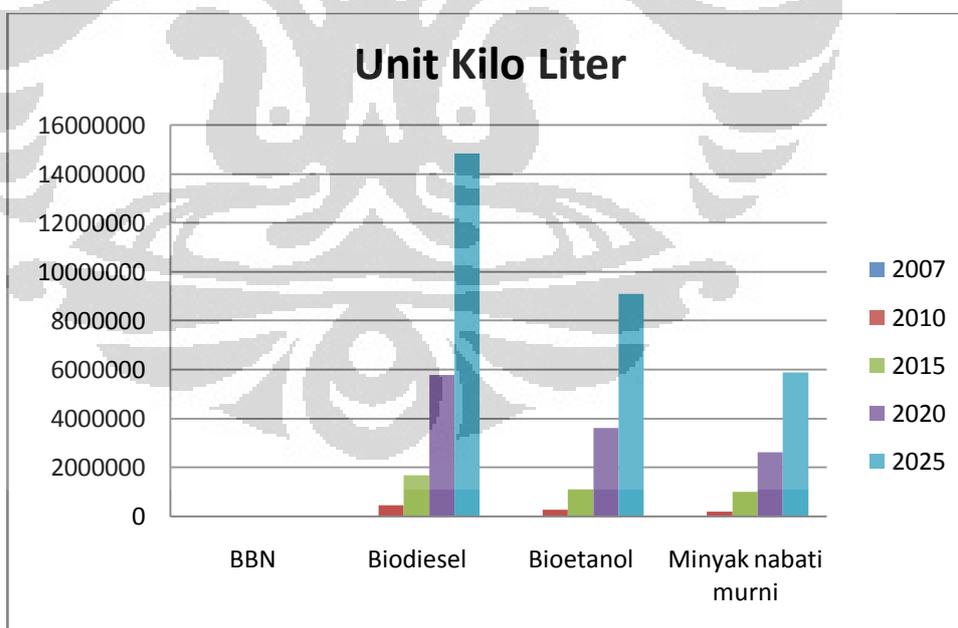


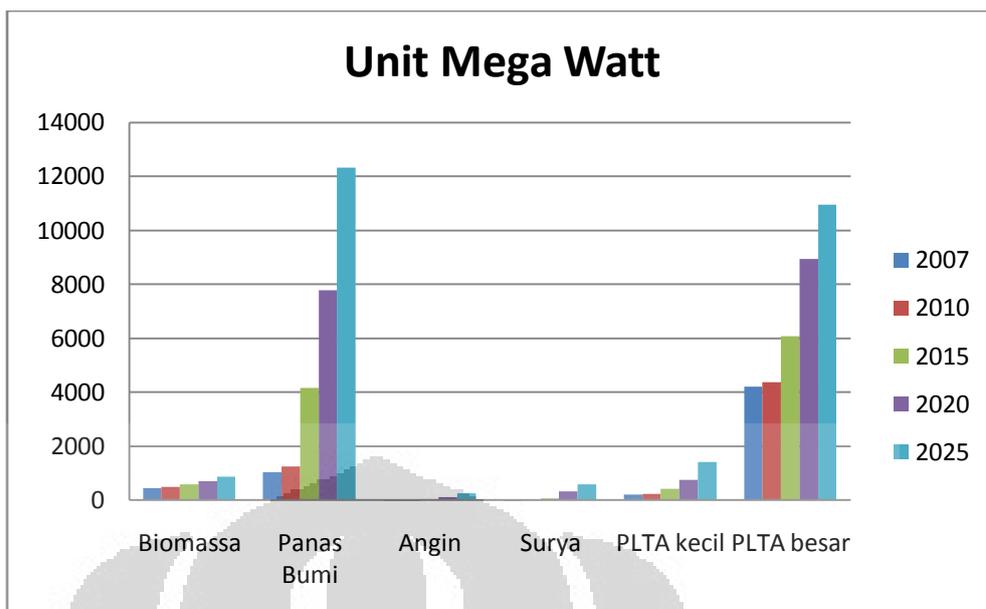
Gambar [2.2] grafik realisasi dan proyeksi pembangkitan listrik  
per jenis sumber energi di Indonesia

Berikutnya pada gambar [2.2], ditunjukkan 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 [2.1] Potensi dan implementasi energi terbarukan pada tahun 2007

Jenis Energi Baru Terbarukan	Potensi	Implementasi	Persentase Implementasi
Energi Air (Skala besar dan kecil)	75670 MW	4200 MW	5,55%
Panas Bumi	27000 MW	1052 MW	3,90%
Mini/Mikrohidro	500 MW	210 MW	42,00%
Biomassa	49810 MW	445 MW	0,89%
BBN		133,2 kiloliter	
Energi Surya	4,8 kWh/m <sup>2</sup> /hari	12 MW	
Energi Angin	3-6m/s (9290 MW)	2 MW	0,02%





Gambar [2.3] grafik target kapasitas terpasang penyediaan energi baru dan terbarukan di Indonesia per jenis energi hingga tahun 2025

Dari gambar [2.3], dapat kita lihat perbandingan antara potensi energi terbarukan 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; atau senilai 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 gambar [2.3], diperkirakan hingga tahun 2025, baru 256 MW energi listrik yang dihasilkan dari konversi energi angin.

Tabel [2.2] Tahap pengembangan PLTB hingga tahun 2025

	2007-2015	2015-2020	2020-2025
Pasar	19 MW on grid; 19 MW off grid	44 MW on grid; 44 MW off grid	64 MW on grid; 64 MW off grid
Investasi dan Harga	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
Produk	PLTB skala s.d. 300 kW	PLTB skala s.d. 750 kW	PLTB skala s.d. > 1 MW
Teknologi	PLTB skala kecil, kandungan lokal tinggi	PLTB skala menengah, kandungan lokal tinggi	PLTB skala besar, kandungan lokal tinggi
Litbang	Generator magnet permanen, putaran rendah, advanced airfoil	Struktur ringan dan kuat, sistem kontrol	Efisiensi tinggi

Tabel [2.3] Tahap pengembangan PLTB hingga tahun 2025

Tahun	satuan	2007	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2020	2025
Kapasitas	MW	2	4	11	18	26	33	40	128	256
Produksi	GWh	5	11	29	48	67	86	105	336	673
Investasi	juta dolar	10	20	56	92	128	164	200	512	768
Biaya produksi	juta dolar	3	5	15	24	34	43	53	135	202
Pengurangan emisi	ton CO <sub>2</sub>	1.574	3.148	8.814	14.481	20.147	25.814	31.480	100.736	201.472

Dari kedua tabel berikutnya, yaitu tabel [2.2] dan tabel [2.3], 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>.

## 2.2. Angin Sebagai Sumber Daya Energi

### 2.2.1. Definisi angin

Energi angin adalah aliran angin yang timbul akibat adanya perbedaan suhu antara dua tempat dengan kecepatan tertentu<sup>[9]</sup>. 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)<sup>[10]</sup>.

## 2.2.2. Potensi energi angin

### 2.2.2.1. Kecepatan angin rata-rata

Kecepatan angin rata-rata dapat dihitung dengan rumus:

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (2.1)$$

$V$  = kecepatan angin rata-rata (m/s)

$V_i$  = kecepatan angin yang terukur (m/s)

$t_i$  = lama angin bertiup dengan kecepatan  $V_i$

$n$  = banyak data pengukuran

### 2.2.2.2. Distribusi kecepatan angin relatif dan kumulatif

Suatu nilai frekuensi dari kecepatan angin rata-rata yang terjadi dapat dihitung dan dianalisis menggunakan fungsi distribusi relatif dan kumulatif.

Fungsi distribusi yang digunakan adalah distribusi probabilitas, dan distribusi Rayleigh.

Distribusi probabilitas

a) Fungsi Distribusi Relatif

$$0 \leq p(x) \leq 1, \sum p(x) = 1 \quad (1.2)$$

b) Fungsi Distribusi Kumulatif

$$F(x) = P(X \leq x) = \sum p(\xi) \quad (2.3)$$

$$F(x) = 1 - \sum p(\xi) \quad (2.4)$$

Distribusi Rayleigh

a) Fungsi Distribusi Relatif

$$p(U) = \frac{\pi}{2} \left( \frac{U}{\bar{U}} \right) \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{U}{\bar{U}} \right)^2 \right] \quad (2.5)$$

b) Fungsi Distribusi Kumulatif

$$F(U) = 1 - \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{U}{\bar{U}} \right)^2 \right] \quad (2.6)$$

### 2.2.2.3. Daya spesifik

Angin adalah udara yang memiliki massa dan bergerak dengan suatu kecepatan. Dari pergerakan ini, angin memiliki energi yang sebanding dengan massa, serta kecepatan. Nilai potensi energi angin dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut<sup>[11]</sup>:

$$E = 0,5 \cdot m \cdot V^2 \quad (2.7)$$

E = energi potensial angin (Joule)

m = massa udara (kg)

V = kecepatan angin (m/s)

Massa udara di sini adalah massa yang terkandung dalam suatu volum udara, dan nilainya dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut<sup>[12]</sup>:

$$m = \rho \cdot v \quad (2.8)$$

m = massa udara (kg)

$\rho$  = massa jenis udara (kg/m<sup>3</sup>)

v = volum udara (m<sup>3</sup>)

Volum udara yang terukur dapat ditentukan dari perkalian antara luas penampang lingkaran turbin dan panjang lintasan yang ditempuh udara dalam suatu waktu, dan nilainya dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$v = A \cdot x$$

A = luas penampang bidang putar turbin ( $m^2$ )

x = lintasan yang ditempuh angin dalam suatu waktu (m)

Dengan persamaan [2.8] dapat disubstitusi sehingga:

$$m = \rho \cdot A \cdot x$$

Dengan persamaan [2.7] dapat disubstitusi sehingga:

$$E = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot x \cdot V^2$$

$$p = \frac{dE}{dt} = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \frac{dx}{dt}$$

$$p = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

Dan daya spesifik dari angin per satuan luas bidang putar turbin, nilainya dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$P = \frac{p}{A} = 0,5 \cdot \rho \cdot V^3 \quad (2.9)$$

P = daya spesifik angin ( $W/m^2$ )

Angin bertiup melalui suatu turbin dan kemudian melepas sebagian energi kinetik kepada turbin tersebut, dan mengalami

perhambatan. Dari hal ini dapat disimpulkan bahwa kecepatan angin sebelum dan sesudah melewati turbin tidaklah sama. Perubahan momentum yang dialami udara dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\Delta M = m(V_1 - V_2)$$

$$P = m(V_1 - V_2)V$$

$V$  = kecepatan angin masuk (m/s)

$$0,5 \cdot m \cdot (V_1^2 - V_2^2)$$

$$0,5 \cdot m \cdot (V_1^2 - V_2^2) = m(V_1 - V_2)V$$

$$V = 0,5 \cdot (V_1 + V_2)$$

$$P = \rho \cdot A \cdot V \cdot (V_1 - V_2)V$$

$$P = \rho \cdot A \cdot \left(\frac{V_1 + V_2}{2}\right)^2 (V_1 - V_2)$$

$$P = \rho \cdot A \cdot V_1^3 [(1 + \alpha)(1 - \alpha^2)]/4$$

$$\alpha = \frac{V_2}{V_1}$$

$$\frac{dP}{d\alpha} = 1 + \alpha - \alpha^2 - \alpha^3 = 0$$

$$\alpha = 1/3$$

Energi maksimum yang dapat diambil oleh turbin adalah:

$$P_{max} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot A \cdot V_1^3 \quad (2.10)$$

Daya maksimal persatuan luas:

$$P_{max} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot V_1^3 \quad (2.11)$$

Daya per satuan luas yang terdapat di angin:

$$P = 0,5 \cdot \rho \cdot V_1^3 \quad (2.12)$$

Efisiensi maksimum turbin angin:

$$\eta = C_p = \frac{P_{max}}{P} = 0,59 \quad (2.13)$$

Daya spesifik yang dapat diambil oleh turbin angin:

$$P = 0,5 \cdot C_p \cdot \rho \cdot V_1^3 \quad (2.14)$$

#### 2.2.2.4. Energi spesifik

Energi spesifik turbin angin adalah energi yang dihasilkan turbin angin pada suatu nilai kecepatan dan periode waktu tertentu. Periode waktu yang dimaksud dapat berupa nilai rentang waktu; mingguan, bulanan, atau tahunan.

Energi spesifik turbin angin didapat dengan mengalikan daya spesifik turbin angin dengan jumlah frekuensi waktu. Untuk periode satu tahun nilai daya spesifik dikalikan dengan 8,760 (jumlah jam dalam satu tahun), dan untuk periode 8 tahun nilai daya spesifik dikalikan dengan nilai 64,512 (jumlah jam dalam 8 tahun).

#### 2.2.2.5. Profil irisan angin

Profil irisan angin digunakan sebagai alat perbandingan antara kecepatan angin dan ketinggian alat ukur/turbin angin. Perhitungan dapat diselesaikan dengan persamaan berikut<sup>[13]</sup>:

$$\frac{U(z)}{U(z_r)} = \left( \frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (2.15)$$

- $U(z)$  = kecepatan yang dicari  
 $U(z_r)$  = kecepatan pada referensi  
 $z$  = ketinggian yang dicari  
 $z_r$  = ketinggian pada referensi  
 $\alpha$  = kekasaran permukaan

#### 2.2.2.6. Keluaran daya turbin angin

Selain dipengaruhi oleh karakteristik lanskap dan karakteristik angin, daya listrik yang dihasilkan pada suatu wilayah juga dipengaruhi oleh karakteristik turbin angin yang dipasang. Karakteristik turbin angin yang harus diperhatikan adalah<sup>[14]</sup>:

- a) Kecepatan *cut in*
- b) Kecepatan nominal
- c) Kecepatan *shutdown*

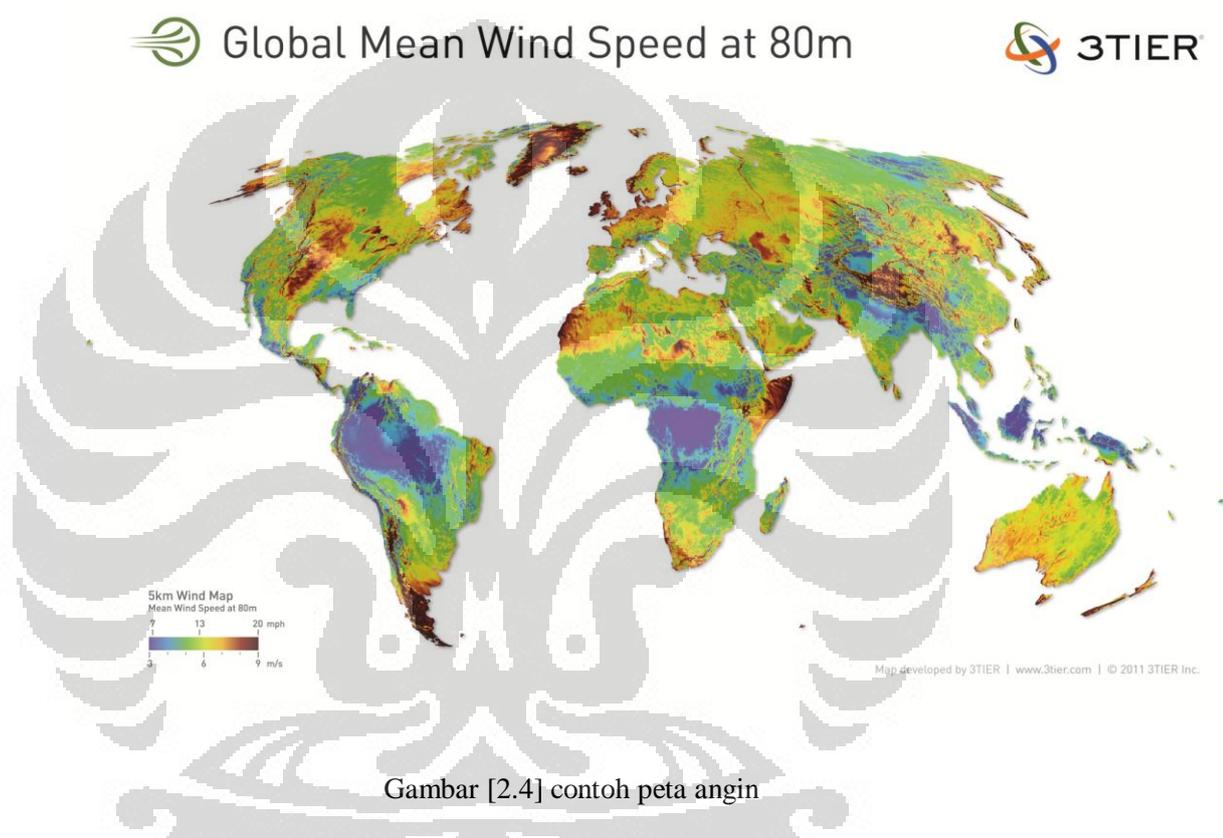
Kecepatan *cut in* adalah kecepatan awal di mana turbin angin mulai menghasilkan daya listrik. Sebelum kecepatan angin mencapai nilai kecepatan *cut in* yang dibutuhkan turbin angin, maka turbin angin tidak menghasilkan daya listrik. Kecepatan nominal merupakan nilai di mana kecepatan angin telah melampaui kecepatan *cut in* dan mencapai kecepatan angin nominal yang dapat diterima turbin angin. Kecepatan *shutdown* adalah nilai di mana kecepatan angin menjadi lebih besar dari kecepatan normal rotor turbin angin sehingga turbin angin melaksanakan mekanisme *shutdown* untuk mencegah kerusakan.

Berdasarkan referensi dari *Wind Energy Systems*, parameter-parameter untuk menentukan karakteristik kecepatan turbin angin adalah sebagai berikut:

- a) Kecepatan *cut in* =  $0,7 \cdot V_{\text{rata-rata}}$
- b) Kecepatan nominal =  $1,5 \cdot V_{\text{rata-rata}}$  hingga  $2 \cdot V_{\text{rata-rata}}$
- c) Kecepatan *shutdown* =  $3 \cdot V_{\text{rata-rata}}$  dan lebih

### 2.2.2.7. Peta angin

Peta angin adalah peta dalam berbagai skala yang menunjukkan lokasi potensi angin dalam sebuah cakupan wilayah tertentu. Dalam penelitian ini, peta angin yang dibuat mencakup seluruh wilayah Indonesia. Di bawah ini adalah contoh peta angin yang dibuat dalam skala global, dan mencakup lokasi potensi angin di seluruh dunia<sup>[15]</sup>.



Pada tahap akhir penelitian, data yang telah dikumpulkan dan dianalisis, dimasukkan ke dalam sebuah peta rupa bumi Indonesia. Dari peta tersebut dapat dilihat lokasi-lokasi di Indonesia yang berpotensi memiliki kecepatan angin rata-rata yang tinggi, dan menghasilkan energi yang cukup besar untuk sebuah turbin angin.

## 2.3. Turbin Angin

### 2.3.1. Turbin angin

Turbin angin pada awalnya adalah kincir angin, yang digunakan untuk keperluan pertanian<sup>[16]</sup>. Kemudian penggunaannya merambah menjadi penyedia akomodasi energi listrik, meskipun dalam jumlah yang tidak begitu besar.

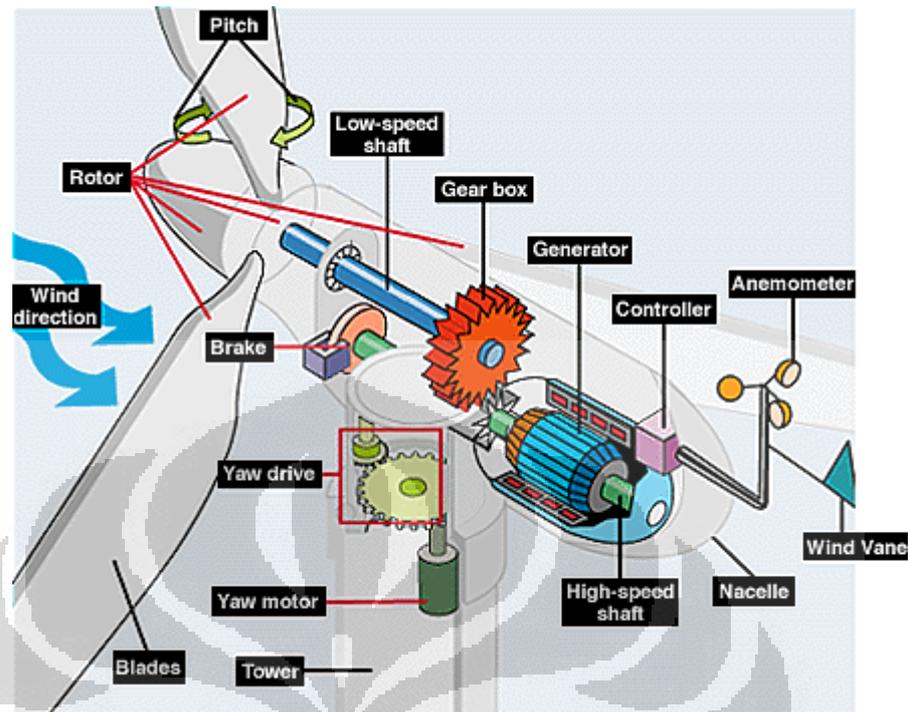
Kincir angin sudah digunakan oleh bangsa Persia 200 tahun sebelum Masehi. Kincir angin yang pertama kali tercatat dalam sejarah adalah jenis kincir angin dengan sumbu vertikal, dibangun di daerah Sistan –daerah perbatasan antara Iran-Afghanistan-Pakistan— pada abad ke-7<sup>[17]</sup>. Kemudian kincir angin mulai muncul di Eropa pada Abad Pertengahan. Catatan sejarah mencatat penggunaan kincir angin pertama kali sekitar abad ke-11 atau 12. Turbin angin pertama yang menghasilkan energi listrik dibangun pada bulan Juli tahun 1887 oleh James Blyth dari Skotlandia, diikuti dengan Charles Bush pada tahun 1888 dari Amerika Serikat, dan kemudian oleh Marcellus Jacobs<sup>[18]</sup>.

#### 2.3.1.1. 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<sup>[19]</sup>, yaitu;

- Komponen rotor.
- Komponen generator.
- Komponen struktural.



Gambar [2.5] Komponen-komponen dari turbin angin dengan sumbu horizontal

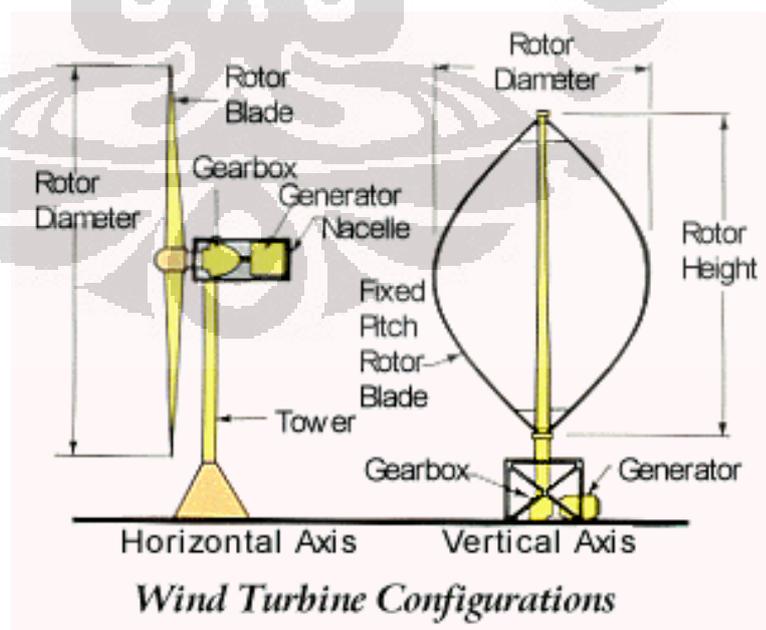
Sebuah turbin angin, seperti pada gambar [2.5], memiliki beberapa komponen penting untuk mendukung mekanisme kerjanya dalam mengkonversi energi kinetik dari angin menjadi energi listrik. Sebuah **anemometer** berfungsi untuk mengukur kecepatan angin, serta memberikan data kecepatan tersebut pada sistem kontrol. **Blades** atau bilah turbin pada turbin angin berfungsi untuk memberikan gerak rotasi dari angin yang bertiup/mengalir melalui turbin, kepada generator. **Generator** inilah yang menghasilkan listrik. **Brake** adalah cakram yang bisa digunakan secara mekanik, dengan listrik, maupun tenaga hidrolik, untuk menghentikan rotor dalam keadaan darurat. Sistem kontrol pada **controller** berfungsi menjalankan mesin pada kecepatan tertentu, contohnya pada 8-16 mil/jam, dan otomatis mematikan mesin di saat kecepatan mencapai 55 mil/jam. **Gear** pada **gear box** menghubungkan *shaft* dengan kecepatan rendah dengan yang berkecepatan tinggi, dan meningkatkan kecepatan rotasional, hingga generator dapat menghasilkan listrik. **High & low-speed shaft** berfungsi mendistribusikan tenaga rotasional, dari bilah turbin yang berputar ke generator di dalam turbin. **Nacelle** merupakan *body* dari turbin angin, yang melindungi/membungkus

komponen-komponen lain. **Pitch** berfungsi mengendalikan kecepatan rotor dan mempertahankan rotor dari berubah arah putar karena fluktuasi pada kecepatan dan arah angin. Bilah turbin dan hub pada turbin angin disebut dengan **rotor**. Turbin angin diletakkan jauh di atas menara untuk dapat menangkap angin. **Tower** terbuat dari baja, atau beton. **Wind vane** berfungsi menentukan arah angin, dan berkomunikasi dengan *yaw drive* untuk menentukan orientasi turbin angin. **Yaw drive** berfungsi untuk mempertahankan posisi rotor agar tetap menghadap arah angin. **Yaw motor**: merupakan rotor yang memberi tenaga pada *yaw drive*<sup>[20]</sup>.

### 2.3.1.2. 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<sup>[21]</sup>,



Gambar [2.6] HAWT dan VAWT

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 Prancis, yang mendapat hak paten dari desain tersebut pada tahun 1931<sup>[22]</sup>. 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<sup>[23]</sup>. 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 se-efisien dengan penggunaan bilah rotor konvensional, sehingga menghasilkan energi yang lebih sedikit<sup>[24]</sup>.

### 2.3.2. 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<sup>[3]</sup>. 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 [2.7] Turbin angin skala kecil pada atap rumah

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<sup>[25]</sup>. Mayoritas dari turbin angin tersebut adalah HAWT.

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.

### 2.3.3. Turbin angin di Indonesia

Pada saat ini, naiknya permintaan terhadap energi yang bersih dapat diperbarui semakin tinggi. 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<sup>[26]</sup>.

Sementara itu sebagai salah satu kebijakan dari diversifikasi energi Ditjen Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi (DJEBTKE) Kementerian Energi Sumber Daya Mineral (ESDM) bersama UPC Asia WindLimited telah menandatangani nota kesepahaman (MoU) dalam sebuah proyek PLTB skala besar yang rencananya akan dibangun di pesisir Pantai Samas, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. PLTB ini ditargetkan

ini memiliki kapasitas 50 MW yang meliputi pembangunan 33 turbin angin dengan kapasitas masing-masing sebesar 1,5 MW<sup>[27]</sup>.

## **2.4. Kebijakan Pengembangan Energi Angin**

### **2.4.1. 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 dikeluarkan dan dilakukan oleh pemerintah adalah sebagai berikut<sup>[28]</sup>;

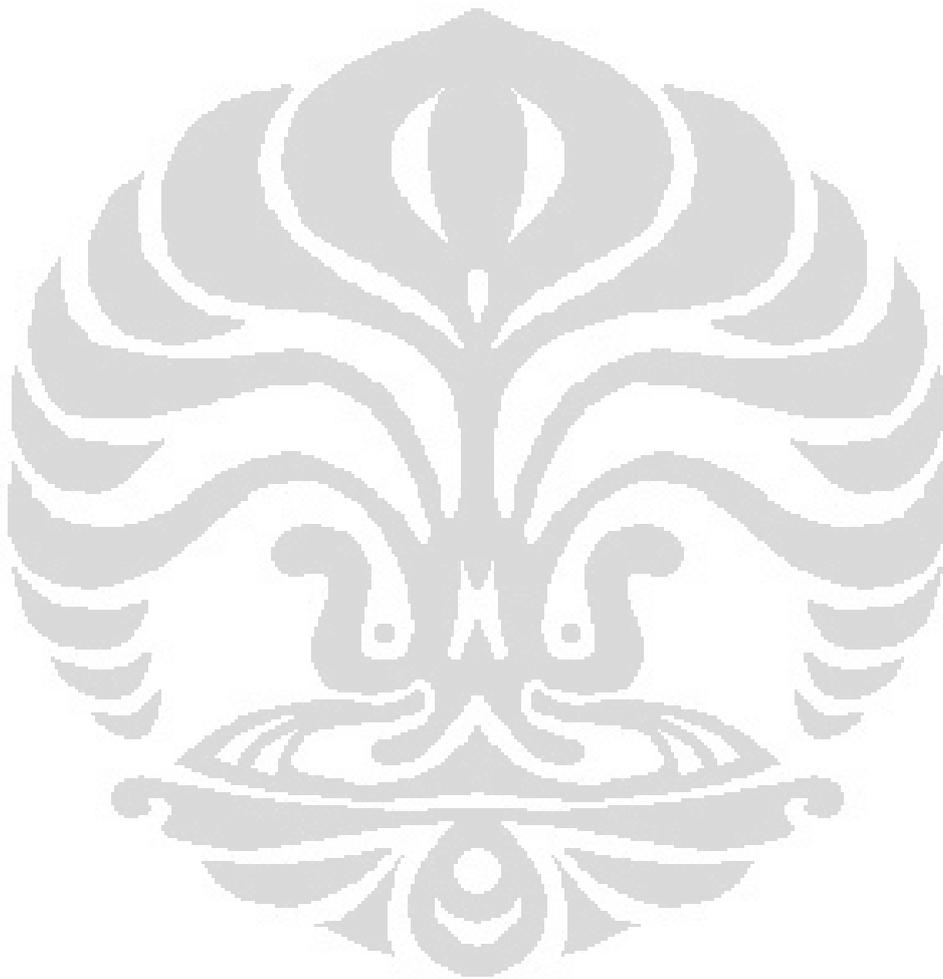
- Undang-undang Ketenagalistrikan No.30 tahun 2009
- Undang-undang Energi No.30 tahun 2007
- Peraturan Pemerintah No.26 tahun 2006, sebagai perubahan kedua atas Peraturan Pemerintah No.10 tahun 1989, tentang Penyediaan dan Pemanfaatan Tenaga Listrik
- Peraturan Presiden No.5 tahun 2006 tentang Kebijakan 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 Propinsi 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.

### **2.4.2. Kebijakan pengembangan energi angin**

- Kebijakan Investasi dan Pendanaan.

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



## BAB 3

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1. Pengambilan Data Sekunder

Data sekunder meliputi karakteristik angin di seluruh wilayah Indonesia sebanyak 33 propinsi, yaitu; kecepatan angin, tekanan, serta temperatur udara dari tahun 2000-2007. Data yang ada disajikan dalam bentuk rata-rata per bulan selama 8 tahun, dan kemudian dihitung rata-rata per tahun. Sebagai contoh, di bawah ditampilkan tabel untuk propinsi Aceh dengan lokasi stasiun BMKG di Blang Bintang dan ketinggian instrumen ukur 21 meter<sup>[29]</sup>.

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

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

Selain data karakteristik angin di propinsi Aceh, terdapat 32 data propinsi lain yang disajikan seperti tabel di atas pada bagian Lampiran.

##### 3.1.1. *Atmospheric boundary layer*

Proses perhitungan dan analisis terhadap potensi energi angin membutuhkan beragam variabel, salah satunya adalah *atmospheric boundary layer*. Lapisan ini adalah bagian terendah dari keseluruhan lapisan atmosfer dan karakteristik yang dimiliki dipengaruhi langsung oleh kontak dengan permukaan Bumi. Karakteristik yang mempengaruhi lapisan ini adalah:

- a) Tekanan dan kerapatan udara pada tingkat atmosfer tersebut.
- b) Kestabilan lapisan.
- c) Turbulensi
- d) Kekasaran permukaan, dalam hal ini permukaan lapisan Bumi
- e) Perubahan kondisi pada permukaan lapisan Bumi
- f) Bentuk dan elevasi tanah

Dalam analisis potensi energi angin, keenam karakteristik tersebut perlu diperhitungkan dalam menentukan profil angin untuk aplikasi energi angin. Penelitian yang dilakukan menggunakan data sekunder secara keseluruhan, mulai dari data kecepatan angin rata-rata, tekanan dan temperatur udara, serta arah angin, sehingga variabel *atmospheric boundary layer* tidak dijelaskan secara detail.

### 3.2. Penentuan Metode Hitung *wind-mapping*

Untuk melakukan perhitungan terhadap potensi angin di seluruh Indonesia dan kemudian memetakannya, diperlukan pengukuran dan analisis data angin yang memadai, guna mengetahui secara tepat potensi angin di propinsi-propinsi Indonesia.

Pekerjaan yang tepat dilakukan adalah<sup>[30]</sup>:

1. Melakukan pengukuran, pencatatan, dan analisis data angin secara kontinu pada suatu titik (daerah) yang akan dihitung potensi angin. Diperlukan data minimal selama satu tahun, agar data-data tersebut dapat mewakili karakteristik angin di suatu titik.
2. Mengolah data.
3. Menentukan kelas kecepatan angin berdasarkan kecepatan rata-rata dan potensi energi yang tersedia. Contohnya pada tabel di bawah ini<sup>[31]</sup>:

Tabel [3.2] Klasifikasi Kelas Potensi Energi Angin

Kelas	Kecepatan rata-rata tahunan	Energi tahunan
Skala kecil	2,5 m/s - 4 m/s	< 200 kWh/m <sup>2</sup>
Skala menengah	4 m/s - 5 m/s	200 kWh/m <sup>2</sup> - 1000 kWh/m <sup>2</sup>

Skala besar	> 5 m/s	> 1000 kWh/m <sup>2</sup>
-------------	---------	---------------------------

Di bawah ini dijelaskan metode yang dilakukan untuk menghitung potensi energi angin pada suatu propinsi, dan kemudian disusun ke dalam sebuah *wind-map*.

### 3.2.1. Metode Olah Data untuk Analisis Potensi Energi Angin

#### 3.2.1.1. Perhitungan Kecepatan Rata-rata

Tahap pertama dalam menghitung energi angin adalah mengetahui kecepatan angin rata-rata, yaitu sesuai data yang ada, dalam rentang waktu tahunan.

Kecepatan angin rata-rata dapat dihitung dengan persamaan (2.1):

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (2.1)$$

Kecepatan angin rata-rata untuk satu bulan misalnya kecepatan angin rata-rata yang didapat dari hari pertama hingga hari terakhir dalam periode bulan tersebut, dan digunakan untuk mengetahui variasi kecepatan angin yang berlangsung selama periode satu bulan tersebut.

#### 3.2.1.2. Perhitungan Distribusi Probabilitas Kecepatan Angin

Tahap kedua adalah menghitung peluang lama terjadinya angin pada suatu nilai, serta di atas kecepatan tertentu. Nilai ini dapat ditentukan dengan menggunakan distribusi probabilitas:

$$0 \leq p(x) \leq 1, \sum p(x) = 1 \quad (3.2)$$

$$F(x) = P(X \leq x) = \sum p(\xi) \quad (2.3)$$

$$F(x) = 1 - \sum p(\xi) \quad (2.4)$$

### 3.2.1.3. Perhitungan Distribusi Rayleigh Kecepatan Angin

Metode lain yang dapat dilakukan untuk menghitung peluang lama terjadinya angin dapat menggunakan distribusi Rayleigh. Konsepnya serupa dengan distribusi probabilitas biasa, namun membutuhkan variasi data sekunder yang lebih banyak.

$$p(U) = \frac{\pi}{2} \left( \frac{U}{\bar{U}} \right) \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{U}{\bar{U}} \right)^2 \right] \quad (2.5)$$

$$F(U) = 1 - \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{U}{\bar{U}} \right)^2 \right] \quad (2.6)$$

### 3.2.1.4. Perhitungan Daya Spesifik

Pada tabel [4] ditampilkan karakteristik angin berupa kecepatan, tekanan udara, dan temperatur udara. Data-data ini dibutuhkan untuk menyelesaikan perhitungan kerapatan udara<sup>[32]</sup>, dengan persamaan sebagai berikut;

$$\rho = \frac{P}{R_a \cdot T} \quad (2.16)$$

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

$P$  = tekanan udara (kPa)

$R_a$  = konstanta gas ideal

$T$  = temperatur udara (K)

Kemudian pada tahap selanjutnya, data kerapatan udara tersebut digunakan ke dalam persamaan [2.13] untuk mendapat nilai daya spesifik pada rata-rata kecepatan yang dihitung.

$$P = 0,5 \cdot C_p \cdot \rho \cdot V^3 \quad (2.14)$$

### 3.2.1.5. Perhitungan Energi Spesifik

Energi spesifik yang dihasilkan adalah perkalian antara daya spesifik dan lama angin bertiup pada suatu nilai kecepatan dalam suatu rentang waktu. Dari data yang didapat, periode yang diobservasi selama 8 tahun (64,512 jam). Maka untuk mendapatkan nilai energi spesifik dari suatu wilayah, nilai daya spesifik pada wilayah tersebut dikalikan dengan jumlah jam terjadinya kecepatan angin yang diinginkan.

### 3.2.1.6. Perhitungan Keluaran Daya dari Turbin Angin

Tahap berikutnya adalah menghitung keluaran daya dari turbin angin. Karakteristik turbin angin yang harus diperhatikan adalah <sup>[14]</sup>:

- a) Kecepatan *cut in*
- b) Kecepatan nominal
- c) Kecepatan *shutdown*

Berdasarkan referensi dari *Wind Energy Systems*, parameter-parameter untuk menentukan karakteristik kecepatan turbin angin adalah sebagai berikut:

- a) Kecepatan *cut in* =  $0,7 \cdot V_{\text{rata-rata}}$
- b) Kecepatan nominal =  $1,5 \cdot V_{\text{rata-rata}}$  hingga  $2 \cdot V_{\text{rata-rata}}$
- c) Kecepatan *shutdown* =  $3 \cdot V_{\text{rata-rata}}$  dan lebih

Dengan demikian, hasil potensi energi angin di seluruh wilayah Indonesia, beserta klasifikasi karakteristik turbin angin yang didapat kemudian, dapat disusun ke dalam sebuah peta.

## 3.2.2. Pengolahan Data untuk Analisis *Wind-map*

Pengolahan data untuk tahap analisis *wind-map* dimulai dengan menyiapkan data karakteristik angin per propinsi, yaitu terdiri dari kecepatan angin, tekanan dan temperatur udara, daya spesifik, energi spesifik, dan *output*

daya turbin angin. Kemudian data-data per propinsi tersebut diintegrasikan ke dalam peta wilayah Indonesia, sehingga dapat terlihat lebih jelas potensi tiap daerah terhadap sumber energi angin.

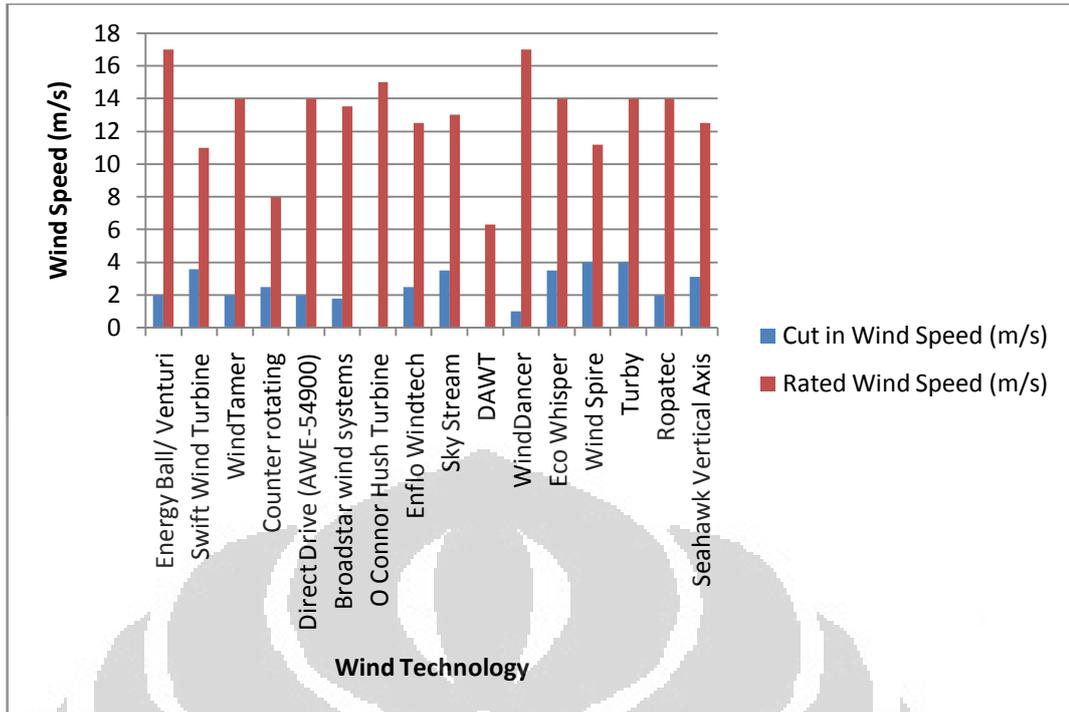
### 3.3. Penentuan Referensi Teknologi Turbin Angin

Dalam menyusun sebuah *wind map* yang dilengkapi dengan referensi teknologi, dibutuhkan data yang terperinci mengenai jenis-jenis turbin angin yang ada. Berikut adalah daftar jenis turbin angin yang tersedia di pasaran<sup>[33]</sup>:

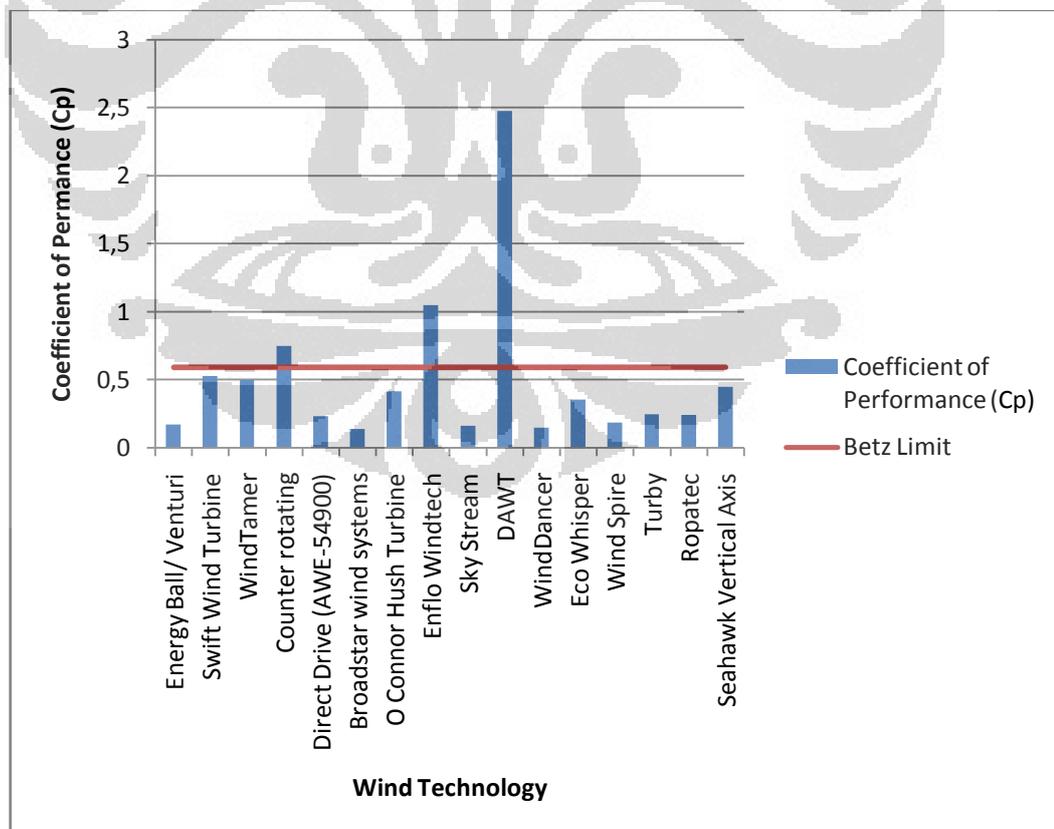
Tabel [3.3] Tipe Turbin Angin

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	1,1	2-40	2	17	0,5	0,95
2	Swift Wind Turbine	2,1	3,6-64,8	3,6	11	1,5	3,46
3	WindTamer	1,4	2-25	2	14	1,3	1,54
4	Counter rotating	4,4	2,5-40	2,5	8	3,6	15,28
5	Direct Drive (AWE-54900)	54	2-25	2	14	900	2289,06
6	Broadstar wind systems	3,05	1,8-35	1,8	13,5	10	46,63
7	O Connor Hush Turbine	1	N/A	N/A	15	0,68	0,78
8	Enflo Windtech	0,71	2,5-55	2,5	12,5	0,5	0,39
9	Sky Stream	3,72	3,5-63	3,5	13	2,4	10,86
10	Diffuser Augmented Wind Turbine	1,83	N/A	Controller Specific	6,3	1	2,63
11	WindDancer	2,98	N/A	1	17	3,2	6,97
12	Eco Whisper	6,5	N/A	3,5	14	20	33,16
13	Wind Spire	1,2	4-45	4	11,2	1,2	7,32
14	Turby	0,25	4-55	4	14	2,5	5,3
15	Ropatec	3,3	-	2	14	6	8,55
16	Seahawk Vertical Axis	0,76	N/A	3,1	12,5	0,5	0,93

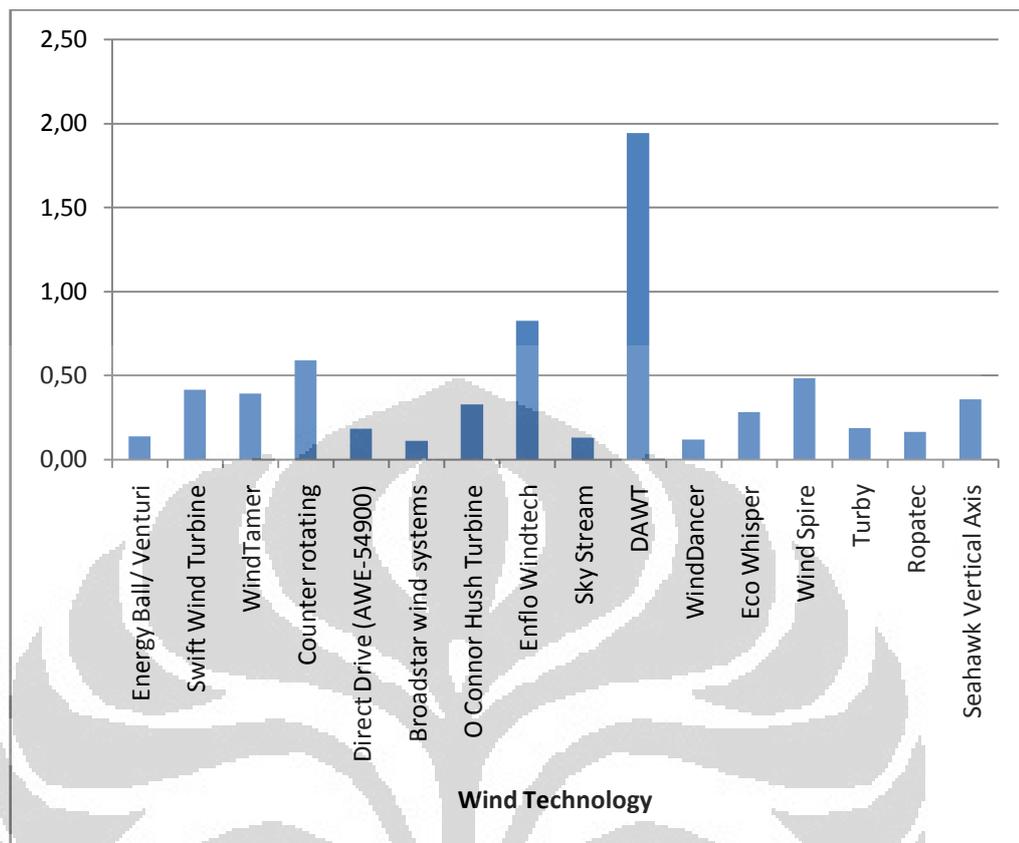
Dari data-data tersebut, disusun perbandingan antara nilai *cut-in* dan *rated wind speed*, nilai  $C_p$ , dan nilai *power per unit length* terhadap beragam tipe turbin angin<sup>[34]</sup>.



Gambar [3.1] Grafik perbandingan nilai *cut-in* dan *rated wind speed* terhadap beragam tipe turbin angin.



Gambar [3.2] Grafik perbandingan nilai Cp terhadap beragam jenis turbin angin



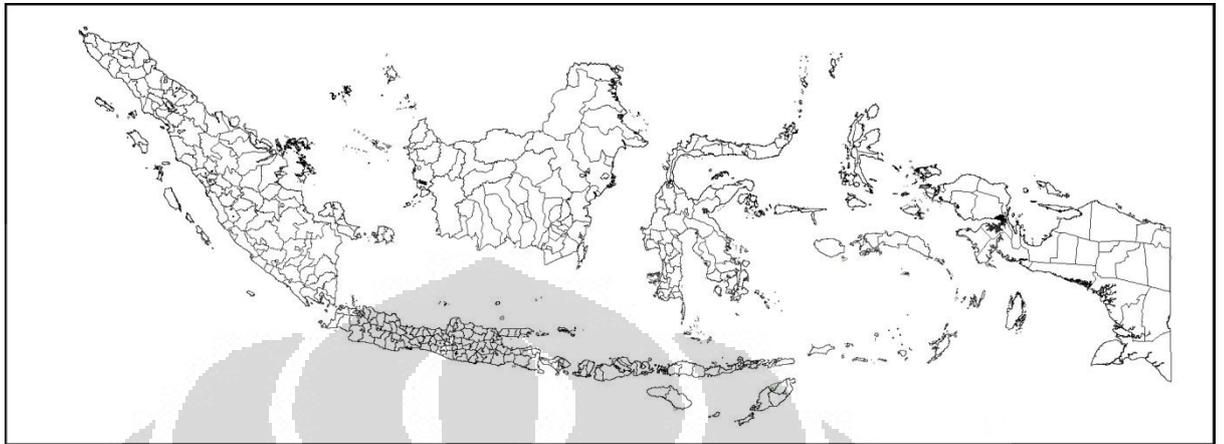
Gambar [3.3] Grafik perbandingan kecepatan *cut in* per jenis turbin angin

### 3.4. Komparasi *wind-map* dengan Teknologi Turbin Angin

Pada tahap komparasi, terdapat dua pekerjaan yang dilakukan untuk mendapatkan hasil *wind map* yang baik;

- a) Pertama adalah menyusun titik per wilayah (*plotting*) berdasarkan data karakteristik angin yang telah diolah. Resolusi data mencapai tingkat propinsi dan maka dari itu ditampilkan 33 propinsi di seluruh wilayah Indonesia dengan masing-masing wilayah memiliki karakteristik angin dan potensi energi listrik.
- b) Kedua adalah menyusun titik per wilayah berdasarkan data karakteristik turbin angin yang telah didapat. Resolusi data mencapai tingkat propinsi, dan disatukan dengan hasil *plotting* data karakteristik angin sebelumnya. Dengan

begitu, didapat hasil *wind map* yang memuat tidak hanya karakteristik angin dan potensi energi per wilayah, namun juga karakteristik turbin angin yang tepat untuk seluruh wilayah tersebut.



Gambar [3.4] peta Indonesia

Pada peta Indonesia yang telah dibuat serta dipecah ke dalam tingkat kabupaten hingga ke tingkat propinsi, seperti pada contoh gambar di atas, akan dapat diketahui wilayah mana yang memiliki potensi angin yang cukup untuk dapat dipasang instalasi turbin angin dan kemudian menghasilkan energi listrik. Plot pada tiap wilayah tersebut akan dibandingkan dan disesuaikan dengan data referensi turbin angin, sesuai karakteristik dari jenis dan produk turbin angin tersebut.

## BAB 4

### DATA

#### 4.1. Data Sekunder

##### 4.1.1. Perhitungan Kecepatan Rata-rata Angin

Kecepatan angin rata-rata dapat dihitung dengan persamaan:

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (2.1)$$

Kecepatan angin pada propinsi Aceh, yang diwakili oleh daerah Blang-Bintang, per bulan, pada tiap tahun dari tahun 2000-2007 adalah:

Tabel [4.1] Kecepatan angin rata-rata periode 2000-2007 di Blang-Bintang, Aceh (dalam m/s)

	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agt	Sep	Okt	Nov	Des
2000	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0
2001	0,5	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5
2002	3,1	0,0	2,6	1,5	1,5	5,1	2,6	1,5	2,1	1,0	0,5	0,5
2003	0,5	3,1	2,6	1,5	5,1	3,1	2,1	2,1	2,6	1,0	1,0	2,6
2004	3,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	1,5	2,1	1,5	2,1	2,1	2,6
2005	2,1	2,1	2,1	2,1	1,5	2,1	1,5	2,1	2,1	2,6	2,1	2,1
2006	2,1	2,1	2,1	2,1	1,5	2,1	1,5	2,1	2,1	2,6	2,1	2,1
2007	2,1	2,1	2,1	2,1	1,5	2,1	1,5	2,1	2,1	2,6	2,1	2,1

Dengan menggunakan persamaan [2.1], didapat hasil untuk rata-rata kecepatan angin pada tahun 2000 adalah :

$$\bar{V} = \frac{(0,5 + 0,5 + 0,5 + 0,5 + 0,5 + 0,5 + 0,5 + 0,5 + 0,5 + 0,5 + 0 + 0)}{12}$$

$$\bar{V} = 0,43 \text{ m/s}$$

Metode yang sama dilakukan untuk periode tahun-tahun berikutnya, sehingga didapat rata-rata kecepatan angin di Blang-Bintang, Aceh dari tahun 2000-2007 adalah:

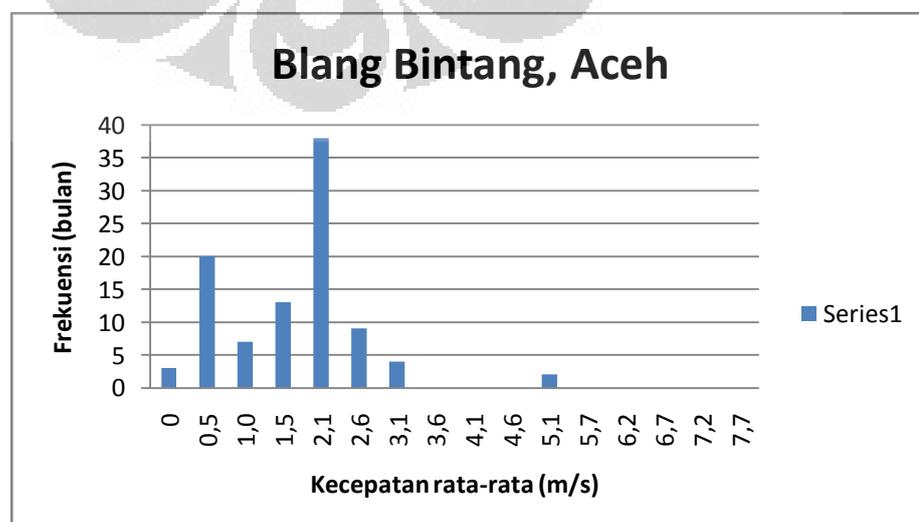
Tabel [4.2] Kecepatan angin rata-rata di Blang-Bintang, Aceh (dalam m/s)

Propinsi	Tahun	V rata-rata
Aceh	2000	0,43
	2001	0,77
	2002	2,01
	2003	2,27
	2004	2,10
	2005	2,01
	2006	2,01
	2007	2,01

#### 4.1.2. Perhitungan Distribusi Probabilitas Kecepatan Angin Relatif dan Kumulatif

Nilai kecepatan angin rata-rata per tahun dibutuhkan untuk mendapatkan nilai daya spesifik dan energi yang dihasilkan per tahun. Untuk perhitungan lebih detil dibutuhkan metode perhitungan distribusi probabilitas kecepatan angin sebelumnya.

Dari tabel [4.1], disusun kelas kecepatan angin berdasarkan data sekunder yang ada, contohnya terdapat pada gambar berikut:



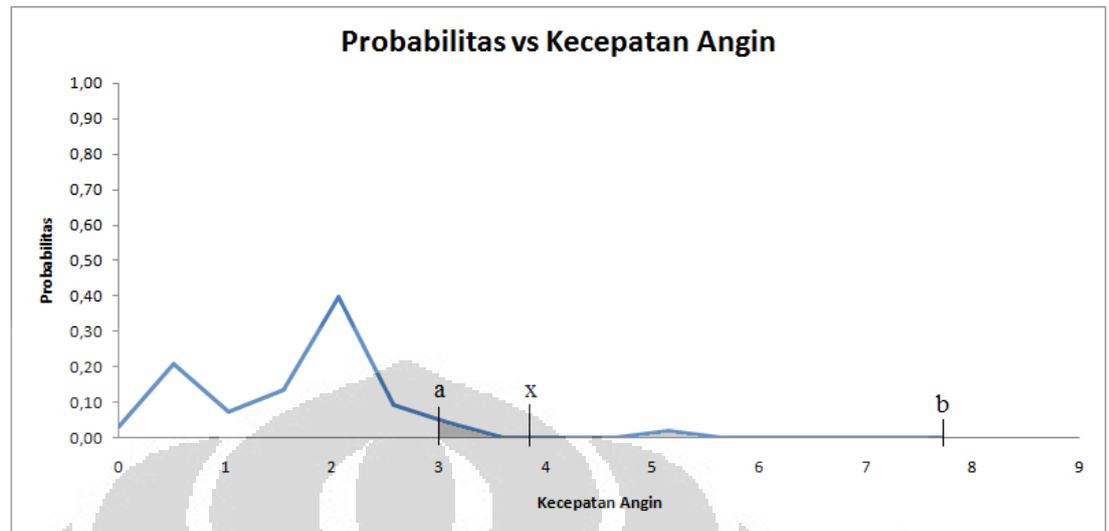
Gambar [4.1] grafik frekuensi kecepatan angin per bulan untuk daerah Blang Bintang, Aceh periode 2000-2007

Dari gambar [4.1], disusun ke dalam tabel dengan distribusi probabilitas menggunakan persamaan [2.2] dan [2.3], sehingga didapat hasil sebagai berikut:

Tabel [4.3] Hasil distribusi probabilitas kecepatan angin daerah Blang-Bintang, Aceh periode 2000-2007

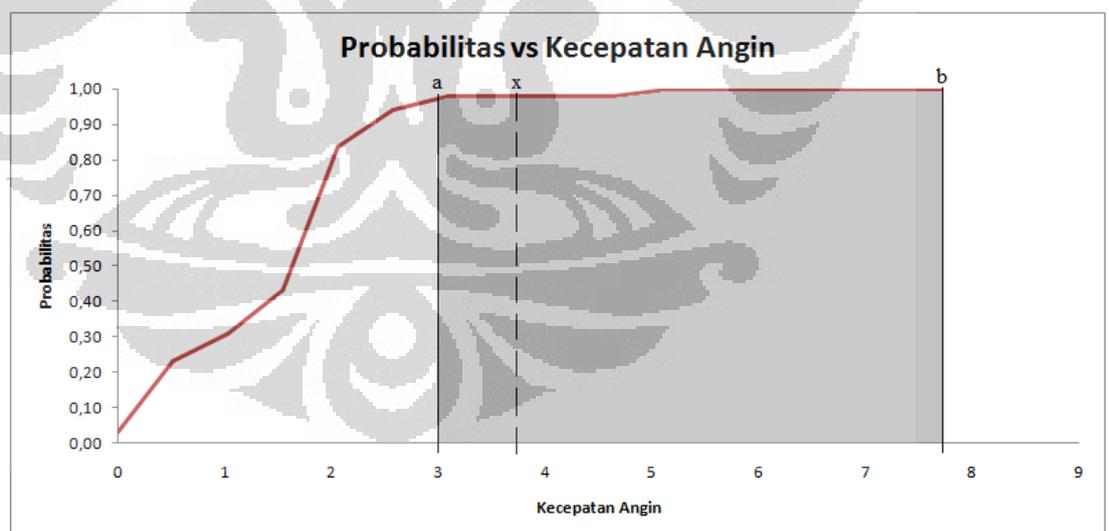
V rata-rata (m/s)	peluang relatif	bulan (relatif)	peluang kumulatif	bulan (kumulatif)	jam (relatif)	jam (kumulatif)
0	0,03	3	0,97	93	2016	62496
0,5	0,21	20	0,76	73	13440	49056
1,0	0,07	7	0,69	66	4704	44352
1,5	0,14	13	0,55	53	8736	35616
2,1	0,40	38	0,16	15	25536	10080
2,6	0,09	9	0,06	6	6048	4032
3,1	0,04	4	0,02	2	2688	1344
3,6	0,00	0	0,02	2	0	1344
4,1	0,00	0	0,02	2	0	1344
4,6	0,00	0	0,02	2	0	1344
5,1	0,02	2	0,00	0	1344	0
5,7	0,00	0	0,00	0	0	0
6,2	0,00	0	0,00	0	0	0
6,7	0,00	0	0,00	0	0	0
7,2	0,00	0	0,00	0	0	0
7,7	0,00	0	0,00	0	0	0

Probabilitas dalam tabel [4.3] disusun dalam bentuk grafik sebagai berikut:



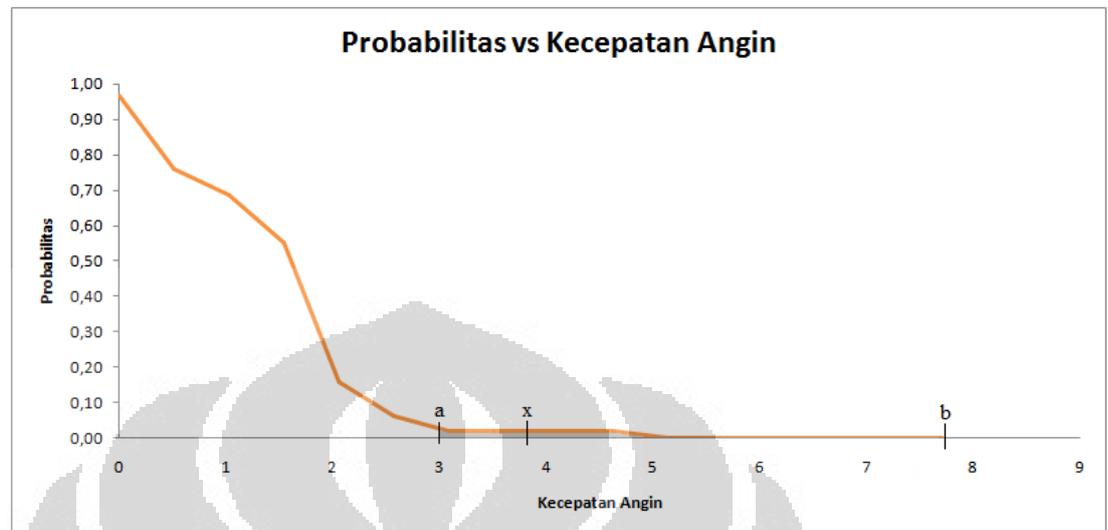
Gambar [4.2] grafik probabilitas kecepatan angin rata-rata di daerah Blang Bintang, Aceh periode 2000-2007

Kemudian pada tabel [4.3] dilakukan perhitungan distribusi kumulatif dengan persamaan [2.3], didapat hasil sebagai berikut:



Gambar [4.3] grafik probabilitas kecepatan angin rata-rata di daerah Blang Bintang, Aceh periode 2000-2007

Pada tahap akhir dilakukan perhitungan distribusi kumulatif dengan menggunakan persamaan [2.4], maka didapat hasil sebagai berikut:



Gambar [4.4] grafik probabilitas kecepatan angin rata-rata di daerah Blang Bintang, Aceh periode 2000-2007

Nilai probabilitas tersebut disusun per kelas sesuai dengan tingkat kecepatan angin rata-rata. Dari nilai yang didapat, kemudian ditentukan jumlah total bulan dan jam (total 96 bulan, dan 64512 jam dalam 8 tahun) terjadinya kecepatan angin tersebut dalam periode tahun 2000 hingga tahun 2007. Sehingga dari grafik pada gambar [4.4] didapat hasil nilai probabilitas terjadinya kecepatan angin rata-rata di atas 3 m/s adalah sebesar 0,2.

#### 4.1.3. Perhitungan Daya Spesifik

Data yang dianalisis sebelumnya menghasilkan nilai distribusi probabilitas dalam bentuk waktu bulanan dan dalam jam. Nilai ini digunakan untuk mendapat nilai daya spesifik. Dengan menggunakan persamaan [2.16]:

$$\rho = \frac{P}{R_a \cdot T} \quad (2.16)$$

Nilai kerapatan udara didapat dari variabel tekanan dan suhu udara, contohnya pada tabel berikut:

Tabel [4.4] data tekanan (kPa) dan temperatur udara (K) rata-rata untuk propinsi Aceh tahun 2000-2007

Propinsi	Tahun	kPa	K
Aceh	2000	100,89	299,15
	2001	101,03	299,32
	2002	101,01	299,65
	2003	101,01	300,13
	2004	101,43	299,92
	2005	101,39	299,99
	2006	101,41	300,23
	2007	101,22	299,38

Sebagai contoh, untuk daerah Blang-Bintang, Aceh, pada tahun 2000, nilai kerapatan udaranya adalah:

$$\rho = \frac{100,89}{R_a \cdot 299,15} = 1,18 \text{ kg/m}^3$$

Metode yang sama dilakukan pada periode tahun berikutnya, sehingga didapat hasil kerapatan udara seperti berikut:

Tabel [4.5] kerapatan udara ( $\text{kg/m}^3$ ) untuk daerah Blang-Bintang, Aceh tahun 2000-2007

Propinsi	Tahun	$\rho$
Aceh	2000	1,18
	2001	1,18
	2002	1,17
	2003	1,17
	2004	1,18
	2005	1,18
	2006	1,18
	2007	1,18

Kemudian pada tahap selanjutnya, data kerapatan udara tersebut digunakan ke dalam persamaan [2.14] untuk mendapat nilai daya spesifik pada rata-rata kecepatan yang dihitung.

$$P = 0,5 \cdot C_p \cdot \rho \cdot V_1^3 \quad (2.14)$$

Dari data kerapatan udara yang didapat sebelumnya, didapat nilai daya spesifik, seperti pada contoh perhitungan untuk daerah Blang-Bintang, Aceh pada tahun 2000. Sehingga dari persamaan [2.14] didapat nilai daya spesifik daerah Blang-Bintang, Aceh sebagai berikut:

Tabel [4.6] daya spesifik ( $W/m^2$ ) untuk daerah Blang-Bintang, Aceh tahun 2000-2007

V rata-rata (m/s)	kPa	K	kg/m <sup>3</sup>	daya spesifik ( $W/m^2$ )
0	101,17	299,72	1,18	0,00
0,5	101,17	299,72	1,18	0,05
1,0	101,17	299,72	1,18	0,38
1,5	101,17	299,72	1,18	1,28
2,1	101,17	299,72	1,18	3,03
2,6	101,17	299,72	1,18	5,91
3,1	101,17	299,72	1,18	10,21
3,6	101,17	299,72	1,18	16,21
4,1	101,17	299,72	1,18	24,20
4,6	101,17	299,72	1,18	34,46
5,1	101,17	299,72	1,18	47,27
5,7	101,17	299,72	1,18	62,92
6,2	101,17	299,72	1,18	81,68
6,7	101,17	299,72	1,18	103,85
7,2	101,17	299,72	1,18	129,71
7,7	101,17	299,72	1,18	159,54

#### 4.1.4. Perhitungan Energi Spesifik

Perhitungannya dapat diselesaikan dengan mengalikan daya spesifik pada tabel [4.6] dengan jumlah jam kumulatif, sehingga didapat hasil :

Tabel [4.7] nilai energi potensial ( $\text{W.h/m}^2$ ) untuk daerah Blang-Bintang, Aceh tahun 2000-2007

V rata-rata (m/s)	daya spesifik ( $\text{W/m}^2$ )	energi ( $\text{Wh/m}^2$ )
0	0,00	0,00
0,5	0,05	2318,92
1,0	0,38	16772,45
1,5	1,28	45457,16
2,1	3,03	30495,37
2,6	5,91	23824,51
3,1	10,21	13722,92
3,6	16,21	21791,48
4,1	24,20	32528,39
4,6	34,46	46314,84
5,1	47,27	0,00
5,7	62,92	0,00
6,2	81,68	0,00
6,7	103,85	0,00
7,2	129,71	0,00
7,7	159,54	0,00

Dengan demikian, didapat hasil energi spesifik untuk wilayah tersebut dalam rentang waktu 8 tahun. Sebagai contoh, untuk kecepatan angin rata-rata minimal 2,6 m/s, energi yang dapat dihasilkan sebesar 23,82  $\text{kWh/m}^2$ .

#### 4.1.5. Perhitungan Keluaran Daya dari Turbin Angin

Berdasarkan referensi dari *Wind Energy Systems*<sup>[14]</sup>, parameter-parameter untuk menentukan karakteristik kecepatan turbin angin adalah sebagai berikut:

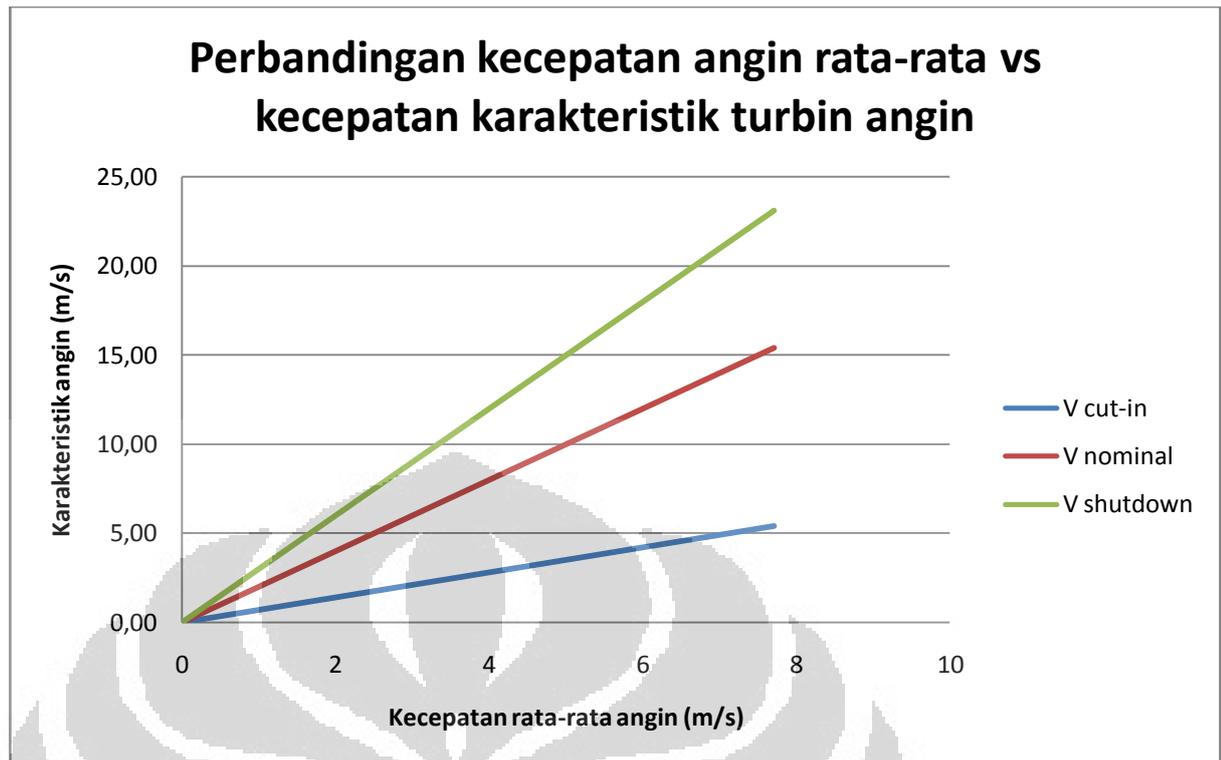
- a) Kecepatan *cut in* =  $0,7 \cdot V_{\text{rata-rata}}$
- b) Kecepatan nominal =  $1,5 \cdot V_{\text{rata-rata}}$  hingga  $2 \cdot V_{\text{rata-rata}}$
- c) Kecepatan *shutdown* =  $3 \cdot V_{\text{rata-rata}}$  dan lebih

Parameter-parameter tersebut dimasukkan ke dalam tabel kecepatan angin rata-rata daerah Blang-Bintang, Aceh, sehingga didapat data sebagai berikut:

Tabel [4.8] data parameter turbin angin (m/s) untuk daerah Blang-Bintang, Aceh tahun 2000-2007

V rata-rata (m/s)	V cut-in	V nominal	V shutdown
0	0,00	0,00	0,00
0,5	0,36	1,03	1,54
1,0	0,72	2,06	3,08
1,5	1,08	3,08	4,63
2,1	1,44	4,11	6,17
2,6	1,80	5,14	7,71
3,1	2,16	6,17	9,25
3,6	2,52	7,20	10,79
4,1	2,88	8,22	12,34
4,6	3,24	9,25	13,88
5,1	3,60	10,28	15,42
5,7	3,96	11,31	16,96
6,2	4,32	12,34	18,50
6,7	4,68	13,36	20,05
7,2	5,04	14,39	21,59
7,7	5,40	15,42	23,13

Tabel [4.8] menunjukkan hasil perhitungan kecepatan rata-rata angin dari 0 m/s hingga 7,7 m/s dibandingkan dengan nilai karakteristik turbin angin. Sebagai contoh, pada kecepatan 1 m/s, turbin angin yang digunakan harus dapat mengolah energi tersebut dari kecepatan minimal 0,72 m/s, dapat beroperasi dengan optimal hingga kecepatan 2,06 m/s, serta harus segera melakukan mekanisme *shutdown* pada kecepatan 3,08 m/s. Dari data tersebut, dapat dibuat grafik sebagai berikut:



Gambar [4.5] grafik perbandingan kecepatan rata-rata angin dan kecepatan karakteristik turbin angin

#### 4.2. Analisis Potensi Sumber Daya Angin

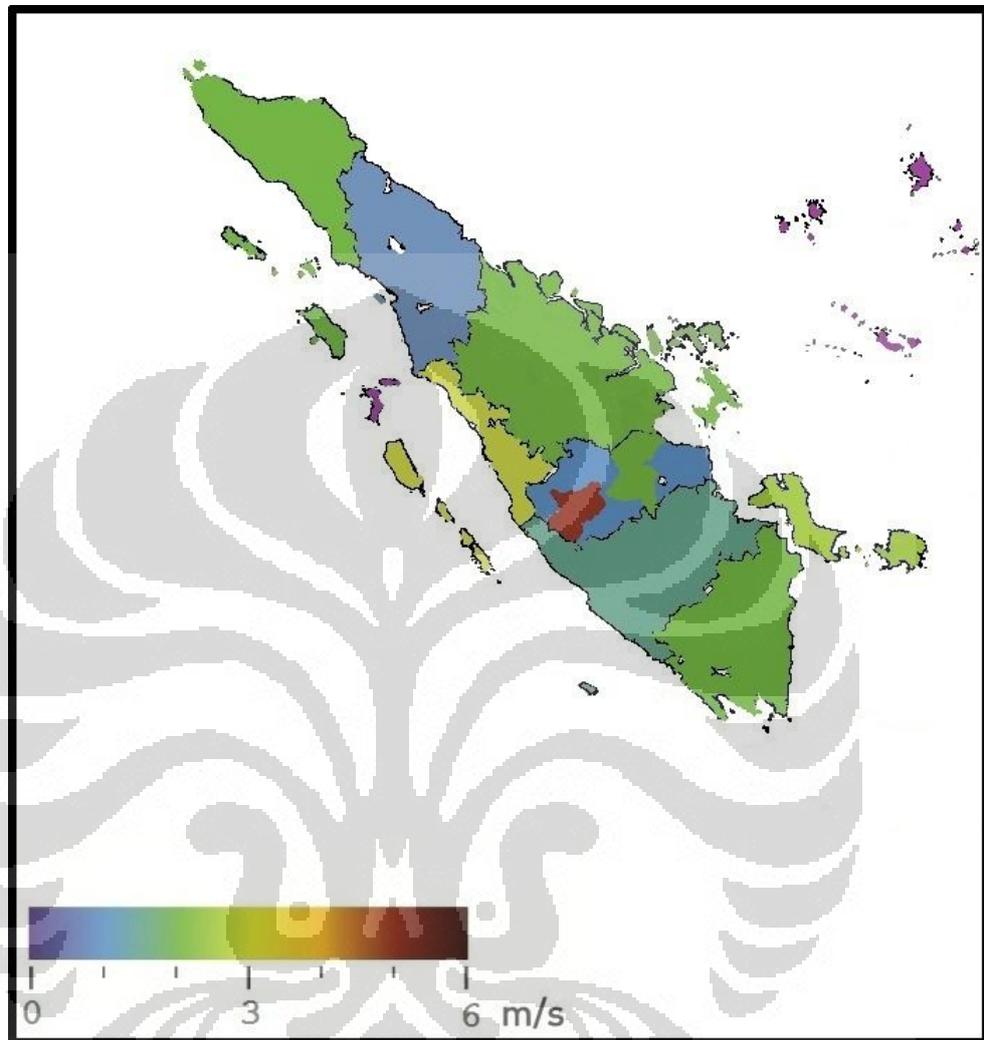
Tahap lanjutan dari perhitungan daya spesifik, energi spesifik, dan keluaran daya dari turbin angin. Perhitungan berdasarkan pernyataan bahwa secara teoritis kandungan energi yang terdapat dalam energi kinetik angin hanya dapat diambil sekitar 60% dari energi yang tersedia secara keseluruhan<sup>[35]</sup>.

Sebagai contoh, dari tabel [4.7], kecepatan angin dengan rata-rata 2,6 m/s menghasilkan energi sebesar 23,82 kWh/m<sup>2</sup>, namun ternyata energi yang secara aktual dapat dimanfaatkan hanya sebesar 60% dari nilai energi tersebut, yaitu sebesar 14,29 kWh/m<sup>2</sup>.

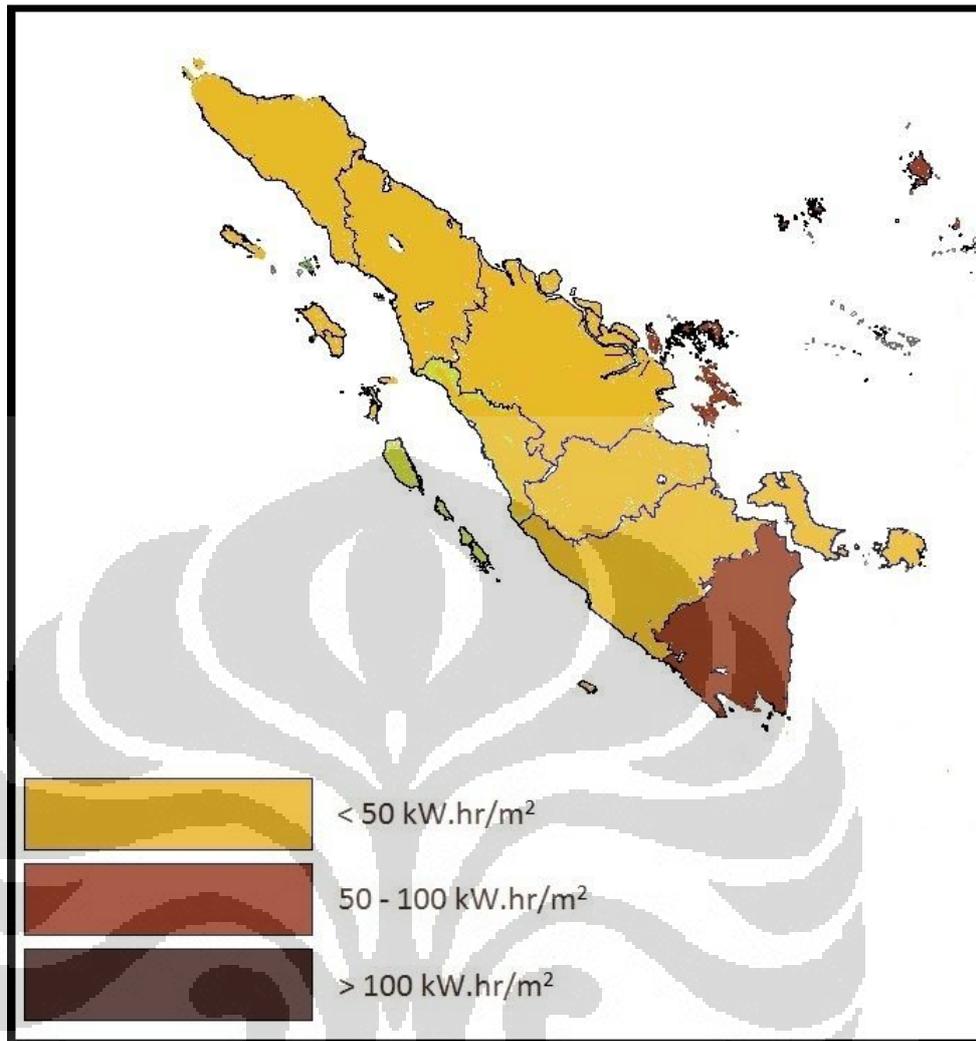
#### 4.3. Peta Angin

Tahap lanjutan dari perhitungan daya spesifik, energi spesifik, dan keluaran daya dari turbin angin adalah menyusun data-data hasil perhitungan tersebut ke dalam sebuah peta rupa bumi Indonesia. Sebagai contoh, data kecepatan angin rata-

rata serta nilai potensi energi angin disusun ke dalam peta rupa bumi Indonesia untuk pulau Sumatera, sebagai berikut:



Gambar [4.6] peta persebaran kecepatan angin rata-rata untuk pulau Sumatera, periode 2000-2007



Gambar [4.7] peta persebaran potensi energi spesifik angin untuk pulau Sumatera, periode 2000-2007

Pada gambar [4.7] ditunjukkan persebaran potensi energi angin untuk pulau Sumatera secara keseluruhan. Wilayah Aceh, Sumatera Utara, Sumatera Barat, Bengkulu, Riau, Jambi, Bangka, Belitung, dan Sumatera Selatan memiliki potensi energi sebesar kurang dari 50 kW.hr/m<sup>2</sup>, sedangkan wilayah Lampung dan Kepulauan Riau memiliki nilai potensi energi lebih dari 50 kW.hr/m<sup>2</sup>.

## BAB 5

### ANALISIS HASIL PERHITUNGAN

#### 5.1. Analisis Data Angin

Data sekunder yang didapat melalui Kementerian ESDM<sup>[36]</sup> dan BMKG<sup>[37]</sup> meliputi kecepatan angin rata-rata per bulan, arah angin, suhu, serta tekanan udara dalam rentang waktu 8 tahun; yang kemudian diolah dan dianalisis sehingga dihasilkan keluaran data mengenai sumber daya angin yang lebih lengkap.

Dalam mengolah data kecepatan angin dan mendapatkan nilai daya spesifik serta energi spesifik per wilayah, dibutuhkan pengetahuan mengenai frekuensi terjadinya nilai kecepatan angin pada suatu wilayah. Untuk mendapatkan detail frekuensi tersebut, digunakan metode distribusi probabilitas. Pada tahap awal, digunakan distribusi Rayleigh untuk menentukan nilai relatif dan kumulatif dari data-data yang ada, contohnya pada persamaan [2.4] dan [2.5]. Distribusi Rayleigh merupakan metode distribusi yang umum digunakan untuk pengolahan data distribusi kecepatan angin<sup>[38]</sup>.

Pada tahap selanjutnya, ditemukan ketidaksesuaian pada grafik yang dihasilkan dari perhitungan menggunakan distribusi Rayleigh tersebut. Hal ini terjadi dikarenakan variasi data yang kurang, sehingga menyebabkan grafik yang dihasilkan pada model bukanlah grafik dari data yang sebenarnya, melainkan hasil langsung dari perhitungan tanpa menggunakan variasi data lebih lanjut.

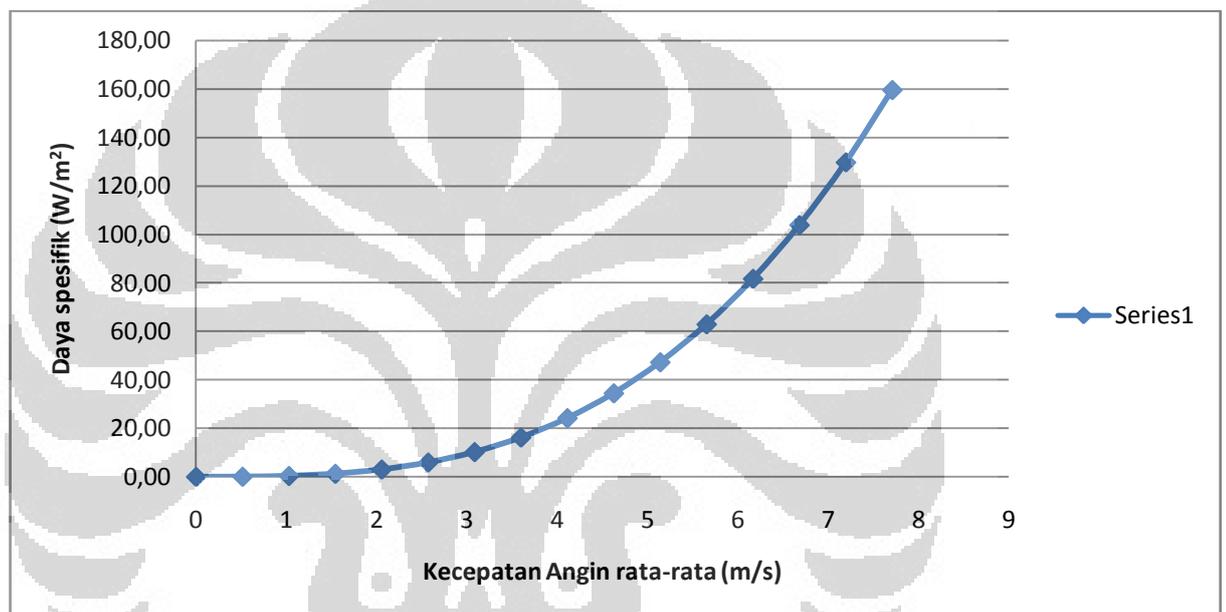
Metode pengolahan data menggunakan distribusi Rayleigh kemudian diganti dengan menggunakan metode distribusi probabilitas yang lebih sesuai dengan kondisi data yang ada. Dengan menggunakan persamaan [2.2] dan [2.3], dihasilkan nilai dan grafik yang lebih sesuai dengan karakteristik data sekunder.

Data sekunder yang diambil terdiri dari nilai kecepatan rata-rata angin, tekanan, dan temperatur udara. Variabel *atmospheric boundary layer* dapat digunakan untuk mendapatkan nilai potensi energi angin pada jenis wilayah *on-*

*shore*, maupun *off-shore*, sehingga nilai potensi energi angin yang lebih akurat bisa didapatkan.

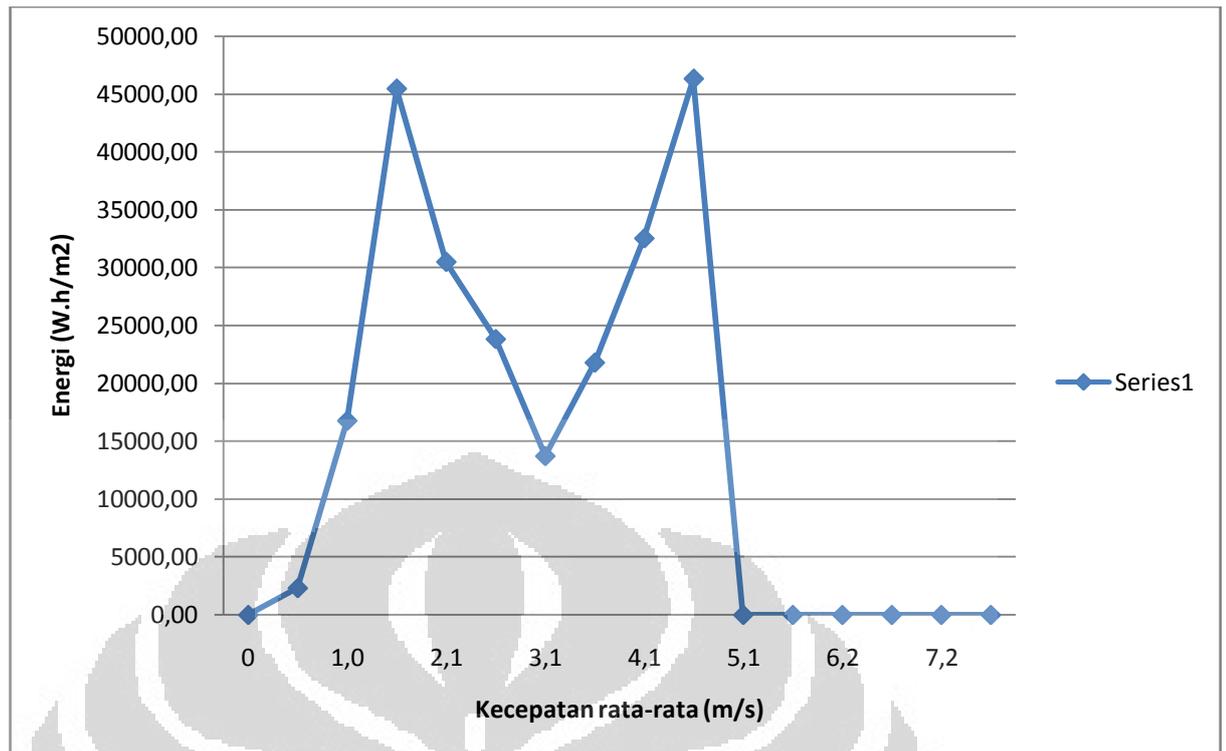
## 5.2. Potensi Sumber Daya Angin

Hasil pengolahan data dan analisis data sekunder menghasilkan nilai daya spesifik dan energi spesifik per propinsi dalam rentang waktu 8 tahun. Sebagai contoh, daya spesifik dan energi yang dihasilkan oleh energi angin rata-rata untuk wilayah Blang Bintang, Aceh sepanjang tahun 2000-2007 adalah:



Gambar [5.1] grafik perbandingan daya spesifik turbin angin dan kecepatan angin rata-rata

Dari grafik di atas dapat dibuktikan bahwa kenaikan nilai kecepatan angin berbanding lurus dengan daya spesifik yang diterima oleh turbin angin. Tabel [4.6] menunjukkan nilai-nilai dari gambar [5.1].

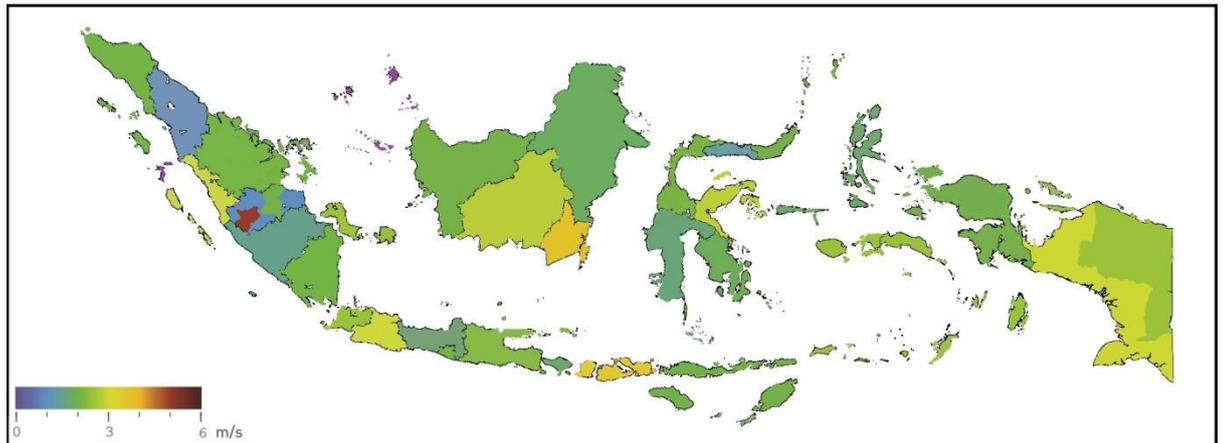


Gambar [5.2] grafik perbandingan energi spesifik dan kecepatan angin rata-rata

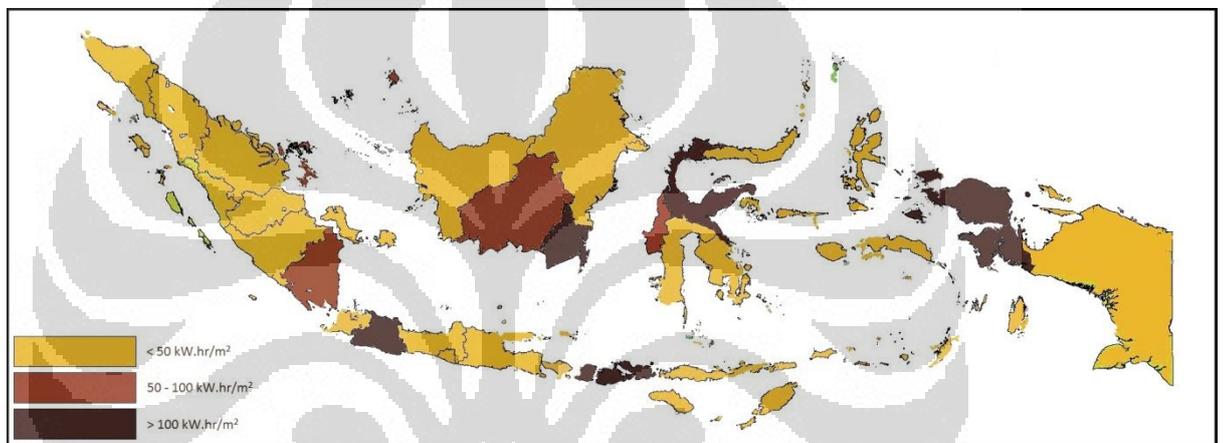
Dari grafik di atas, ditunjukkan perbandingan antara energi spesifik yang dihasilkan oleh wilayah Blang Bintang, Aceh selama periode 8 tahun. Bentuk garis kurva yang tidak linear disebabkan oleh variabel waktu dan daya spesifik dalam perhitungan. Sebagai contoh, pada kecepatan rata-rata minimal 2 m/s dihasilkan energi sebesar 30 kWh/m<sup>2</sup>, sementara pada kecepatan rata-rata minimal 3 m/s dihasilkan energi sebesar kurang lebih 14 kWh/m<sup>2</sup>. Hal ini dapat dilihat pada tabel [4.7] di mana kelas kecepatan rata-rata, dan daya spesifik memiliki peran yang banyak dalam menentukan jumlah energi yang dihasilkan dari suatu satuan wilayah.

### 5.3. Peta Angin Nasional

Hasil akhir dari analisis adalah peta angin dalam skala nasional. Dalam kedua peta di bawah, dapat dilihat persebaran kecepatan angin serta potensi energi angin di seluruh wilayah Indonesia.



Gambar [5.3] Peta rupa bumi Indonesia berdasarkan kecepatan angin rata-rata



Gambar [5.4] Peta rupa bumi Indonesia berdasarkan nilai potensi energi angin

Pada gambar [5.4] ditunjukkan hasil akhir dari peta potensi energi angin di Indonesia, yang bersama dengan peta persebaran kecepatan angin, dapat dijadikan panduan untuk membuat peta teknologi turbin angin di Indonesia. Dari gambar tersebut, dapat dilihat bahwa wilayah Kepulauan Riau, Jawa Barat, Kalimantan Timur, Sulawesi Tengah, Nusa Tenggara Barat, dan Papua Barat diperkirakan memiliki potensi energi angin lebih dari  $100 \text{ kW.hr/m}^2$ .

## BAB 6

### KESIMPULAN

#### 6.1. Kesimpulan

Berdasarkan data yang diambil dan analisis yang dilakukan terdapat beberapa poin yang perlu diperhatikan.

Data yang didapat dan dianalisis menghasilkan nilai daya spesifik dan energi spesifik secara umum pada tiap propinsi. Dari data-data tersebut, kecepatan angin rata-rata serta nilai energi per propinsi dalam rentang waktu 8 tahun dapat dipetakan.

Metode distribusi probabilitas digunakan untuk menghitung potensi energi pada tiap propinsi. Dari perhitungan ini, didapat nilai kecepatan angin rata-rata dan energi spesifik dalam rentang waktu 8 tahun. Wilayah yang memiliki kecepatan angin rata-rata di atas 3 m/s meliputi propinsi Aceh, Sumatera Utara, Sumatera Barat, Riau, Kepulauan Riau, Jambi, Lampung, DKI Jakarta, Banten, Jawa Barat, Jawa Tengah, Yogyakarta, Jawa Timur, Bali, NTB, NTT, Kalimantan Tengah, Kalimantan Selatan, Kalimantan Timur, Sulawesi Utara, Sulawesi Tengah, Sulawesi Barat, Sulawesi Selatan, Maluku, Maluku Utara, Papua Barat, dan Papua.

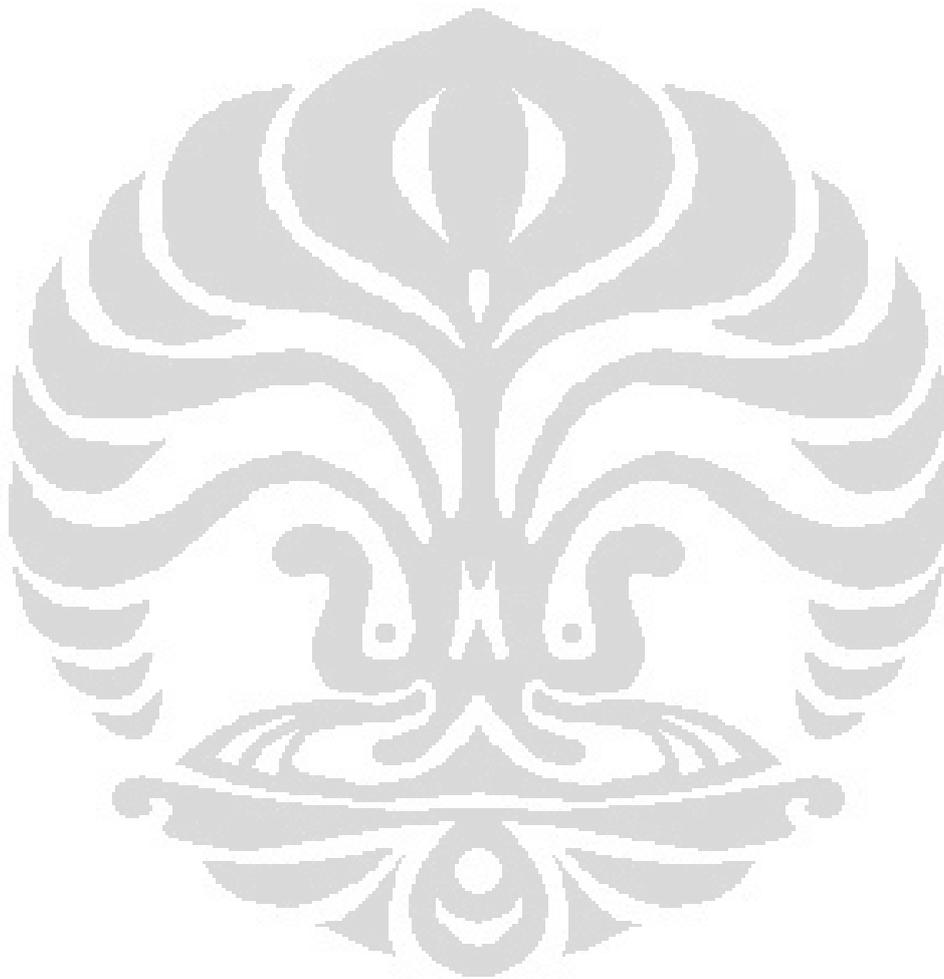
Energi spesifik yang dihasilkan propinsi-propinsi di Indonesia dibagi menjadi tiga kelas; kurang dari 50 kW.hr/m<sup>2</sup>, antara 50 hingga 100 kW.hr/m<sup>2</sup>, dan lebih dari 100 kW.hr/m<sup>2</sup>. Wilayah yang memiliki potensi energi angin lebih dari 100 kW.hr/m<sup>2</sup> dalam rentang waktu 8 tahun adalah Lampung, Jawa Barat, Kalimantan Timur, NTB, dan Papua Barat.

#### 6.2. Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa hal yang perlu dipertimbangkan untuk dilakukan perbaikan.

Kekayaan variabel data memegang peranan penting dalam perhitungan dan analisis. Semakin banyak data yang diobservasi, semakin detil dan akurat yang hasil

yang didapat. Data yang dianalisa pada penelitian ini terbatas pada tingkat kecepatan rata-rata per bulan dan per tahun pada tiap wilayah. Nilai daya spesifik dan energi bisa didapatkan lebih tepat dengan menggunakan data sekunder hingga ke tingkat kecepatan rata-rata per jam dan per minggu. Untuk pengembangan lebih lanjut, data sekunder dengan jumlah variabel yang lebih akurat, serta metode perhitungan yang lebih presisi dapat menghasilkan nilai-nilai yang lebih sesuai dengan kondisi asli.



## REFERENSI

- [<sup>1</sup>] 2004. *Indonesia Energy Outlook and Statistics*. Pengkajian Energi Universitas Indonesia. UI : Depok.
- [<sup>2</sup>] 2004. *Energy Information Agency. Office of Integrated Analysis and Forecasting*. U.S. Department of Energy: Washington.
- [<sup>3</sup>] 1987. Woofenden, Ian. *Wind Electricity Basics*. Home Power Magazine. Oregon : USA.
- [<sup>4</sup>] Sankar, Terrence C. *The Case for Vertical Axis Wind Turbines*. Robert Morris University. Pittsburgh : USA.
- [<sup>5</sup>] 2007. *UU no.30 tahun 2007 tentang Energi. Bab 1 Pasal 1 : ayat 4*. Pemerintah Republik Indonesia : Jakarta.
- [<sup>6</sup>] 2007. *UU no.30 tahun 2007 tentang Energi. Bab 1 Pasal 1 : ayat 5*. Pemerintah Republik Indonesia : Jakarta.
- [<sup>7</sup>] 2010. Sudarto, Aris. Saragih, Budiman. *Resume Pemanfaatan dan Pengembangan Energi Angin: Potensi dan Lokasi Pemanfaatan Energi Angin*. Kementerian ESDM-Dirjen EBTKE: Jakarta.
- [<sup>8</sup>] 2010. Direktorat Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi. *Rencana Induk Pengembangan Energi Baru Terbarukan 2010-2025*. Kementerian ESDM: Jakarta.
- [<sup>9</sup>] 2010. Sudarto, Aris. Saragih, Budiman. *Resume Pemanfaatan dan Pengembangan Energi Angin: Definisi Angin*. Kementerian ESDM-Dirjen EBTKE: Jakarta.
- [<sup>10</sup>] 2010. Sudarto, Aris. Saragih, Budiman. *Resume Pemanfaatan dan Pengembangan Energi Angin: Sistem Konversi Energi Angin*. Kementerian ESDM-Dirjen EBTKE: Jakarta.
- [<sup>11</sup>] 1998. Giancoli, Douglas C. *Physics : Fifth Edition – Chapter 6 : Work and Energy*. Prentice-Hall: New Jersey.
- [<sup>12</sup>] 1998. Giancoli, Douglas C. *Physics : Fifth Edition – Chapter 10 : Fluids*. Prentice-Hall : New Jersey.
- [<sup>13</sup>] 2009. Manwell, James. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. Chapter 2 Wind Characteristics and Resources*. John Wiley & Sons, Ltd : USA.
- [<sup>14</sup>] 1983. Djojodihardjo, Harijono; Molly, Jens Peter. *Wind Energy Systems*. Bandung.
- [<sup>15</sup>] Peta kecepatan angin rata-rata global. <http://www.3tier.com/>. Diakses pada pukul 16:48 WIB tanggal 4 Juni 2012.
- [<sup>16</sup>] 2009. Manwell, James. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. Chapter 1 Introductions – Modern Wind Turbines*. John Wiley & Sons, Ltd : USA.

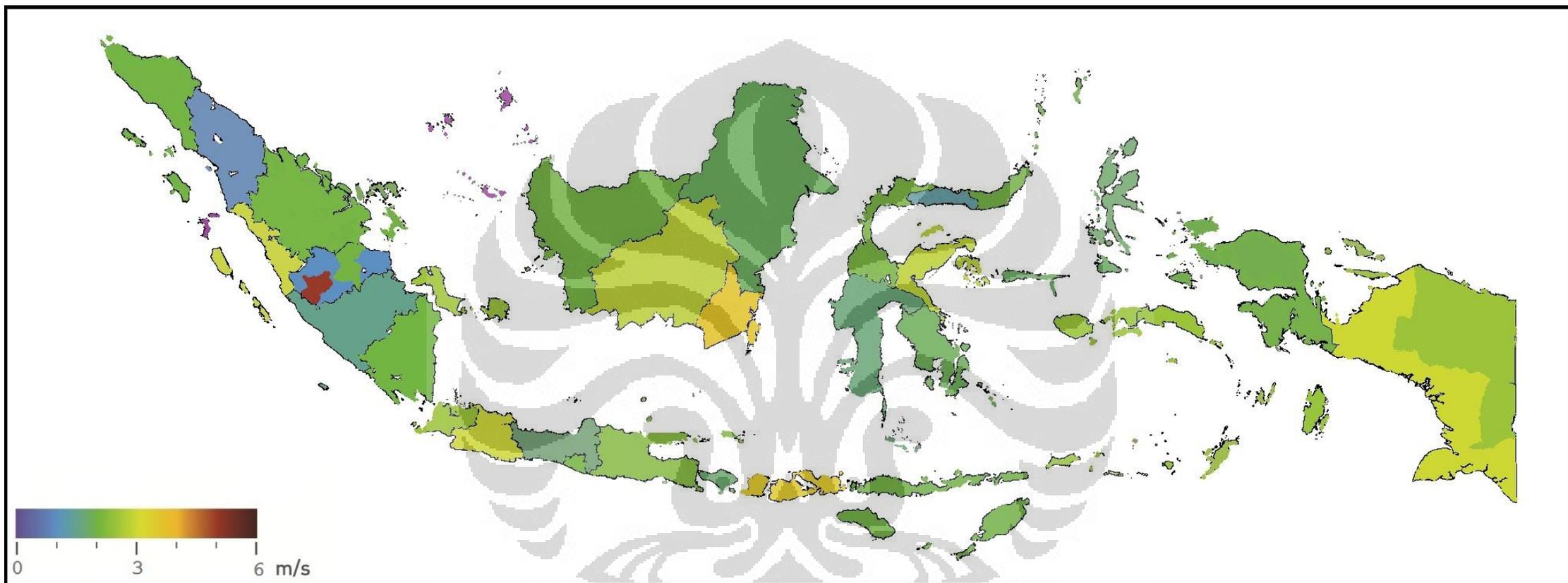
- [17] 2009. Manwell, James. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. Chapter 1 Introductions – History of Wind Energy*. John Wiley & Sons, Ltd : USA.
- [18] 2009. Manwell, James. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. Chapter 1 Introductions – Early Wind Generation of Electricity*. John Wiley & Sons, Ltd : USA.
- [19] Tiga komponen utama dari sebuah turbin angin. *The Encyclopedia of Alternative Energy and Sustainable Living : Wind Turbine*.  
[http://www.daviddarling.info/encyclopedia/W/AE\\_wind\\_turbine.html/](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/W/AE_wind_turbine.html/). Diakses pada pukul 15:00 WIB pada tanggal 30 September 2011.
- [20] Komponen-komponen dari turbin angin dengan sumbu horizontal. U.S. Department of Energy. [http://www1.eere.energy.gov/windandhydro/wind\\_how.html/](http://www1.eere.energy.gov/windandhydro/wind_how.html/). Diakses pada pukul 15:00 WIB pada tanggal 30 September 2011.
- [21] Perbedaan antara HAWT dan VAWT. *The Encyclopedia of Alternative Energy and Sustainable Living : Wind Turbine*.  
[http://www.daviddarling.info/encyclopedia/W/AE\\_wind\\_turbine.html/](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/W/AE_wind_turbine.html/). Diakses pada pukul 15:00 WIB pada tanggal 30 September 2011.
- [22] George Darrieus dari Prancis. *The Encyclopedia of Alternative Energy and Sustainable Living : Wind Turbine*.  
[http://www.daviddarling.info/encyclopedia/W/AE\\_wind\\_turbine.html/](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/W/AE_wind_turbine.html/). Diakses pada pukul 15:00 WIB pada tanggal 30 September 2011.
- [23] Sigurd Savonius dari Finlandia. *The Encyclopedia of Alternative Energy and Sustainable Living : Wind Turbine*.  
[http://www.daviddarling.info/encyclopedia/W/AE\\_wind\\_turbine.html/](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/W/AE_wind_turbine.html/). Diakses pada pukul 15:00 WIB pada tanggal 30 September 2011.
- [24] Kerugian turbin Savonius. *The Encyclopedia of Alternative Energy and Sustainable Living : Wind Turbine*.  
[http://www.daviddarling.info/encyclopedia/W/AE\\_wind\\_turbine.html/](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/W/AE_wind_turbine.html/). Diakses pada pukul 15:00 WIB pada tanggal 30 September 2011.
- [25] Turbin angin skala kecil untuk area residensial. <http://www.scoraigwind.com/citywinds/>. Diakses pada pukul 15:30 WIB tanggal 30 September 2011.
- [26] Pembangkit listrik tenaga angin. <http://www.kincirangin.info/>. Diakses pada pukul 15:00 WIB tanggal 30 September 2011.
- [27] 2012. Wijayanto, Nanang. *PLTB Skala Besar Dibangun*. Harian Seputar Indonesia. MNC : Jakarta.

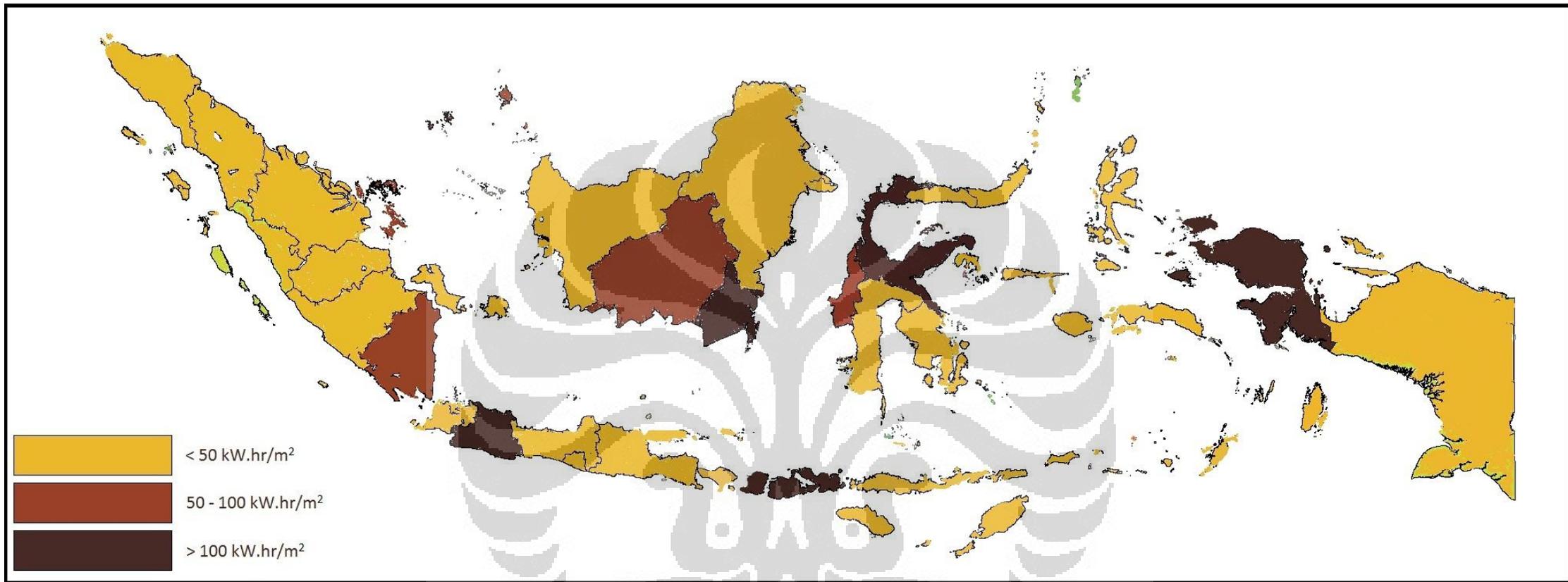
- [28] 2010. Sudarto, Aris. Saragih, Budiman. *Resume Pemanfaatan dan Pengembangan Energi Angin: Kebijakan Pengembangan Energi*. Kementerian ESDM-Dirjen EBTKE. Jakarta.
- [29] 2012. Tim Database BMKG. *Kecepatan Angin di Indonesia 2000-2007*. BMKG : Jakarta.
- [30] 1996. *Data dan Informasi Potensi dan Pemanfaatan Energi Angin. Perhitungan Potensi Energi Angin*. LAPAN : Jakarta.
- [31] 1996. *Data dan Informasi Potensi dan Pemanfaatan Energi Angin. Klasifikasi Kelas Potensi Energi Angin*. LAPAN : Jakarta.
- [32] 1980. Holman, J.P. *Thermodynamics. Chapter 1 Introduction - The Ideal Gas*. McGraw-Hill : USA.
- [33] 2012. Respati, Seto. *Studi Komparasi Teknologi Turbin Angin dan Pemetaan Teknologi Turbin Angin untuk Wilayah Indonesia – Tipe Turbin Angin*. Departemen Teknik Mesin – FTUI. UI : Depok.
- [34] 2012. Respati, Seto. *Studi Komparasi Teknologi Turbin Angin dan Pemetaan Teknologi Turbin Angin untuk Wilayah Indonesia – Perbandingan Turbin Angin*. Departemen Teknik Mesin – FTUI. UI : Depok.
- [35] 2009. Manwell, James. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. Chapter 3 Aerodynamics of Wind Turbines*. John Wiley & Sons, Ltd : USA.
- [36] 2010. Direktorat Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi. *Rencana Induk Pengembangan Energi Baru Terbarukan 2010-2025*. Kementerian ESDM : Jakarta.
- [37] 2012. Tim Database BMKG. *Data Karakteristik Angin di Indonesia periode 2000-2007*. BMKG : Jakarta.
- [38] 2009. Manwell, James. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. Chapter 2 Wind Characteristics and Resources – Statistical Analysis of Wind Data*. John Wiley & Sons, Ltd : USA.

## DAFTAR PUSTAKA

1980. Holman, J.P. *Thermodynamics*. McGraw-Hill : USA.
1996. *Data dan Informasi Potensi dan Pemanfaatan Energi Angin. Perhitungan Potensi Energi Angin*. LAPAN : Jakarta.
1998. Giancoli, Douglas C. *Physics : Fifth Edition*. Prentice-Hall: New Jersey.
2004. *Energy Information Agency. Office of Integrated Analysis and Forecasting*. U.S. Department of Energy: Washington.
2004. *Indonesia Energy Outlook and Statistics*. Pengkajian Energi Universitas Indonesia. UI : Depok.
2007. *UU no.30 tahun 2007 tentang Energi*. Pemerintah Republik Indonesia : Jakarta.
2009. Manwell, James. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. John Wiley & Sons, Ltd : USA.
2010. Direktorat Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi. *Rencana Induk Pengembangan Energi Baru Terbarukan 2010-2025*. Kementerian ESDM: Jakarta.
2010. Sudarto, Aris. Saragih, Budiman. *Resume Pemanfaatan dan Pengembangan Energi Angin*. Kementerian ESDM-Dirjen EBTKE: Jakarta.
2012. Respati, Seto. *Studi Komparasi Teknologi Turbin Angin dan Pemetaan Teknologi Turbin Angin untuk Wilayah Indonesia*. Departemen Teknik Mesin – FTUI. UI : Depok.
2012. Tim Database BMKG. *Data Karakteristik Angin di Indonesia periode 2000-2007*. BMKG : Jakarta.

## LAMPIRAN A





## LAMPIRAN B

Area	Propinsi	Kota	Stasiun
------	----------	------	---------

Sumatera	Aceh	Banda Aceh	Blang Bintang
	Sumatera Utara	Medan	Polonia
	Sumatera Barat	Padang	Tabing Padang
	Riau	Pekanbaru	Simpang-Tiga
	Kepulauan Riau	Tanjung Pinang	Kijang
	Jambi	Jambi	Palmerah
	Sumatera Selatan	Palembang	Talang Betutu
	Bangka-Belitung	Pangkal Pinang	Pangkal-Pinang
	Bengkulu	Bengkulu	Padang Kemiling
	Lampung	Bandar Lampung	Astra Ksetra

Jawa	DKI Jakarta	Jakarta	Cengkareng
	Banten	Serang	Serang
	Jawa Barat	Bandung	Ciledug
	Jawa Tengah	Semarang	Cilacap
	DI Yogyakarta	Yogyakarta	Wonocatur
	Jawa Timur	Surabaya	Mojosari

Kepulauan Sunda Kecil	Bali	Denpasar	Denpasar
	NTB	Mataram	Rembiga-Ampenan
	NTT	Kupang	Waingapu

Kalimantan	Kalimantan Barat	Pontianak	Supadio-Pontianak
------------	------------------	-----------	-------------------

Kecepatan, m/s							
2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007

0,4	0,8	2,0	2,3	2,1	2,0	2,0	2,0
0,9	0,8	1,2	1,7	1,4	1,4	1,4	1,4
0,1		3,1		3,1	3,1	3,1	3,1
2,5	0,7	1,0	2,2	0,8	0,8	0,8	0,8
1,3	0,7	1,1	2,8	1,3	1,3	1,3	1,3
0,6	0,8	1,3	1,5	2,7	2,6	2,6	2,6
1,3	1,7	1,9	1,8	1,4	1,4	1,4	1,4
1,5	1,4	1,8	1,5	2,5	2,6	2,6	2,6
1,5	1,5	1,6	1,3	1,6	1,7	1,7	1,7
1,3	2,4	1,3	1,3	2,2	2,3	2,3	2,5
3,0	2,7	2,3	2,3	2,1	2,1	2,1	2,1
1,5	1,3	1,2	1,5	2,5	2,5	2,5	
1,5	1,4	1,4	1,9	2,9	3,1	3,1	3,5
2,1	2,0	1,8	2,0	0,8	0,8	0,8	0,7
1,9	1,8	1,7	1,3	1,9	2,3	2,3	2,1
1,1	2,4	1,9	1,5	2,6	2,5	2,5	2,5
1,9	1,8	1,7	2,7	0,8	0,8	0,8	0,7
2,3	3,0	2,6	2,7	2,4	2,5	4,2	2,5
1,6	1,4	1,4	2,2	2,3	1,9	2,8	2,3
2,4	2,5	2,1	1,7	2,0	2,1	2,1	2,0

	Kalimantan Tengah	Palangkaraya	Palangkaraya
	Kalimantan Selatan	Banjarmasin	Banjarmasin
	Kalimantan Timur	Samarinda	Samarinda-Temindung

Sulawesi	Sulawesi Utara	Manado	Meteo Bitung
	Gorontalo	Gorontalo	Gorontalo
	Sulawesi Tengah	Palu	Mutiara-Palu
	Sulawesi Barat	Mamuju	Majene
	Sulawesi Selatan	Makasar	Hasanudin
	Sulawesi Tenggara	Kendari	Betoambari

Kepulauan Maluku	Maluku	Ambon	Ternate
	Maluku Utara	Sofifi	Sanana

Irian Jaya Barat	Papua Barat	Manokwari	Kaimana
	Papua	Jayapura	Jayapura

2,2	2,0	2,1	1,8	2,7	2,9	2,9	2,7
2,7	2,2	2,2	1,8	3,4	3,3	3,3	3,6
0,8	0,9	1,6	1,1	2,0	1,8	1,8	2,3
0,9	1,4	2,1	1,5	2,0	1,6	1,9	2,1
1,1	1,4	1,4	1,5	1,3	1,4	1,4	1,3
2,4	2,9	3,2	2,8	2,7	2,1	2,2	2,9
2,1	2,0	2,1	2,1	2,3	2,3	2,5	2,1
1,6	1,6	1,8	1,8	1,6	2,1	1,8	1,6
1,8	1,8	0,7	1,7	1,8	2,0	1,9	1,9
2,3	2,5	2,3	2,2	2,4	2,3	2,3	2,4
1,8	1,7	1,6	1,8	2,0	2,1	2,1	1,9
2,1	2,2		1,7	2,0	2,9	3,1	2,1
2,2	2,4	3,3	2,4	1,5	3,1	3,1	1,6

### LAMPIRAN C

Area	Propinsi	Kota	Stasiun	Tekanan, kPa							
				2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Sumatera	Aceh	Banda Aceh	Blang Bintang	100,9	101,0	101,0	101,0	101,4	101,4	101,4	101,2
	Sumatera Utara	Medan	Polonia	100,9	101,0	101,0	100,9	101,5	101,5	101,5	101,2
	Sumatera Barat	Padang	Tabing Padang	100,9		100,9		101,1	101,1	101,1	101,1
	Riau	Pekanbaru	Simpang-Tiga	100,9	101,0	101,1	101,1	101,2	101,2	101,2	101,2
	Kepulauan Riau	Tanjung Pinang	Kijang	101,0	101,0	101,1	101,1	101,4	101,3	101,3	101,3
	Jambi	Jambi	Palmerah	101,0	101,1	101,2	101,2	101,2	101,3	101,2	101,3
	Sumatera Selatan	Palembang	Talang Betutu	101,1	101,1	101,1	101,1	101,1	101,1	100,9	101,2
	Bangka-Belitung	Pangkal Pinang	Pangkal-Pinang	101,0	101,0	101,1	101,1	100,9	101,0	100,9	100,9
	Bengkulu	Bengkulu	Padang Kemiling	100,8	100,9	100,9	100,9	101,4	101,4	101,4	101,3
	Lampung	Bandar Lampung	Astra Ksetra	101,1	101,2	101,2					
Jawa	DKI Jakarta	Jakarta	Cengkareng	101	101	101,1	101,1	101,4	101,4	101,5	101,4
	Banten	Serang	Serang	101,2	101,2	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3
	Jawa Barat	Bandung	Ciledug	100,9	100,9	101					
	Jawa Tengah	Semarang	Cilacap	100,8	100,9	101	100,9	101,4	101,4	101,5	101,4
	DI Yogyakarta	Yogyakarta	Wonocatur	100,5	100,9	101					
	Jawa Timur	Surabaya	Mojosari	100,6	100,9			101,3	101,4	101,3	101,3
Kepulauan Sunda Kecil	Bali	Denpasar	Denpasar	100,8	100,8	101	101	101,2	101,3	101,3	101,2
	NTB	Mataram	Rembiga-Ampenan	101	101,1	101,2	101,2	101,3	101,2	101,2	101,3
	NTT	Kupang	Waingapu	100,9	100,8	100,7	101,1	101,3	101,2	101,2	101,3
Kalimantan	Kalimantan Barat	Pontianak	Supadio-Pontianak	101	101	101,1	101,1	101,2	101,2	101,2	101,2

	Kalimantan Tengah	Palangkaraya	Palangkaraya	101,2	101,2	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3	101,3
	Kalimantan Selatan	Banjarmasin	Banjarmasin	101,1	101,1	101,2	101,2	101,2	101,2	101,2	101,2	101,1
	Kalimantan Timur	Samarinda	Samarinda-Temindung	101,1	101,2	101,3	101,2	101,3	101,2	101,2		
Sulawesi	Sulawesi Utara	Manado	Meteo Bitung	100,9	100,9	101	100,8	100,9	101	101,1	100,9	
	Gorontalo	Gorontalo	Gorontalo	100,9	101	101,1	101	101	101	101	101	101
	Sulawesi Tengah	Palu	Mutiara-Palu	101,2	101,3	101,4	101,4	101,3	101,2	101,2	101,3	
	Sulawesi Barat	Mamuju	Majene	101	101,1	101,1	101,1	101,3	101,1	101,1	101,3	
	Sulawesi Selatan	Makasar	Hasanudin	101	101	101,1	101,1	101,4	101,1	101,1	101,4	
	Sulawesi Tenggara	Kendari	Betoambari	101,2	101,2	101,2	101,3	101	101,3	101,3	101	
Kepulauan Maluku	Maluku	Ambon	Ternate	101	101	101,1	101,1	101,1	101,1	101,1	101,1	101,1
	Maluku Utara	Sofifi	Sanana	101,1	101,1	101,2	101,2					
Irian Jaya Barat	Papua Barat	Manokwari	Kaimana	100,9	100,9		101	101,1	101	101	101,1	
	Papua	Jayapura	Jayapura	100,9	100,8	100,9	101		165,6	157,8		

### LAMPIRAN D

Area	Propinsi	Kota	Stasiun	Temperatur, K							
				2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Sumatera	Aceh	Banda Aceh	Blang Bintang	299,2	299,3	299,7	300,1	299,9	300,0	300,2	299,4
	Sumatera Utara	Medan	Polonia	299,4	299,3	299,8	300,3	300,1	300,1	300,4	299,7
	Sumatera Barat	Padang	Tabing Padang	299,5		300,3		299,5	299,3	299,7	299,6
	Riau	Pekanbaru	Simpang-Tiga	300,1	299,4	299,6	300,0	299,7	299,7	299,6	299,9
	Kepulauan Riau	Tanjung Pinang	Kijang	299,9	299,7	299,9	300,1	299,6	299,6	299,8	299,4
	Jambi	Jambi	Palmerah	299,8	299,9	299,7	300,1	299,6	299,6	299,7	299,7
	Sumatera Selatan	Palembang	Talang Betutu	299,9	299,9	300,1	300,0	299,7	299,7	299,7	299,5
	Bangka-Belitung	Pangkal Pinang	Pangkal-Pinang	299,5	299,6	300,2	300,2	299,6	299,6	299,7	299,8
	Bengkulu	Bengkulu	Padang Kemiling	299,7	300,3	300,7	300,1	298,8	298,8	298,8	299,4
	Lampung	Bandar Lampung	Astra Ksetra	299,8	299,7	300,4	300,5	299,4	299,4	299,5	299,7
Jawa	DKI Jakarta	Jakarta	Cengkareng	300,2	300,4	300,9	300,7	301,8	301,8	301,8	300,6
	Banten	Serang	Serang	299,6	299,6	300,1	300,3	299,6	299,5	299,6	301,2
	Jawa Barat	Bandung	Ciledug	300,5	300,2	300,9	300,6	299,7	299,8	299,8	299,3
	Jawa Tengah	Semarang	Cilacap	300,1	300,4	300,5	300,6	300,3	300,6	300,5	299,4
	DI Yogyakarta	Yogyakarta	Wonocatur	299,7	300,5	300,9	300,5	301,1	301,3	301	301,1
	Jawa Timur	Surabaya	Mojosari	298,2	297,3	298,8	298,8	299,6	299,5	299,7	299,5
Kepulauan Sunda Kecil	Bali	Denpasar	Denpasar	296,9	295,1	295,5	300	300,2	300,4	300,1	301,2
	NTB	Mataram	Rembiga-Ampenan	299,6	299,6	299,2	299,9	300,2	300	299,9	300,1
	NTT	Kupang	Waingapu	299,8	299,3	300,1	299,7	300,2	300,3	299,2	300,3
Kalimantan	Kalimantan Barat	Pontianak	Supadio-Pontianak	299,7	299,7	300,1	300,1	301,2	301,2	300,8	300,9

	Kalimantan Tengah	Palangkaraya	Palangkaraya	299,8	299,9	300,1	300,4	300,7	300,8	301	300,8
	Kalimantan Selatan	Banjarmasin	Banjarmasin	299,6	299,9	300,1	300,2	300,6	300,7	300,3	300,7
	Kalimantan Timur	Samarinda	Samarinda-Temindung	300,2	300,3	300,6	300,3	301	301,1	301,3	301,1
Sulawesi	Sulawesi Utara	Manado	Meteo Bitung	300,7	300,7	300,8	300,6	301,1	300,7	300,9	301,1
	Gorontalo	Gorontalo	Gorontalo	300,1	300,3	300,4	300,1	300,2	300,2	300,2	300,2
	Sulawesi Tengah	Palu	Mutiara-Palu	300,5	300,5	301	300,7	301,1	300,8	301	301,3
	Sulawesi Barat	Mamuju	Majene	300,4	300,6	300,8	300,8	300,6	300,7	300,7	299,8
	Sulawesi Selatan	Makasar	Hasanudin	299,2	299,8	299,5	300,3	299,9	300,2	300,4	299,8
	Sulawesi Tenggara	Kendari	Betoambari	300,2	300,2	299,8	300,4	299,9	300,3	300,1	299,7
Kepulauan Maluku	Maluku	Ambon	Ternate	299,9	299,9	300,2	300	300,2	300,1	300,2	300,3
	Maluku Utara	Sofifi	Sanana	300,3	300,4	300,4	300,7	300,3	300,3	300,2	300,2
Irian Jaya Barat	Papua Barat	Manokwari	Kaimana	300,2	300,1		299,9	300,7	300,5	299,4	300,8
	Papua	Jayapura	Jayapura	299,9	300,2	300,2	300,4	300,9	301,1	300,6	300,9