



**ANALISIS KARAKTERISTIK TURBIN ANGIN SUMBU HORIZONTAL
MENGUNAKAN AIRFOIL NACA 4712**

SKRIPSI

oleh:

BILI DARNANTO SUSILO

NIM 141910101069

PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK MESIN

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS JEMBER

2019



**ANALISIS KARAKTERISTIK TURBIN ANGIN SUMBU HORIZONTAL
MENGUNAKAN AIRFOIL NACA 4712**

SKRIPSI

diajukan guna melengkapi syarat untuk menyelesaikan pendidikan Strata 1 Program Studi
Teknik Mesin di Fakultas Teknik dan mencapai gelar Sarjana Teknik

oleh:

BILI DARNANTO SUSILO

NIM 141910101069

PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK MESIN

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS JEMBER

2019

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Papa Darta Riboko dan Ibunda Imas Nuryani yang telah memberikan semangat, motivasi, dukungan, dan kasih sayangnya sepanjang waktu baik selama menempuh kuliah maupun dalam mengerjakan skripsi;
2. Adik – adik saya Indri Revo Rianti, Krisnov Dirga, dan Jeni Berlianti yang telah memberikan semangat dan motivasinya untuk menyelesaikan kuliah;
3. Almamater SDN Kepatihan 4 Jember, SMPN 4 Jember, dan SMAN 1 Jember;
4. Almamater Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin Universitas Jember;
5. Paguyuban Mahasiswa Bidikmisi (PAMADIKSI) Universitas Jember yang telah menjadi wadah bagi saya untuk mengekspresikan minat dan bakat saya selama berkuliah di Universitas Jember;
6. Novia Rizky Utami yang telah mendukung dan memotivasi saya untuk menyelesaikan laporan skripsi;
7. PT. Lentera Bumi Nusantara yang telah mengajarkan saya untuk mencintai ilmu pengetahuan dan Indonesia.
8. Teman – teman angkatan 2014 Teknik Mesin yang telah menemani perjalanan selama perkuliahan di kampus Universitas Jember.

MOTO

“SUGU YARU”

*Segera kerjakan

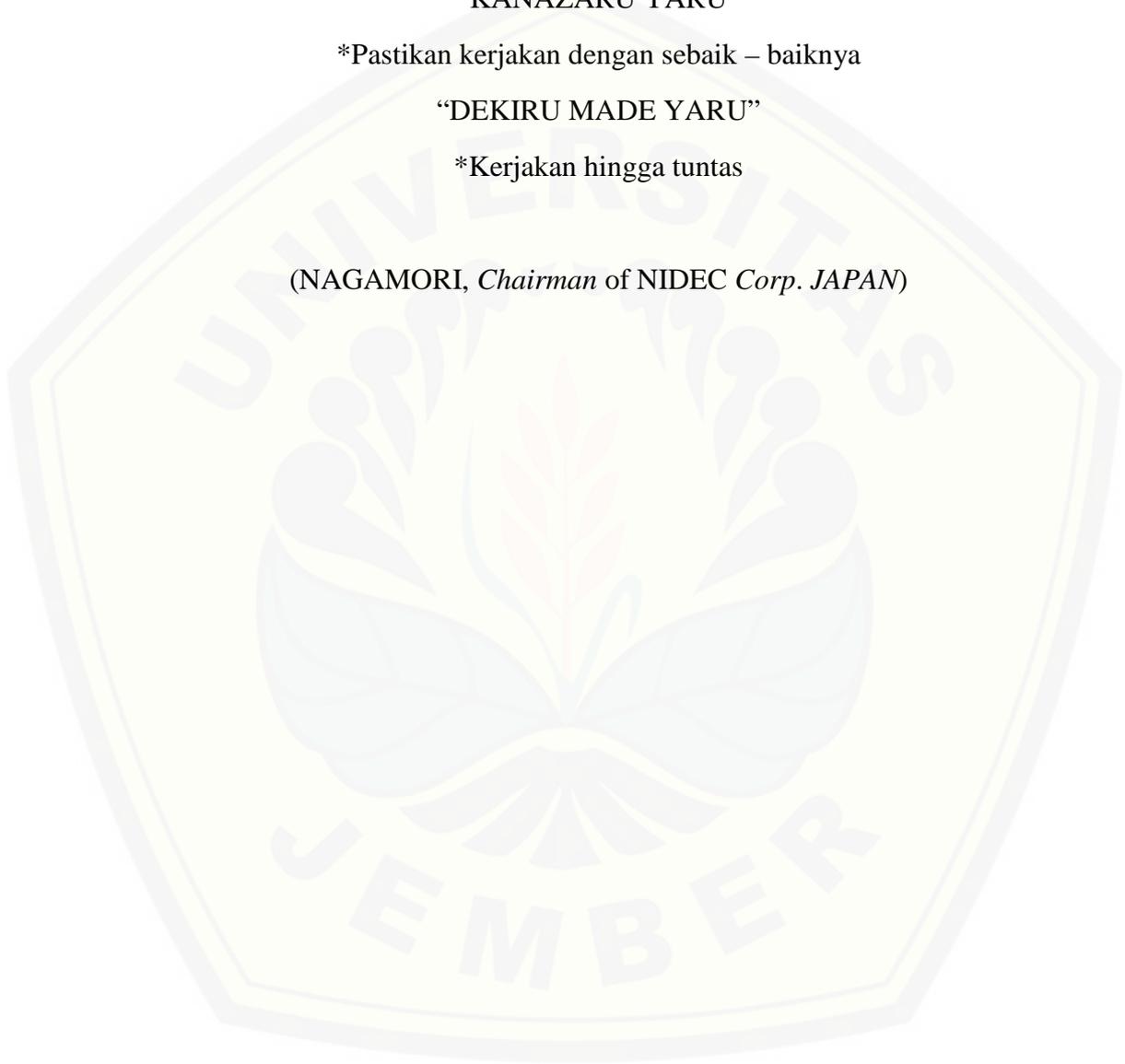
“KANAZARU YARU”

*Pastikan kerjakan dengan sebaik – baiknya

“DEKIRU MADE YARU”

*Kerjakan hingga tuntas

(NAGAMORI, *Chairman of NIDEC Corp. JAPAN*)



PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Bili Darnanto Susilo

NIM : 141910101069

Menyatakan dengan sungguh – sungguh bahwa skripsi yang saya tulis dengan judul “Analisis Karakteristik Turbin Angin Sumbu Horizontal Menggunakan *Airfoil* NACA 4712” benar – benar hasil karya saya sendiri dan bukan karya orang lain atau plagiat. Dalam pengutipan substansi sumber saya cantumkan dan belum pernah diajukan pda institusi manapun. Saya bertanggung jawab atas kesalahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang saya junjung tinggi. Apabila di kemudian hari dapat dibuktikan bahwa karya ilmiah saya adalah jiplakan, maka saya bersedia menerima sanksi yang telah ditentukan.

Demikian pernyataan ini saya bat dengan sebenar – benarnya tanpa adanya unsur paksaan dan tekanan dari pihak manapun. Saya bersedia mendapat sanksi akademik jika di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, Juli 2019
Yang menyatakan,

Bili Darnanto Susilo
NIM 141910101069

SKRIPSI

**ANALISIS KARAKTERISTIK TURBIN ANGIN SUMBU HORIZONTAL
MENGUNAKAN AIRFOIL NACA 4712**

oleh:

Bili Darnanto Susilo

NIM 141910101069

Pembimbing

Pembimbing Utama : Muh. Nurkoyim K., S.T., M.T.

Pembimbing Anggota : Dr. Gaguk Jatisukanto, S.T., M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul "Analisis Karakteristik Turbin Angin Sumbu Horizontal Menggunakan *Airfoil* NACA 4712" karya Bili Darnanto Susilo telah diuji dan disahkan pada:

Hari, tanggal : Senin, 29 Juli 2019

Tempat : Ruang Ujian Skripsi 2 Gedung B Lt. 1 Fakultas Teknik

Pembimbing

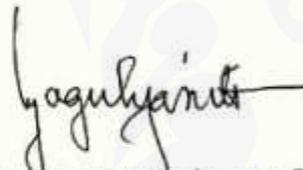
Pembimbing I

an



Muh. Nurkoyini Kustanto, S.T., M.T.
NIP. 196911221997021001

Pembimbing II



Dr. Gaguk Jatisukanto, S.T., M.T.
NIP. 196902091998021001

Penguji

Penguji I



Ariz Zainul Muttaqin, S.T., M.T.
NIP. 196812071995121002

Penguji II



Ir. Dwi Djumhariyanto, M.T.
NIP. 196008121998021001

**Mengesahkan
Dekan,**

Dr. Ir. Entin Hidayah M.UM.
NIP. 196612151995032001

RINGKASAN

ANALISIS KARAKTERISTIK TURBIN ANGIN SUMBU HORIZONTAL MENGUNAKAN *AIRFOIL* NACA 4712

Bili Darnanto Susilo, 141910101069; 80 halaman, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Pemerintah menjadikan Energi Baru Terbarukan (EBT) prioritas utama untuk menjaga ketahanan dan kemandirian energi. Potensi EBT di Indonesia sangat besar namun masih belum dimanfaatkan secara maksimal. Energi angin merupakan sumber EBT yang ketersediaannya melimpah, densitas energi dan perpindahan energinya cukup baik. Pengembangan energi angin di Indonesia sangat memungkinkan untuk dilakukan karena potensi angin di wilayah Indonesia, yang umumnya merupakan wilayah pesisir, cukup baik untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi PLTB.

Energi angin telah dikembangkan dan dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik dengan cara mengubah energi angin menjadi energi mekanik, kemudian energi mekanik akan diubah menjadi energi listrik menggunakan generator. Turbin angin adalah alat konversi energi angin yang dapat digunakan untuk mengubah energi angin menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran dan torsi. Pada Sistem Konversi Energi Angin (SKEA), terdapat berbagai faktor yang dapat mempengaruhi kinerja turbin angin. Salah satu hal yang perlu dipertimbangkan adalah perancangan turbin untuk turbin angin yang meliputi ukuran jari – jari rotor, penampang *airfoil*, panjang *chord*, dan sudut pasang turbin.

Penelitian ini akan dilakukan dengan mengambil lokasi di wilayah Pantai Pancer, Kecamatan Puger, Kabupaten Jember, Provinsi Jawa Timur. Metode simulasi digunakan untuk melakukan pendekatan secara komputasi terhadap kondisi riil yang ada di lapangan sehingga parameter lingkungan dianggap dalam kondisi *steady*. Data parameter – parameter lingkungan yang bekerja pada sebuah turbin angin akan dikumpulkan dan selanjutnya diolah, diharapkan mampu

menghasilkan data potensi pembangkitan energi angin menjadi energi listrik yang dapat diperoleh dari sebuah turbin angin tipe horizontal di wilayah Pantai Puger. Penelitian ini menggunakan kombinasi beberapa perangkat lunak untuk melakukan simulasi antara lain: *Inventor*; *QBlade*; *Microsoft Excel*. Dilakukan variasi *Angle of Attack*, $\alpha = -10$ s.d. $\alpha = 20$; *Tip Speed Ratio*, TSR = 0 s.d. TSR = 10; *Pitch Angle*, $\beta = 0$ s.d. $\beta = 10$. Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan nilai *Coefficient of performance* (C_p) yang tinggi dan Daya output (P) yang mencapai ≥ 500 W.

Dari hasil penelitian diketahui bahwa *Airfoil* NACA 4712 memiliki nilai C_l maksimum = 1.696 pada posisi $\alpha = 14^\circ$ sedangkan *airfoil* NACA 4412 memiliki nilai C_l maksimum = 1.628 pada posisi $\alpha = 15^\circ$ sehingga nilai C_l maksimum *airfoil* NACA 4712 lebih tinggi daripada *airfoil* NACA 4412. *Airfoil* NACA 4712 memiliki nilai maksimum $C_l/C_d = 153$ pada posisi $\alpha = 2^\circ$, sedangkan *airfoil* NACA 4412 memiliki nilai maksimum $C_l/C_d = 133.5$ pada posisi $\alpha = 5.5^\circ$ sehingga nilai maksimum C_l/C_d *airfoil* NACA 4712 lebih tinggi daripada *airfoil* NACA 4412.

Kemudian pada Turbin dengan *airfoil* NACA 4712 nilai maksimum C_p terjadi pada rentang TSR 5.3 s.d 6.8 yaitu $C_p = 0.46$, sedangkan Turbin dengan *airfoil* NACA 4412 nilai maksimum C_p terjadi pada rentang TSR 5.4 s.d 7.0 yaitu $C_p = 0.48$. Pada Sudut *pitch* 0 derajat turbin menghasilkan daya keluaran yang paling baik. Turbin angin dengan *airfoil* NACA 4712 memiliki parameter performa turbin $C_p = 0,49929$ dan memperoleh daya 1,15 kW pada kecepatan angin 7,66 m/s, sedangkan Turbin angin dengan *airfoil* NACA 4412 memiliki parameter performa turbin $C_p = 0,395365$ dan memperoleh daya 0.889 kW pada kecepatan angin 7,66 m/s.

SUMMARY

ANALYSIS OF CHARACTERISTICS HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE USING AIRFOIL NACA 4712

Bili Darnanto Susilo, 141910101069; 80 pages, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

The government makes Renewable New Energy (EBT) a top priority to maintain energy resilience and independence. The potential for EBT in Indonesia is very large but it is still not fully utilized. Wind energy is a source of EBT with abundant availability, energy density and energy transfer is quite good. The development of wind energy in Indonesia is very possible to do because the potential of wind in the Indonesian region, which is generally a coastal area, is good enough to be used as a PLTB energy source

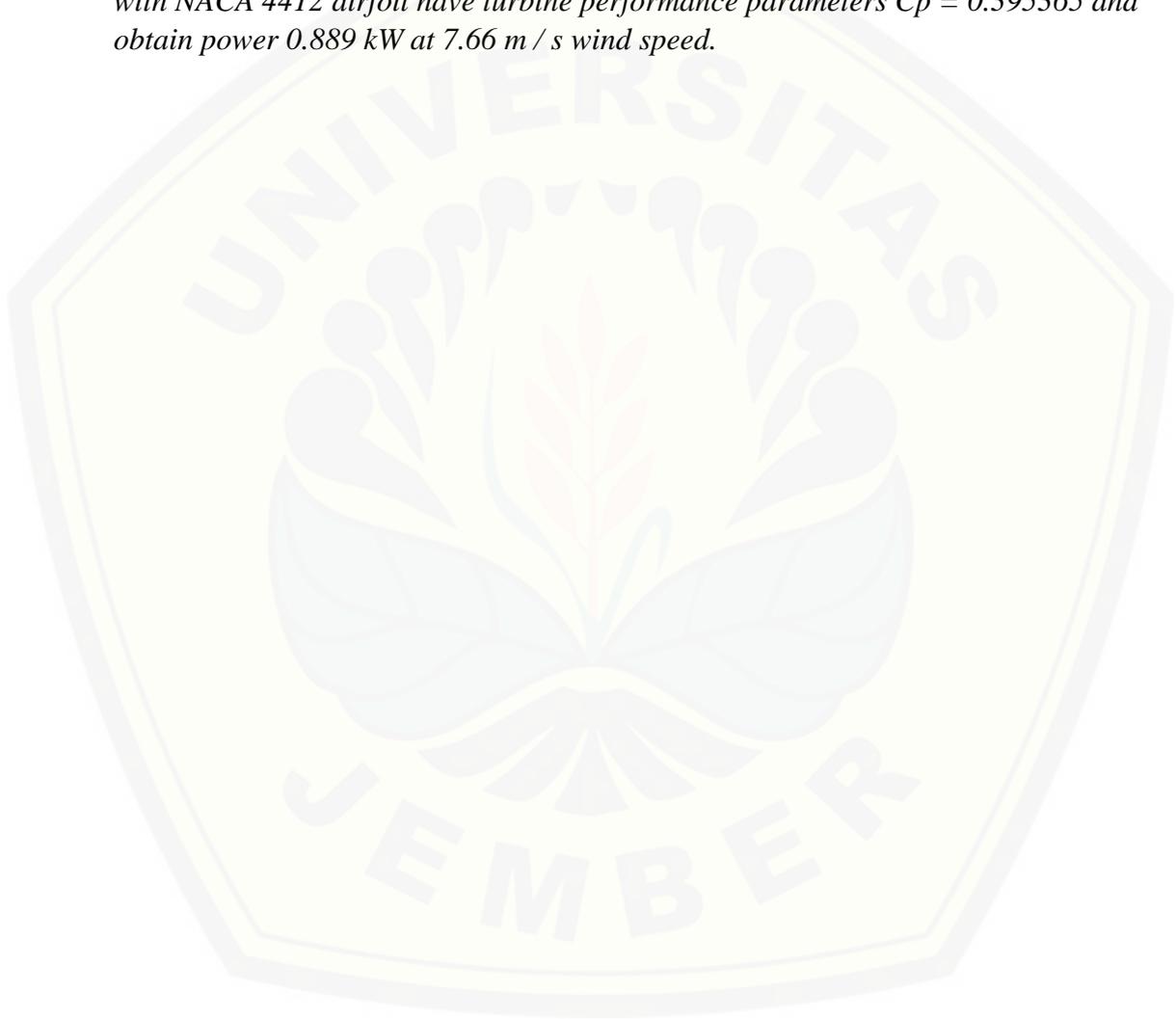
Wind energy has been developed and used as a source of electrical energy by converting wind energy into mechanical energy, then mechanical energy will be converted into electrical energy using a generator. Wind turbines are wind energy conversion tools that can be used to convert wind energy into mechanical energy in the form of rotation and torque. In the Wind Energy Conversion System (SKEA), there are various factors that can affect the performance of wind turbines. One of the things to consider is turbine molding for wind turbines which includes rotor finger size, airfoil cross section, chord length, and turbine tide angle.

This research will be conducted by taking a location in the Pancer Beach area, Puger District, Jember Regency, East Java Province. The simulation method is used to make a computational approach to the real conditions in the field so that environmental parameters are considered to be steady. Data on environmental parameters that work on a wind tube will be collected and then processed, expected to produce potential data on wind energy generation into electrical energy that can be obtained from a horizontal type wind turbine in the Puger Beach area. This study uses a combination of several software for simulation including Inventor; QBlade; Microsoft Excel. Variation of Angle of Attack is done, $\alpha = -10$ s.d. $\alpha = 20$; Tip Speed Ratio, $TSR = 0$ d. $TSR = 10$; Pitch Angle, $\beta = 0$ d. $\beta = 10$. This research is expected to produce a high Coefficient of performance (C_p) and Output power (P) that reaches $> = 500$ W.

From the results of the study note that Airfoil NACA 4712 has a maximum C_l value $= 1,696$ at position $\alpha = 14$ o while NACA 4412 airfoil has a maximum value of $C_l = 1,628$ at position $\alpha = 15$ o so that the maximum C_l value of NACA 4712 airfoil is higher than NACA 4412 airfoil. 4712 has the maximum value of $C_l / C_d = 153$ at the position $\alpha = 20$, while the NACA 4412 airfoil has a maximum value of

$Cl / Cd = 133.5$ at position $\alpha = 5.5^\circ$ so that the maximum value of Cl / Cd 47AC NACA airfoil is higher than the NACA 4412 airfoil.

Then in the Turbine with a 4712 NACA airfoil the maximum value of C_p occurs in the TSR 5.3 range of 6.8 that is $C_p = 0.46$, while the Turbine with the 4412 NACA airfoil the maximum value of C_p occurs in the TSR 5.4 range of 7.0 ie $C_p = 0.48$. At 0 degree pitch angle the turbine produces the best output power. Wind turbines with NACA 4712 airfoil have C_p turbine performance parameters = 0.49929 and obtain 1.15 kW of power at 7.66 m / s wind speed, while wind turbines with NACA 4412 airfoil have turbine performance parameters $C_p = 0.395365$ and obtain power 0.889 kW at 7.66 m / s wind speed.



PRAKATA

Puji syukur peneliti ucapkan kepada Allah SWT yang memberikan kesehatan kepada penulis untuk menyelesaikan skripsi yang berjudul “Analisis Karakteristik Turbin Angin Sumbu Horizontal Menggunakan *Airfoil* NACA 4712”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat menyelesaikan pendidikan Strata 1 Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Berbagai pihak telah membantu melancarkan penulisan skripsi ini. Oleh karena itu penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang memberikan karunia kesehatan dan kesabaran dalam menyelesaikan skripsi ini;
2. Ibu Dr. Entin Hidayah, M.UM. sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember;
3. Bapak Bapak Hari Arbiantara, S.T, M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember;
4. Bapak Hary Sutjahjono, S.T, M.T., selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember dan selaku Dosen Pembimbing Sementara;
5. DPA akademik;
6. Bapak Muh. Nurkoyim Kustanto, S.T., M.T. dan Bapak Dr. Gaguk Jatisukanto, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing;
7. Bapak Dr. Triwahju selaku ketua Kelompok Riset Turbin Angin;
8. Semua staf administrasi Fakultas Teknik.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih belum sempurna. Maka dari itu, peneliti mengharap kritik dan saran yang membangun

Jember, Juli 2019

Penulis

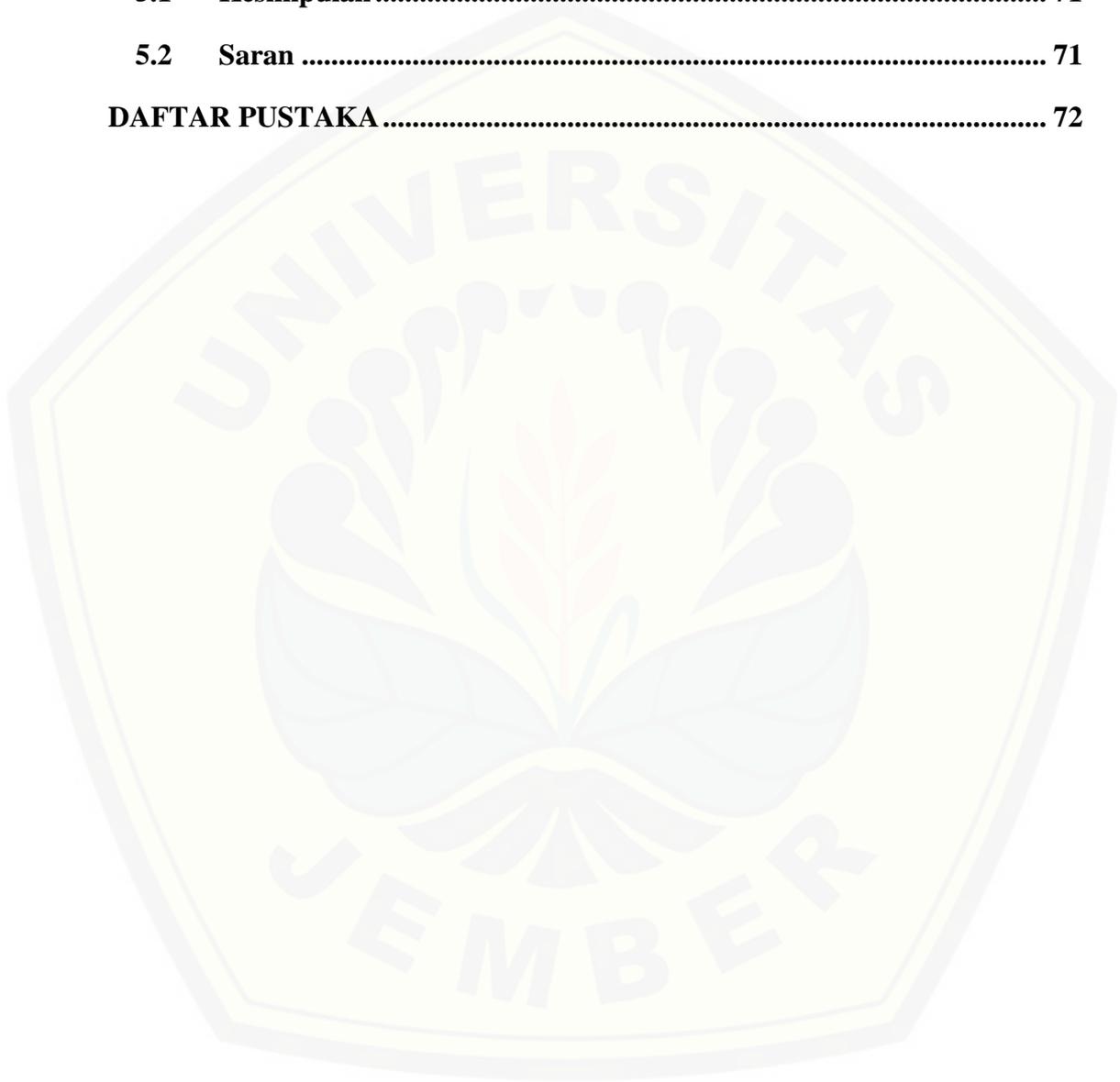
DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PERSEMBAHAN.....	ii
MOTO	iii
HALAMAN PERNYATAAN.....	iv
HALAMAN PEMBIMBINGAN.....	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
RINGKASAN	vii
<i>SUMMARY</i>	ix
PRAKATA	xi
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Batasan Masalah	5
1.4 Tujuan	5
1.5 Manfaat	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Potensi Energi Angin di Indonesia	7
2.2 Turbin Angin	10

2.3	Sistem Konversi Energi Angin.....	13
2.4	Teori Momentum Satu-Dimensi	16
2.5	<i>Airfoil</i>.....	23
2.5.1	Definisi <i>Airfoil</i>	23
2.5.2	<i>Airfoil NACA</i>.....	26
2.6	Teori Momentum dan Teori <i>Blade Element</i>	27
2.6.1	Teori Momentum	28
2.6.2	Teori <i>Blade Element</i>	28
2.7	<i>Computational Fluid Dynamics</i>	30
2.7.1	Persamaan Kontinuitas.....	30
2.7.2	Persamaan Navier Stoke	32
2.7.3	<i>Compressible Flow</i>	32
2.7.4	<i>Incompressible Flow</i>	34
2.7.5	Persamaan Momentum.....	34
2.7.6	Fundamental Laminar dan Turbulen.....	35
2.7.7	<i>Inviscid Flow</i>	38
2.8	QBlade.....	38
2.8	Hipotesis.....	39
BAB 3.	METODOLOGI PENELITIAN.....	40
3.1	Metode Penelitian.....	40
3.2	Alat dan Bahan Penelitian.....	40
3.3	Variabel Penelitian.....	43
3.4	Prosedur Penelitian.....	44
3.4.1	Studi Literatur dan Studi Lapang	44
3.4.2	Analisis Potensi Energi Angin	45

3.4.3	Penentuan Jenis Turbin dan Airfoil	45
3.4.4	Penentuan Jenis Bilah	45
3.4.5	Perhitungan Matematis.....	46
3.4.6	Pemodelan dan Konfigurasi <i>Airfoil</i>	46
3.4.7	Pembuatan Geometri Bilah (CAD 3D)	47
3.5	Diagram Alir.....	47
BAB 4.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	48
4.1	Kecepatan Angin dan Daya Angin yang Tersedia.....	48
4.2	Perhitungan Matematis	49
4.2.1	Estimasi Daya <i>Output</i>	49
4.2.2	Perhitungan Kebutuhan Daya Angin	50
4.2.3	Perhitungan Jari - jari Rotor Turbin.....	51
4.2.4	Penentuan nilai TSR dan Jumlah Bilah.....	51
4.2.5	Menentukan <i>Airfoil</i> Turbin	52
4.2.6	Perhitungan Jumlah dan Posisi Elemen Bilah.....	56
4.2.7	Perhitungan TSR Parsial	56
4.2.8	Perhitungan <i>Cl</i> dan <i>Alpha</i>	57
4.2.9	Perhitungan <i>Flow Angel</i> dan <i>Twist</i>	59
4.2.10	Linierisasi <i>Twist</i>	60
4.3	Desain Rotor Turbin.....	62
4.4	Hasil Simulasi	63
4.4.1	Simulasi <i>Blade Element Momentum Rotor</i>	63
4.4.2	Simulasi Multi Parameter BEM.....	64
4.4.3	Simulasi Turbin BEM	67
4.5	<i>Turbulent Windfield</i>.....	68

4.6	Simulasi <i>Nonlinier Lifting Line</i>	69
4.7	Geometri Bilah Turbin	70
BAB 5. PENUTUP		71
5.1	Kesimpulan	71
5.2	Saran	71
DAFTAR PUSTAKA		72



DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Ketersediaan EBT di Indoensia.....	2
Tabel 2.1 Perbandingan TASH dan TASV	12
Tabel 4.1 Estimasi Nilai Efisiensi Komponen Turbin Angin	50
Tabel 4.2 Perhitungan Daya Angin.....	50
Tabel 4.3 Perhitungan Jari - jari Bilah Turbin	51
Tabel 4.4 TSR dan Jumlah Bilah Turbin Angin	52
Tabel 4.5 Korelasi <i>Coefficient of lift, Cl</i> dengan <i>angle of attack</i> , pada Airfoil NACA 4412	58
Tabel 4.6 Korelasi Nilai <i>Coefficient of lift, Cl</i> dengan <i>angle of attack</i> , pada Airfoil NACA 4712	58
Tabel 4.7 Hasil Perhitungan Nilai Menggunakan Airfoil NACA 4412	59
Tabel 4.8 Hasil Perhitungan Nilai Menggunakan Airfoil NACA 4712	60

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Peta Kecepatan Angin di Indonesia	7
Gambar 2.2 Peta Kecepatan Angin di Sumatera.....	7
Gambar 2.3 Peta Kecepatan Angin di Kalimantan	8
Gambar 2.4 Peta Kecepatan Angin di Sulawesi.....	8
Gambar 2.5 Peta Kecepatan Angin di Maluku dan Papua.....	9
Gambar 2.6 Peta Kecepatan Angin di NTB dan NTT	9
Gambar 2.7 Peta Kecepatan Angin di Jawa, Madura dan Bali	9
Gambar 2.8 Global Cumulative Installed Wind Capacity	10
Gambar 2.9 Turbin Angin Modern	11
Gambar 2.10 Perbedaan konstruksi TASH dan TASV	12
Gambar 2.11 Model Aktuator Disk pada Turbin Angin	15
Gambar 2.12 Model <i>Actuator Disc</i> pada TASH.....	17
Gambar 2.13 Parameter Operasional Turbin Betz	20
Gambar 2.14 <i>Airfoil Nomenclature</i>	24
Gambar 2.15 Gaya dan momen yang bekerja pada penampang <i>airfoil</i>	24
Gambar 2.16 Pengaruh Alfa terhadap Cl pada airfoil.....	25
Gambar 2.17 Skema Bilah dengan n Elemen.....	29
Gambar 2.18 Geometri Bilah Turbin Angin Sumbu Horizontal.....	29
Gambar 2.19 Copy Right Perangkat Lunak QBlade.....	39
Gambar 3.1 Spesifikasi Sistem Komputer Untuk Penelitian	41
Gambar 3.2 Spesifikasi Display Komputer.....	41
Gambar 3.3 Anemometer Digital	42
Gambar 3.4 <i>Data Logger</i>	42
Gambar 3.5 Koordinat dan Peta Lokasi Penelitian di Pantai Puger.....	44
Gambar 3.6 Profil <i>Airfoil</i> NACA 4712.....	45
Gambar 3.7 Profil <i>Airfoil</i> NACA 4412.....	45
Gambar 4.1 Hasil Pengukuran Kecepatan Angin di Pantai Pancer, Puger	48

Gambar 4.2 Parameter <i>XFOIL Direct Analysis</i>	52
Gambar 4.3 <i>Airfoil</i> NACA 4412 dan NACA 4712	53
Gambar 4.4 Posisi <i>Angle of Attack</i> () <i>Airfoil</i> NACA 4412 Pada kondisi <i>Coefficient of lift</i> (Cl) Maksimum	54
Gambar 4.5 Posisi <i>Angle of Attack</i> () <i>Airfoil</i> NACA 4712 Pada kondisi <i>Coefficient of lift</i> (Cl)Maksimum	54
Gambar 4.6 Hasil <i>XFOIL Direct Analysis</i>	55
Gambar 4.7 Korelasi <i>Coefficient of lift</i> (Cl) dengan <i>angle of attack</i> ().....	57
Gambar 4.8 Hasil Linierisasi <i>Twist Airfoil</i> NACA 4412	61
Gambar 4.9 Hasil Linierisasi <i>Twist Airfoil</i> NACA 4712	61
Gambar 4.10 <i>Twist</i> Linier (a) <i>Airfoil</i> 4412 (b) <i>Airfoil</i> 4712	61
Gambar 4.11 Rotor Turbin dengan <i>Airfoil</i> NACA 4412.....	62
Gambar 4.12 Rotor Turbin dengan <i>Airfoil</i> NACA 4712.....	63
Gambar 4.13 Hasil Simulasi BEM Rotor.....	64
Gambar 4.14 Hasil Simulasi Multi Parameter BEM Rotor Turbin airfoil NACA 4412 pada pitch 0	65
Gambar 4.15 Hasil Simulasi Multi Parameter BEM Rotor Turbin airfoil NACA 4412 pada pitch 10	65
Gambar 4.16 Hasil Simulasi Multi Parameter BEM Rotor Turbin airfoil NACA 4712 pada pitch 0	66
Gambar 4.17 Hasil Simulasi Multi Parameter BEM Rotor Turbin airfoil NACA 4712 pada pitch 10	67
Gambar 4.18 Hasil Simulasi Turbin BEM.....	68
Gambar 4.19 Hasil Simulasi <i>Turbulent Windfield</i>	68
Gambar 4.20 Hasil Simulasi <i>Nonlinier Lifting Line</i> Turbin Dengan <i>Airfoil</i> NACA 4712.....	69
Gambar 4.21 Hasil Simulasi <i>Nonlinier Lifting Line</i> Turbin Dengan <i>Airfoil</i> NACA 4412.....	69
Gambar 4.22 Kurva <i>Airfoil</i>	70
Gambar 4.23 Bilah Turbin	70

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sumber energi dapat dikelompokkan menjadi dua macam, yaitu energi terbarukan (*renewable energy*) dan energi yang tidak terbarukan (*non-renewable* atau *depleted energy*). Energi yang tidak terbarukan pada umumnya bersumber dari energi fosil seperti: minyak bumi, batu bara dan gas alam. Total kebutuhan energi sektoral di Indonesia tahun 2015 adalah 876.594.000 SBM (tanpa biomassa tradisional). Total produksi energi primer (batubara, gas bumi, minyak bumi, dan *renewable energy*) Indonesia tahun 2015 adalah 2.848.025.000 SBM dimana sekitar 1.887.366.000 SBM diekspor ke luar negeri berupa batubara, minyak bumi dan gas bumi. Pada tahun yang sama Indonesia juga melakukan impor energi sebesar 348.267.000 SBM berupa minyak bumi, BBM dan LPG. Sektor transportasi merupakan pengguna terbesar kemudian disusul industri dan non-energi, rumah tangga, komersial dan sektor lainnya (*Indonesia Energy Outlook*, 2016).

Konsumsi energi di Indonesia dari terbesar sampai terkecil meliputi: minyak bumi, gas bumi, batubara dan energi hidro. Pemerintah telah berusaha untuk meningkatkan penggunaan sumber energi terbarukan agar dapat mengurangi pangsa bahan bakar fosil, terutama untuk pembangkit listrik. Energi terbarukan adalah sumber energi yang dihasilkan dari sumber daya energi yang secara alamiah tidak akan habis dan dapat berkelanjutan jika dikelola dengan baik, contoh sumber energi terbarukan seperti energi panas bumi, energi cahaya matahari, energi *biofuel*, aliran air sungai, angin, biomassa, biogas, gelombang laut dan suhu kedalaman laut. Penggunaan sumber energi terbarukan untuk elektrifikasi pedesaan di Indonesia berpotensi, karena ribuan pulau dari kepulauan membuatnya sulit untuk membangun distribusi listrik yang saling terhubung (Sitompul, 2011).

Pemerintah menjadikan Energi Baru Terbarukan (EBT) prioritas utama untuk menjaga ketahanan dan kemandirian energi. Potensi EBT di Indonesia sangat besar namun masih belum dimanfaatkan secara maksimal. Tabel 1.1 memberikan

gambaran kondisi ketersediaan EBT pada tahun 2016. Salah satu peraturan yang mengatur pengembangan EBT di masa mendatang adalah PP. No. 79 tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional. Pemetaan potensi EBT mendukung pengembangan potensi EBT yang terdapat di Indonesia.

Tabel 1.1 Ketersediaan EBT di Indonesia (*Indonesia Energy Outlook*, 2016)

Sumber Energi	Ketersediaan	Kapasitas Terpasang	Penggunaan (%)
Hydro	94.476 MW	5.024 MW	5,3
Geothermal	29.544 MW	1.403,5 MW	4,8
Bioenergy	32.000 MW dan 200.000 bpd BBN	1.740,4 MW	5,4
Solar	4,8 kWh/m ² /hari 207,9 GW	78,5 MW	
Wind and Hybrid	3 – 6 m/s 60 GW	3,1 MW	
Marine Energy	61 GW Wave: 1.995 MW OTEC 40.001 MW Ocean Wave 17.989 MW	0,01 MW	

Energi angin merupakan sumber EBT yang ketersediaannya melimpah, memiliki kerapatan energi dan perpindahan energinya cukup baik. Pengembangan energi angin di Indonesia sangat memungkinkan untuk dilakukan karena potensi angin di wilayah Indonesia, yang umumnya merupakan wilayah pesisir, cukup baik untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi PLTB (*Indonesia Energy Outlook*, 2016).

Penelitian tentang karakteristik angin di wilayah pantai selatan pulau Jawa pada tahun 2010 menunjukan bahwa kecepatan angin bervariasi mulai dari 1,72 m/s hingga 10,15 m/s (Aji dan Cahyadi, 2015). Turbin angin adalah salah satu mesin konversi energi yang digunakan untuk mengubah energi angin menjadi energi listrik. Sebuah turbin angin dengan sudu tipe flat berbahan plat besi setebal 3 mm dibuat berdasarkan profil *airfoil* NACA 4412. Bilah turbin angin di pasang dengan variasi sudut kemiringan, $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 15^\circ$. Hasil uji turbin tersebut menghasilkan

data putaran tertinggi terjadi pada sudut kemiringan $\beta = 15^\circ$ yaitu $n = 587$ rpm, untuk akumulasi energi dalam waktu $t = 2$ jam, diperoleh daya $P = 51,85$ Wh. Turbin ini memiliki efisiensi sebesar 4,44% (Prasetya, 2015). Desain bilah sangat mempengaruhi karakteristik kinerja rotor turbin angin. Prinsip aerodinamika memiliki peran penting dalam menentukan efisiensi kerja bilah. Kombinasi teori momentum (*momentum theory*) dan teori elemen bilah (*blade element theory*) dapat dihasilkan *strip theory* atau *blade element momentum theory* (BEM Theory) yang bisa digunakan untuk mengetahui karakteristik kinerja rotor turbin angin (Fandi dkk., 2013).

Penelitian tentang unjuk kerja turbin angin sumbu horizontal telah dilakukan menggunakan *airfoil* tipe n-10 dengan nilai koefisien gaya angkat (C_L) tinggi dan bentuknya mudah untuk dibuat, panjang bilah, $R = 1$ meter. Pada data hasil pengujian diperoleh nilai *cut-in speed* sebesar 2 m/s dan nilai *Tip Speed Ratio* (TSR) 4,9 pada kecepatan angin, $v = 3,2$ m/s. Analisis dilakukan dengan menggunakan metode *Blade-Element Momentum* (BEM) mampu dihasilkan daya mekanik $P_m = 30,1$ W dengan efisiensi tertinggi pada 40,9% di kecepatan angin, $v = 2,8$ m/s. Nilai ini telah memadai untuk mengeksplorasi potensi angin yang ada di Indonesia (Titanio dan Safitra, 2015). Penelitian dengan metode simulasi menggunakan perangkat lunak *FLUENT*, turbin angin dengan diameter 3 meter, menggunakan *airfoil* NREL-S833 dan variasi pada *chord*, mampu menghasilkan C_L dan efisiensi paling optimal pada nilai TSR 8 yakni sebesar 47,6% untuk tipe *mixed ideal blade*. Berdasarkan hasil simulasi tipe *mixed ideal blade* ini mampu menghasilkan daya sebesar 5661,8 Watt pada kecepatan angin 15 m/s (Fandi, dkk., 2013). Pada SKEA, terdapat berbagai faktor yang dapat mempengaruhi kinerja turbin angin. Salah satu hal yang perlu dipertimbangkan adalah perancangan turbin untuk turbin angin yang meliputi ukuran jari – jari rotor, penampang *airfoil*, panjang *chord*, dan sudut pasang turbin (Piggot, 2008). Semakin besar kecepatan angin maka semakin besar kecepatan putaran turbin yang dihasilkan sehingga daya mekanik ataupun elektrik yang akan dihasilkan akan semakin besar pula (Gunarto dan Sarwono, 2017).

Perancangan bilah adalah salah satu upaya untuk meningkatkan keandalan turbin angin melalui pengembangan struktur *airfoil* dan juga untuk mengurangi kebisingan yang dihasilkan oleh turbin angin selama berotasi. Bilah turbin angin memiliki peran penting, karena bilah merupakan bagian yang berinteraksi secara langsung dalam penyerapan energi sistem. Sehingga turbin angin harus dirancang dengan baik untuk memungkinkan menyerap energi dengan efisiensi yang paling besar (Manikandan dan Stalin, 2013). Pemodelan numerik dapat dilakukan dengan menggunakan *full three-dimensional computational fluid dynamics* (CFD) dengan model turbulensi *k- SST*. Dari pemodelan tersebut diketahui bahwa prediksi CFD menghasilkan pemodelan koefisien daya yang paling akurat. Hubungan yang bagus antara koefisien daya (C_p) yang diukur dan dihitung dari model tersebut sangat mengesankan bahwa prediksi akurat kinerja turbin angin sumbu horizontal (TASH) pada kondisi skala penuh adalah mungkin untuk dilakukan menggunakan metode CFD (Hsiao, dkk., 2013).

Pada penelitian ini, dilakukan menggunakan metode simulasi. Metode simulasi pada penelitian ini dengan melakukan perhitungan menggunakan BEM *Theory* untuk dapat mengetahui besarnya parameter-parameter acuan yang menentukan tinggi atau rendahnya efisiensi kerja sebuah turbin angin. Pemilihan BEM *Theory* mengacu pada faktor kecepatan angin, *coefficient of lift* (C_l) dan *coefficient of drag* (C_d) yang akan dihitung dan menghasilkan nominal daya *output* (P) turbin angin. Perangkat lunak *QBlade* digunakan untuk menganalisis BEM *Theory* pada TASH.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut diatas, maka rumusan masalah yang akan diselesaikan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perbandingan gaya aerodinamika turbin angin sumbu horisontal antara *airfoil* NACA 4712 dan NACA 4412?
2. Bagaimana perbandingan karakteristik turbin angin sumbu horizontal bilah *tapperless* antara *airfoil* NACA 4712 dan NACA 4412?

3. Apakah *airfoil* NACA 4712 menghasilkan daya keluaran yang lebih baik daripada *airfoil* NACA 4412 pada turbin angin sumbu horizontal?

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini, terdapat beberapa hal yang menjadi batasan dalam penyelesaian rumusan masalah antara lain:

1. Turbin angin yang digunakan adalah tipe sumbu horizontal.
2. Bilah turbin yang digunakan adalah tipe *tapperless*.
3. *Airfoil* yang digunakan adalah tipe NACA 4712 dan NACA 4412.
4. Parameter lingkungan (temperatur, tekanan udara, kelembaban udara) dianggap dalam kondisi *steady*.
5. Pengaruh defleksi pada turbin diabaikan.
6. Efisiensi generator, kontroler dan transmisi masing-masing dianggap 90 %, 90%, dan 80%.

1.4 Tujuan

Penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut.

1. Untuk mengetahui gaya aerodinamika yang bekerja pada *airfoil* NACA 4712 dan NACA 4412.
2. Untuk mengetahui perbandingan nilai *coefficient of lift* (C_l) dan *coefficient of drag* (C_d) paling baik dengan variasi nilai *angle of attack* () pada *airfoil* NACA 4712 dan NACA 4412.
3. Untuk mengetahui sudut *pitch* terbaik agar memperoleh daya listrik (P_e) terbesar.
4. Untuk mengetahui nilai *coefficient of power* (C_p) yang paling tinggi dengan variasi nilai *tip speed ratio* (TSR) pada turbin angin sumbu horizontal.
5. Untuk mengetahui daya maksimal (P_{max}) yang dapat diperoleh turbin angin sumbu horizontal *airfoil* NACA 4712 dibandingkan dengan NACA 4412.

1.5 Manfaat

Manfaat penelitian ini antara lain:

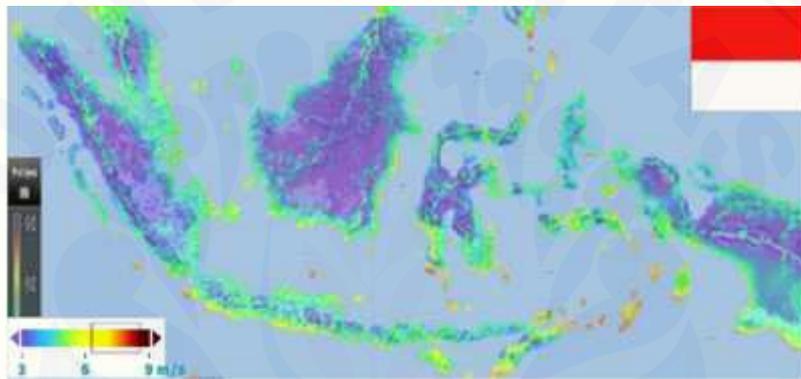
1. Membantu pemerintah Indonesia dalam program pengembangan Sistem Konversi Energi Angin (SKEA).
2. Memberikan teladan bagi masyarakat lokal untuk belajar mengelola potensi energi angin.
3. Memberikan gambaran potensi elektrifikasi yang dapat dikembangkan menggunakan SKEA.



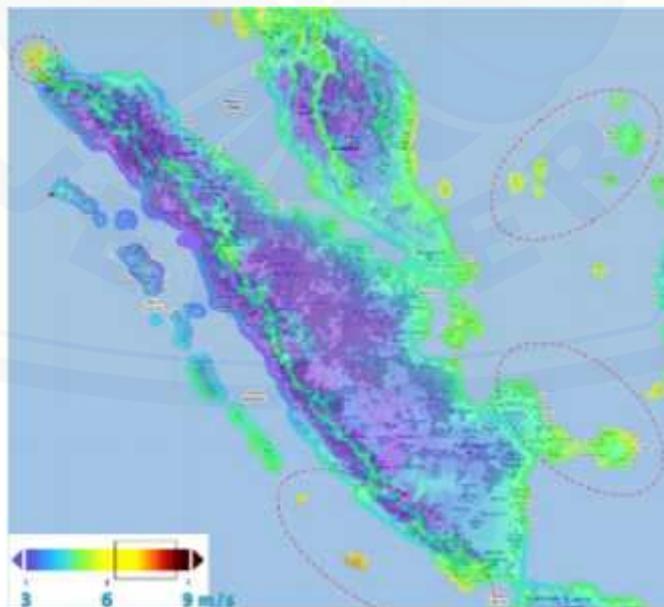
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Potensi Energi Angin di Indonesia

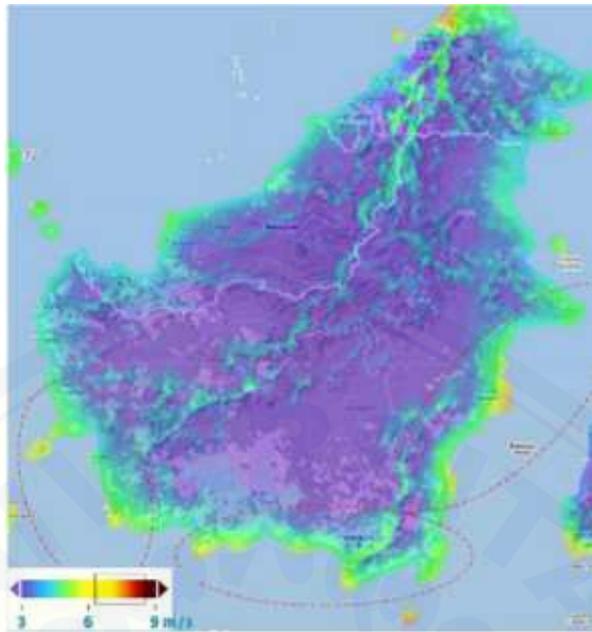
Angin adalah udara yang bergerak sebagai akibat dari adanya rotasi bumi dan beda tekanan udara pada setiap wilayah di permukaan bumi. Energi angin banyak jumlahnya, tidak akan habis, tersebar luas dan bersih. Peta kecepatan angin di beberapa wilayah di Indonesia ditunjukkan pada Gambar 2.1 sampai dengan Gambar 2.7.



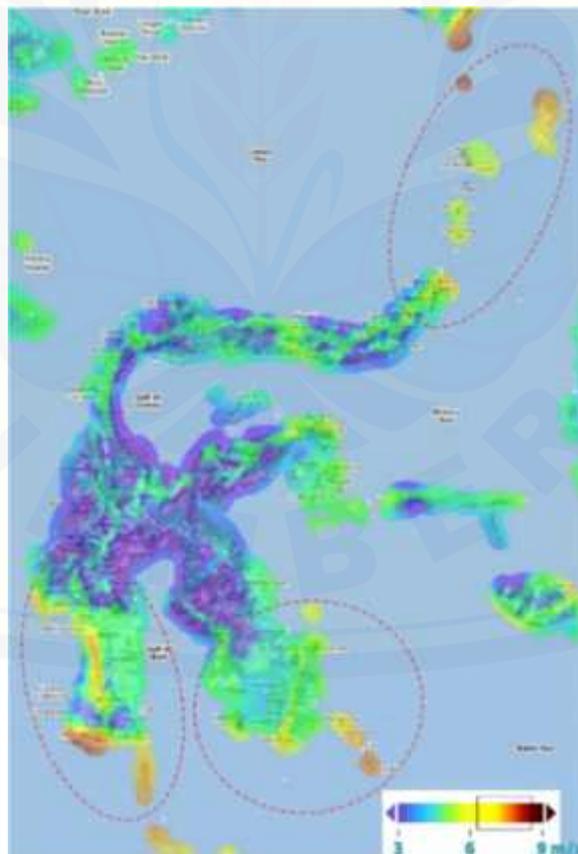
Gambar 2.1 Peta Kecepatan Angin di Indonesia (Martosaputro, 2013)



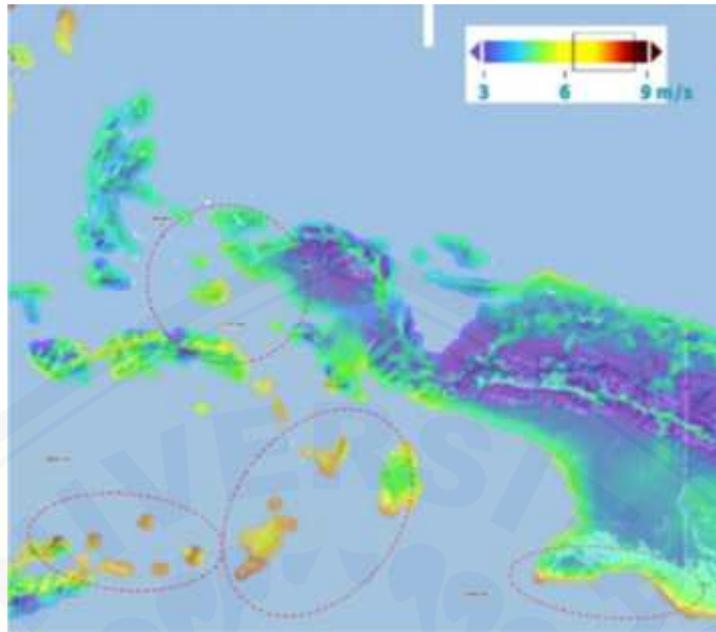
Gambar 2.2 Peta Kecepatan Angin di Sumatera (Martosaputro, 2013)



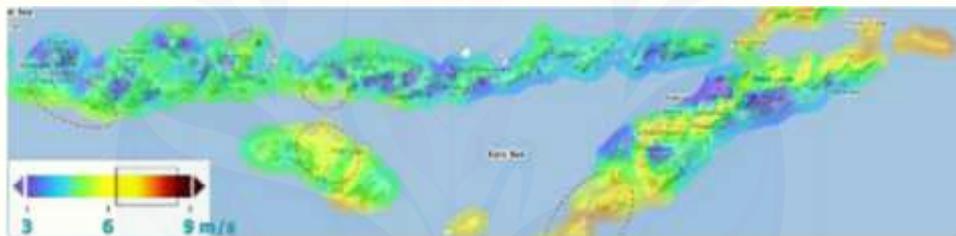
Gambar 2.3 Peta Kecepatan Angin di Kalimantan (Martosaputro, 2013)



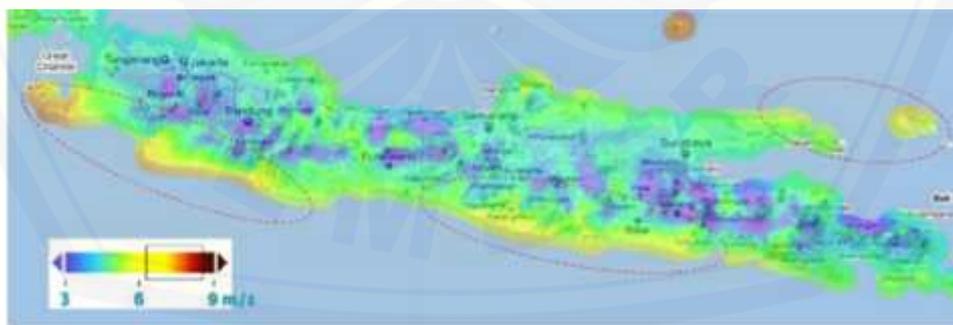
Gambar 2.4 Peta Kecepatan Angin di Sulawesi (Martosaputro, 2013)



Gambar 2.5 Peta Kecepatan Angin di Maluku dan Papua (Martosaputro, 2013)



Gambar 2.6 Peta Kecepatan Angin di NTB dan NTT (Martosaputro, 2013)



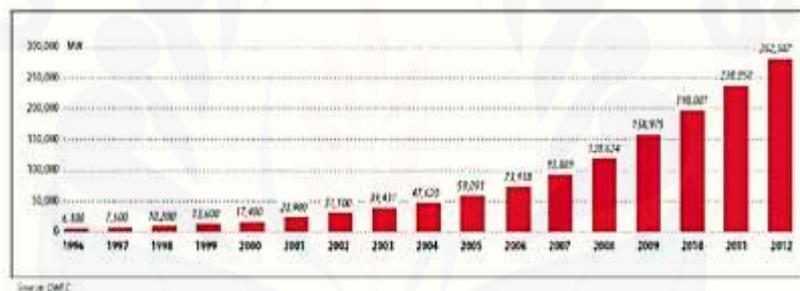
Gambar 2.7 Peta Kecepatan Angin di Jawa, Madura dan Bali (Martosaputro, 2013)

Energi angin di masa sekarang ini telah dikembangkan dan dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik dengan cara mengubah energi angin menjadi energi mekanik, kemudian energi mekanik akan diubah menjadi energi listrik

menggunakan generator. Turbin angin adalah alat konversi energi angin yang dapat digunakan untuk mengubah energi angin menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran dan torsi.

2.2 Turbin Angin

Angin menjadi sumber energi yang mengalami perkembangan paling signifikan pada akhir abad ke-2. Seiring dengan perkembangan peradaban manusia, kesadaran manusia terhadap kebutuhan energi yang *sustainable* dan *renewable* mulai muncul dengan adanya gagasan pemanfaatan angin sebagai pembangkit energi yang keberadaannya sangat melimpah namun kurang diperhatikan. Pemanfaatan angin tersebut diwujudkan dengan pembuatan turbin angin. Pemanfaatan tersebut mengalami peningkatan secara global seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 *Global Cumulative Installed Wind Capacity* (GWEC, 2012)

Turbin angin adalah alat yang berfungsi untuk mengubah energi angin menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros dan torsi. Putaran poros ini selanjutnya dimanfaatkan untuk pembangkit listrik atau pompa air. Proses perubahan energi tersebut dilakukan dengan cara memanfaatkan gaya *lift* pada bilah yang dapat memutar poros turbin akibat momen torsi yang dihasilkan dan putaran tersebut akan diubah menjadi energi listrik dengan menggunakan generator. Meskipun begitu, sumber energi ini tidak dapat digunakan secara langsung melainkan harus disimpan terlebih dahulu pada sebuah *catu daya*. Hal ini disebabkan oleh *output* dari turbin angin sangat fluktuatif.



Gambar 2.9 Turbin Angin Modern (Manwell, 2009)

Berdasarkan letak porosnya, turbin angin dibagi menjadi dua jenis yaitu sebagai berikut:

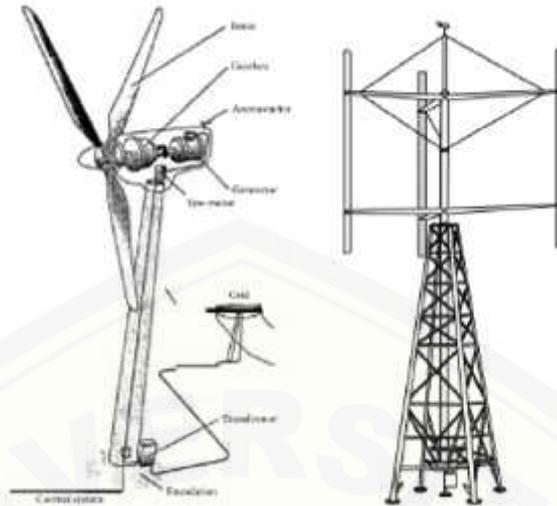
1. Turbin angin sumbu horizontal (TASH):

- Turbin angin poros horizontal adalah jenis turbin angin dengan posisi poros sejajar dengan arah datangnya angin seperti baling – baling pesawat terbang pada umumnya. Turbin ini harus diarahkan sesuai dengan arah angin yang paling tinggi kecepatannya.
- Turbin angin poros horizontal berputar karena adanya gaya hambat dan gaya angkat yang merupakan hasil interaksi dari turbin dengan angin.

2. Turbin angin sumbu vertikal (TASV):

- Turbin angin poros vertikal adalah jenis turbin angin dengan posisi poros yang tegak lurus dengan arah datangnya angin.
- Prinsip kerja turbin angin poros vertikal dipengaruhi oleh gaya dorong yang dihasilkan dari interaksi antara turbin – turbin dengan angin sehingga menyebabkan rotor berputar dengan sendirinya.

Bentuk turbin angin sumbu horizontal dan turbin angin sumbu vertikal dapat dilihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Perbedaan konstruksi TASH dan TASV (Jha, 2011)

Pada Tabel 2.1 dapat dilihat perbedaan dari kedua jenis turbin. Pada turbin angin sumbu horizontal generator diletakkan dibelakan turbin, sedangkan pada turbin angin sumbu vertikal generator diletakkan pada dasar turbin sehingga hal ini akan mempermudah dalam melakukan *mintenance*. Dengan posisi turbin yang horizontal, poros turbin ini sejajar dengan arah datangnya angin sehingga akan membutuhkan mekanisme tersendiri agar turbin bisa tetap mengikuti arah angin. Berbeda dengan turbin angin sumbu vertikal, turbin ini memiliki s yang tegak lurus dengan arah angin sehingga dapat berputar meskipun arah angin terus berubah – ubah.

Tabel 2.1 Perbandingan TASH dan TASV (Wu dkk., 2011)

Jenis Turbin	Kelebihan	Kekurangan
TASH	) Efisiensi energi lebih tinggi	) Biaya pemasangan lebih mahal
	) Mampu mencapai angin berkecepatan tinggi karena memiliki tiang yang tinggi	) Membutuhkan kabel transmisi daya yang lebih panjang dari puncak ke bawah.
	) Regulasi daya menggunakan control sudut <i>pitch</i> dan <i>stall</i> pada saat kecepatan angin tinggi	) Membutuhkan sistem pengarah
TASV	) Biaya pemasangan lebih murah dan lebih mudah	) Efisiensi energi lebih rendah
	) Tidak bergantung pada arah datangnya angin	) Fluktuasi torsi lebih tinggi dan mengakibatkan getaran
	) Cocok untuk di pasang pada puncak bangunan	) Pilihan regulasi daya sangat terbatas pada kecepatan angin tinggi

2.3 Sistem Konversi Energi Angin

Teori Betz adalah sebuah teori tentang energi maksimum yang dapat diperoleh dari sebuah turbin angin. Beberapa dekade sebelum munculnya turbin angin modern dengan 3 sudu yang menghasilkan listrik, Teori ini dikembangkan pada 1919 oleh fisikawan Jerman Albert Betz. Menurut Teori Betz, turbin tidak dapat menangkap lebih dari 59,3% dari total energi kinetik angin. Nilai tersebut merupakan nilai efisiensi daya maksimum, $C_{p_{max}}$, dari turbin angin yang merupakan rasio dari daya maksimum yang diperoleh dari angin dengan daya total yang tersedia dalam angin. Faktor 0,593 dikenal sebagai Koefisien Betz. Ini adalah sebagian kecil dari daya angin yang dapat diekstraksi (Npower 2009).

Teori Betz ini telah menjadi acuan dalam SKEA. Besarnya energi yang dapat dikonversi berbanding lurus dengan massa jenis udara (ρ), luas area sapuan (A), dan kecepatan angin (v). Sistem ini bertujuan untuk mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi mekanik. Perubahan energi dapat berupa energi mekanik dan energi listrik.

Kecepatan angin (v) adalah salah satu elemen alamiah yang paling menentukan untuk mengoptimalkan daya *output* dari SKEA. Dengan mengukur kecepatan angin dan arah angin, peran sistem konversi energi angin akan lebih efektif. Untuk mengukur kecepatan dan arah angin memerlukan instrumen pengukuran yang baik, seperti: anemometer, *wind direction* dan *data logger*.

Angin adalah udara yang bergerak. Energi kinetik yang terdapat dalam angin di jelaskan pada Persamaan (2.1) (Hemami, 2006):

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

dengan E = daya angin (Watt)

m = massa udara (kg)

v = kecepatan aliran udara (m/s)

Laju aliran massa udara di tunjukan pada Persamaan (2.2) (Npower 2009):

$$\dot{m} = \rho \quad (2.2)$$

dengan ρ = densitas udara ($1.225 \text{ k} / \text{m}^3$)

v = kecepatan angin (m/s)

\dot{m} = laju aliran massa (kg/s)

Energi kinetik angin yang berhembus dalam satuan waktu (P_a) dapat disubstitusikan dari Persamaan (2.2) (Npower, 2009):

$$P_w = \frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (2.3)$$

dengan P_w = daya angin (W)

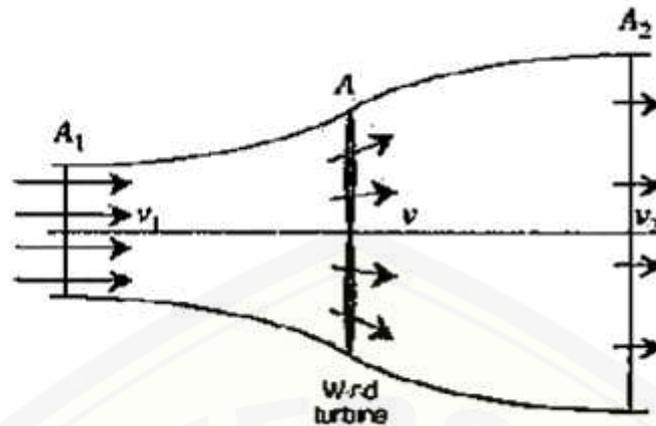
ρ = densitas udara ($1.225 \text{ k} / \text{m}^3$)

A = luas sapuan turbin (m^2)

v = kecepatan udara (m/s)

Besar daya diatas merupakan daya yang dimiliki angin sebelum dikonversi oleh turbin angin. Dari total daya yang dimiliki, tidak semua energi angin (P_w) yang dapat dikonversi menjadi enegi mekanik (P_m) (Piggot, 2008).

Aliran udara sebelum melewati rotor turbin lebih kecil luasnya daripada setelah melewati rotor. Terjadinya ekspansi aliran udara ini sesuai dengan hukum kontiyuitas yaitu laju aliran masa (\dot{m}) sebelum melewati turbin dan sesudah melewati turbin adalah sama. Maka daya angin yang dapat dikonversi turbin diambil dari selisih luas penampang dan kecepatan angin di depan rotor dengan luas penampang dan kecepatan angin di dibelakang rotor, perolehan daya turbin tersebut dijabarkan dalam hokum kontinyuitas yaitu jika v_1 = kecepatan angin di depan rotor, v = kecepatan angin saat melewati rotor, dan v_2 = kecepatan angin dibelakan rotor.



Gambar 2.11 Model Aktuator Disk pada Turbin Angin (Manwell, 2009)

Berdasarkan persamaan kontinuitas, maka daya mekanik turbin yang diperoleh adalah (Tong, 2010):

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A_1 v_1^3 - \frac{1}{2} \rho A_2 v_2^3 \quad (2.4)$$

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho (A_1 v_1^3 - A_2 v_2^3) \quad (2.5)$$

dengan A_1 = luas aliran udara sebelum melewati rotor (m^2)

v_1 = kecepatan aliran udara sebelum melewati rotor (m/s)

A_2 = luas aliran setelah melewati rotor (m^2)

v_2 = kecepatan aliran udara setelah melewati rotor (m/s)

meninjau persamaan kontinuitas:

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

maka persamaannya didapatkan:

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A_1 v_1 (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.7)$$

Dari Persamaan (2.7), untuk mendapatkan daya yang maksimal maka v_2 harus bernilai nol dengan kata lain angin berhenti setelah melewati rotor. Namun hal tersebut tidak mungkin terjadi kecuali rotor berbentuk bulat penuh tanpa terjadi

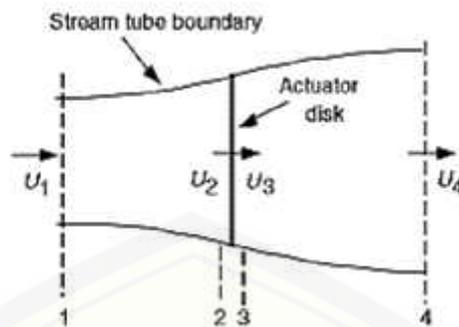
proses konveksi energi. Cara untuk memaksimalkan penyerapan energi angin adalah dengan memperbesar nilai rasio $\frac{v_1}{v_2}$.

Persamaan lainnya yang diperlukan untuk mengetahui besarnya daya angin yang dapat dikonversi menjadi daya mekanik adalah sebagai berikut.

2.4 Teori Momentum Satu-Dimensi

Model *simple* secara matematis dapat digunakan untuk menentukan daya dari sebuah turbin, gaya dorong angin pada rotor, dan efek operasional rotor terhadap daerah lokal angin terhembus. Sejak 100 tahun yang lalu model *simple* telah digunakan sebagai penentu performa dari sebuah propeler kapal laut. Analisa yang terdapat dalam *Momentum Theory* dan *Betz Limit* berdasar pada teori Euler. Teori itu berfokus pada *Control volume* yang terdiri dari *surface stream tube* dan *stream tube cross-sectional area*. Dengan menggunakan *actuator disc*, analisa turbin akan disederhanakan yang bertujuan untuk menciptakan diskontinuitas tekanan pada aliran di dalam *stream tube*. Beberapa asumsi yang dijadikan sebagai dasar analisis turbin tersebut, berupa:

- a. *Homogenous, incompressible, steady state fluid flow;*
- b. *No friction drag;*
- c. Jumlah bilah yang tidak terbatas;
- d. Gaya *Thrust* yang sama disepanjang *disk* atau rotor area;
- e. Tekanan statis pada *upstream* dan *downstream* rotor sama dengan tekanan ambien.



Gambar 2.12 Model *Actuator Disc* pada TASH (Manwell, 2009)

Gaya netto yang setara dan berlawanan dengan gaya *thrust* (T) dapat dihasilkan melalui penerapan hukum kekekalan momentum pada *control volume* pada seluruh sistem. Gaya *thrust* merupakan gaya angin terhadap turbin. Melalui kekekalan momentum dengan homogenitas aliran, *incompressible*, dan memanfaatkan *time invariant flow* maka akan terbentuk gaya *thrust* (T) yang sama dan berlawanan arah dengan laju perubahan momentum aliran udara ditujukan dalam Persamaan 2.8 (Manwell, 2009):

$$T = U_1(\rho \cdot A)_1 - U_4(\rho \cdot A)_4 \quad (2.8)$$

dengan T = Gaya *Thrust* (N)

U = Kecepatan rata-rata (m/s)

ρ = Massa jenis udara (kg/m^3)

A = *Cross-sectional area* (m^2)

$(\rho AU)_1 = (\rho AU)_4$ = aliran *steady state*, sama dengan \dot{m} yang merupakan laju aliran massa

$$T = \dot{m}(U_1 - U_4) \quad (2.9)$$

Gaya *thrust* yang di dapat menjadi positif sebab kecepatan aliran angin dibelakang turbin (U_4) lebih kecil daripada kecepatan aliran angin bebas di depan turbin (U_1). Persamaan Bernoulli dapat digunakan pada kedua *control volume* pada masing –

masing sisi dari *actuator disc* karena tidak ada kerja yang terjadi pada kedua sisi turbin.

Persamaan pada sisi *upstream* (Manwell, 2009):

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho U_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho U_2^2 \quad (2.10)$$

Sedangkan persamaan pada sisi *downstream* (Manwell, 2009):

$$p_3 + \frac{1}{2}\rho U_3^2 = p_4 + \frac{1}{2}\rho U_4^2 \quad (2.11)$$

Diasumsikan bahwa tekanan di *upstream* dan *downstream* adalah sama ($p_1 = p_4$) dan kecepatan yang melewati *disc* tetap sama ($U_2 = U_3$). Gaya *thrust* juga dapat dinyatakan sebagai jumlah netto gaya-gaya pada setiap sisi *actuator disc* sebagai berikut.

$$T = A_2(p_2 - p_3) \quad (3.12)$$

Jika persamaan 2.11 dan 2.12 disubstitusikan kedalam dua persamaan tersebut maka akan memperoleh persamaan 2.13, sehingga dapat diperoleh persamaan berikut.

$$T = \frac{1}{2}\rho A_2(U_1^2 - U_4^2) \quad (2.13)$$

Mengacu pada persamaan 2.9 dan persamaan 2.13 serta diketahui bahwa *mass flow rate* adalah $\rho A_2 U_2$, maka (Manwell, 2009):

$$U_2 = \frac{U_1 + U_4}{2} \quad (2.14)$$

Sehingga dapat diketahui bahwa kecepatan angin pada rotor turbin angin adalah rata – rata kecepatan angin pada *upstream* dan *downstream*. Dengan menentukan sebagai *axial induction factor* yang merupakan faktor penurunan antara kecepatan angin pada *free stream* dan rotor turbin (Manwell, 2009):

$$\alpha = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (2.15)$$

$$U_2 = U_1(1 - \alpha) \quad (2.16)$$

$$U_4 = U_1(1 - 2\alpha) \quad (2.17)$$

Nilai dari $U_1\alpha$ disebut juga kecepatan induksi pada rotor, dalam hal ini kecepatan angin pada rotor merupakan kombinasi dari kecepatan *free stream* dan kecepatan induksi angin. Ketika *axial induction factor* meningkat dari nol, kecepatan angin dibelakang rotor menjadi lebih lambat. Jika $\alpha = 1/2$, maka kecepatan angin dibelakang rotor akan mendekati nol dan persamaan sederhana diatas tidak dapat lagi digunakan.

Rata – rata daya *output* (Manwell, 2009) :

$$P = \frac{1}{2}\rho A_2(U_1^2 - U_4^2)U_2 = \frac{1}{2}\rho A_2 U_2(U_1 + U_4)(U_1 - U_4) \quad (2.18)$$

Melalui substitusi persamaan U_2 dan U_4 , didapatkan persamaan:

$$P = \rho U^3 4a(1 - a)^2 \quad (2.19)$$

Berdasarkan persamaan diatas dapat dijelaskan bahwa area *control volume* pada rotor adalah A_2 diganti oleh A , rotor, area, dan kecepatan *free stream* U_1 diganti oleh U . Performa dari sebuah rotor turbin angin ditandai oleh *power coefficient* (C_p) (Manwell, 2009).

$$C = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U^3} = \frac{r}{p} \frac{p}{E_{the w}} \quad (2.20)$$

Non-dimensional power coefficient menunjukkan bahwa sebagian energi yang dapat diserap oleh rotor dari daya yang terdapat pada angin. Nilai maksimum C_p didapat melalui penurunan persamaan (2.21) terhadap a dengan menyetarakan nilai yang didapat dengan 0 dengan nilai $a = 1/3$, sehingga diperoleh persamaan (2.22):

$$C = 4a(1 - a)^2 \quad (2.21)$$

$$C = 16/27 = 0,5926 \quad (2.22)$$

Pada kasus diatas, kecepatan aliran udara yang melewati *disk* hanya 2/3 dari kecepatan udara *free stream*. Hasil tersebut menunjukkan rotor yang ideal ialah rotor yang dirancang dan dioperasikan dengan mempertimbangkan kecepatan angin pada rotor adalah 2/3 dibandingkan dengan kecepatan angin *free stream* dan

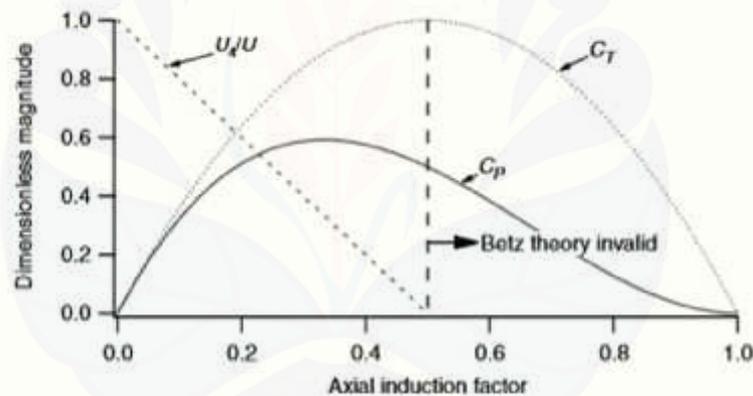
menghasilkan daya dengan efisiensi yang paling optimal. Akan tetapi, dari persamaan (2.13), (2.17), dan (2.21) akan diperoleh gaya *thrust* (Manwell, 2009).

$$T = 1/2 \rho U^2 [4a(1 - a)] \quad (2.23)$$

Seperti halnya *power coefficient*, gaya *thrust* pada turbin angin dapat diekspresikan juga sebagai *non-dimensional*.

$$C = \frac{T}{1/2 \rho U^2} = \frac{Thr}{D} \frac{f}{f} \quad (2.24)$$

Koefisien *thrust* (C) sebuah turbin angin ideal berdasarkan persamaan (2.24) adalah $4(1 - a)$. C_t mencapai nilai maksimum ketika $a = 0,5$ dan menyebabkan kecepatan aliran dibelakang rotor menjadi 0. Kondisi daya *output* maksimum ($a = 1/3$), menghasilkan nilai C_t setara dengan $8/9$.



Gambar 2.13 Parameter Operasional Turbin Betz (Manwell, 2009)

Menurut teori *Betz Limit*, $C_p = 16/27$ ialah batas maksimum yang mungkin terjadi pada turbin angin. Terdapat tiga faktor yang mengakibatkan C_p , yaitu:

- Timbulnya *rotation wake* dibelakang rotor;
- Jumlah bilah yang terbatas dan terjadi *tip losses*;
- Non-zero aerodynamic drag*.

Efisiensi tubin perlu diperhatikan secara menyeluruh merupakan fungsi dari *coefficient of power* (C_p), efisiensi mekanik, dan elektrik pada turbin angin.

$$\eta_o = \frac{P_o}{1/2 \rho U^3} = \eta_m nC \quad (2.25)$$

$$P_o = 1/2 \rho U^3 (\eta_m nC) \quad (2.26)$$

Analisis sebelumnya yang menggunakan teori momentum linier, diasumsikan bahwa rotasi terjadi pada aliran angin. Melalui analisa sebelumnya dapat diperluas untuk kasus pada rotor berputar menghasilkan momentum sudut yang dapat dihubungkan dengan torsi rotor. Aliran balik yang berputar berlawanan arah dengan arah aliran angin terjadi ketika rotor turbin berputar. Model *annular steamtube* dari aliran balik menggambarkan terjadinya *rotation wake* pada rotor turbin angin.

Proses terbentuknya energi kinetik rotasi yang terjadi pada turbin angin ketika terjadi *wake* akan menyerap energi yang lebih kecil dibanding dengan ketikan *wake* tidak terjadi. Jika torsi yang dihasilkan menjadi lebih tinggi, maka proses terbentuknya energi *wake* dibelakang rotor juga akan menjadi lebih tinggi. Maka dari itu, turbin dengan spesifikasi kecepatan rendah (*low rotational speed and high torque*) akan mengalami *wake rotation losses* dibandingkan dengan turbin dengan spesifikasi kecepatan tinggi dan torsi rendah (*high rotation speed and low torque*).

Parameter yang terlibat dalam analisis *wake rotation*, jika diasumsikan bahwa kecepatan angular aliran yang mengalir di dalam *streamtube* () jauh lebih kecil dari kecepatan angular dari rotor turbin angin (). Sehingga, dapat disimpulkan bahwa tekanan udara di *far wake* sama dengan tekanan udara pada *free stream*. Apabila menggunakan *moving control volume* dengan kecepatan angular dari bilah, maka persamaan energi dapat digunakan pada bagian sebelum dan sesudah turbin untuk memperoleh perbedaan tekanan yang melewati *blade*. Aliran udara yang melewati *disc* kecepatan angular dari udara relatif terhadap kecepatan angular *blade* meningkat dari menjadi + , sedangkan komponen aksial dari angin tetap konstan (Manwell, 2009).

$$P_2 - P_3 = \rho(\Omega + 1/2 \omega)\omega r^2 \quad (2.27)$$

Sehingga, *thrust* yang dihasilkan pada *annular element* (dT) didapat sebagai berikut.

$$d = (p_2 - p_3)d = [\rho(\Omega + 1/2 \omega)\omega r^2]2\pi \quad (2.28)$$

Dan, faktor induksi angular bisa didefinisikan sebagai berikut.

$$a = \omega/2\Omega \quad (2.29)$$

Perhatikan ketika *wake rotation* diikuti sertakan ke dalam perhitungan analisis, induksi kecepatan pada rotor tidak hanya terdiri dari komponen induksi aksial saja (U), melainkan juga terdapat komponen pada *rotor plane* (r). Sehingga diperoleh persamaan:

$$d = 4a(1 + a)\left[\frac{1}{2}\rho\Omega^2 r^2\right]2\pi \quad (2.30)$$

Berdasarkan analisis momentum linier sebelumnya, gaya *thrust* pada *annular cross-section* bisa ditentukan melalui persamaan berikut yang menggunakan faktor induksi aksial.

$$d = 4a(1 - a)\left[\frac{1}{2}\rho U^2\right]2\pi \quad (2.31)$$

Dimana $U = U_1$ yaitu kecepatan angin *free stream*. Dan apabila persamaan 2.24 dan 2.25 disubstitusikan, maka didapatkan *thrust* sebagai berikut.

$$\frac{a(1-a)}{a(1+a)} = \frac{\Omega^2 r^2}{U^2} = \lambda_r^2 \quad (2.32)$$

Dimana λ_r adalah *local speed ratio*. Persamaan diatas digunakan pada perhitungan dibawah. *Tip speed ration* (TSR) didefinisikan sabagai ratio kecepatan *blade tip* terhadap kecepatan angin *free stream*.

$$\lambda = \Omega r / U \quad (2.33)$$

Dengan diketahuinya nilai λ maka dapat ditarik garis lurus untuk memperoleh nilai C_p yang optimum. Kemudian, agar meperoleh persamaan torsi pada rotor dapat menggunakan penerapan hukum kekekalan momentum sudut. Pada kondisi tersebut,

torsi yang bekerja pada rotor (Q) harus sama dengan perubahan momentum sudut *wake*.

$$d = d(\omega) = \rho U_2 2\pi (\omega)(r) \quad (2.34)$$

Karena $U_2 = U(1 - a)$ dan $\omega = \Omega r / 2$, maka persamaan diatas menjadi:

$$d = 4a(1 - a)^{\frac{1}{2}} \rho \Omega r^2 2\pi \quad (2.35)$$

Sehingga daya yang dihasilkan dari setiap elemen adalah sebagai berikut.

$$d = \Omega d \quad (2.36)$$

$$d = \frac{1}{2} \rho U^3 \left[\frac{a}{\lambda^2} (1 - a) \lambda_r^3 d\lambda_r \right] \quad (2.37)$$

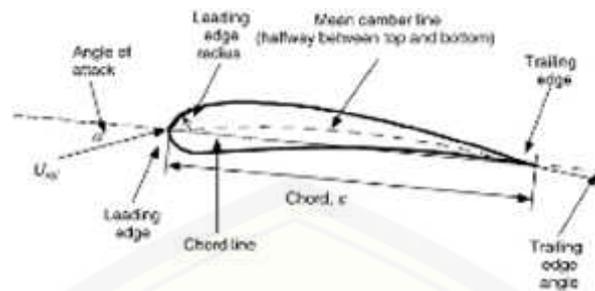
Melalui persamaan tersebut, dapat dilihat bahwa daya dari setiap *annular ring* adalah fungsi dari *axial induction factor*, *angular induction*, dan *tip speed ratio*. Faktor tersebut menentukan besar dan arah aliran udara pada *rotor plane*. *Local speed ratio* merupakan fungsi dari *tip speed ratio* dan radius.

$$d = \frac{a}{1/2 \rho U^3} \quad (2.38)$$

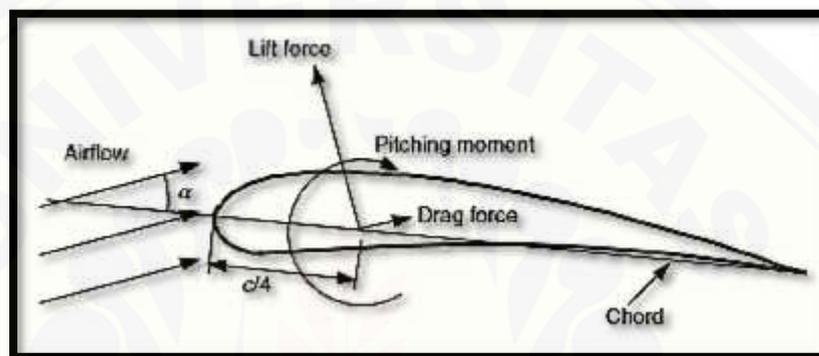
2.5 Airfoil

2.5.1 Definisi Airfoil

Airfoil adalah struktur dengan bentuk geometri yang khusus dan digunakan untuk menghasilkan *mechanical force* dikarenakan gerak relatif *airfoil* terhadap fluida disekitarnya. *Airfoil* digunakan pada turbin angin untuk menghasilkan *mechanical power*. Panjang dan lebar *airfoil* disesuaikan dengan performa turbin yang diinginkan dengan melakukan perhitungan terhadap parameter performa turbin. Terminologi *airfoil* dijelaskan pada Gambar 2.14.



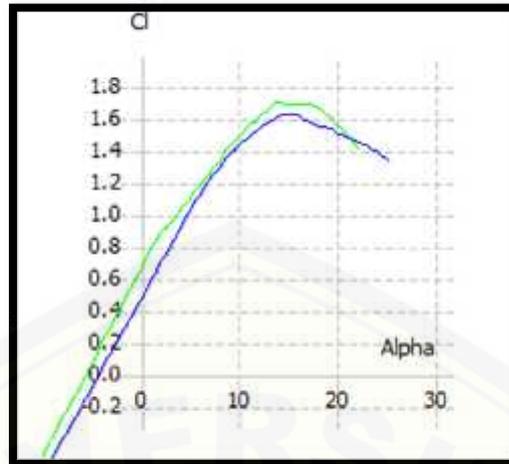
Gambar 2.14 *Airfoil Nomenclature* (Manwell, 2009)



Gambar 2.15 Gaya dan momen yang bekerja pada penampang *airfoil* (Manwell, 2009)

Lift force dan *drag force* yang terjadi pada penampang *airfoil* akan membentuk satu gaya resultan. Gaya tersebut bekerja pada jarak $c/4$ dari *leading edge* yang sering disebut sebagai posisi *quarter chord*. Selain kedua gaya tersebut terdapat juga sebuah momen yang juga bekerja pada posisi yang sama. Gambar 2.15 menjelaskan gaya dan momen yang bekerja pada penampang *airfoil*.

Lift force adalah gaya yang tegak lurus terhadap arah aliran udara. *Lift force* terjadi disebabkan oleh adanya perbedaan tekanan pada bagian atas *airfoil* dan bagian bawah *airfoil*. *Lift force* dipengaruhi oleh *alpha* yang merupakan salah satu parameter yang bisa dijadikan acuan dalam melakukan desain atau perancangan turbin. Pengaruh *alpha* tunjukkan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Pengaruh Alfa terhadap C_l pada *airfoil* (QBlade, 2019)

Drag force adalah gaya yang searah dengan arah aliran udara yang melalui penampang *airfoil*. *Drag force* terjadi karena adanya gesekan antara udara dengan permukaan *airfoil* serta adanya distribusi tekanan yang tidak merata pada bagian *airfoil*.

Pitching moment adalah momen yang terjadi pada *airfoil* dan juga bekerja pada posisi *quarter chord*.

Berdasarkan beberapa penelitian tentang aliran fluida yang telah dilakukan sebelumnya menunjukkan bahwa masalah masalah aliran fluida bisa di diekspresikan dengan *non-dimensional parameter*. Parameter *Reynold number* (R) merupakan parameter paling penting untuk menentukan sifat – sifat aliran udara. Persamaan 2.39 menjelaskan Re (Tong, 2010):

$$R = \frac{U}{\nu} = \frac{\rho}{\mu} = \frac{r}{V} \frac{f}{f} \quad (2.39)$$

Koefisien *non-dimensional force* dan *moment* juga merupakan fungsi dari *Reynold number*. Hal ini bisa di definisikan pada objek 2 dimensi atau 3 dimensi dengan mengacu pada hasil pengujian menggunakan *wind tunnel*. *Airfoil* 3 dimensi memiliki rentang yang terbatas. Selain itu koefisien gaya dan momen dipengaruhi oleh aliran pada bagian belakang *airfoil*. Sedangkan *airfoil* 2 dimensi diasumsikan memiliki rentang yang tidak terbatas. Dalam mendesain rotor turbin angin biasanya

digunakan data *airfoil* 2 dimensi dengan tujuan untuk menentukan *angle of attack* dan *Reynold number* pada pengujian menggunakan *wind tunnel*. Koefisien *lift* pada *airfoil* 2 dimensi dapat didefinisikan pada Persamaan (2.40) (Corten, 2001).

$$C_L = \frac{L/l}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} = \frac{L}{Dl} \frac{f}{f} \frac{/u}{/u} \frac{li}{li} \frac{n}{n} \quad (2.40)$$

Kemudian koefisien *drag* pada *airfoil* 2 dimensi didefinisikan pada Persamaan (2.41) (Corten, 2001):

$$C_D = \frac{D/l}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} = \frac{D}{Dl} \frac{fo}{f} \frac{/u}{/u} \frac{li}{li} \frac{n}{n} \quad (2.41)$$

Kemudian koefisien *pitching moment* diekspresikan dalam Persamaan (2.42) (Corten, 2001):

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} = \frac{P}{Dl} \frac{ni}{f} \frac{m}{/u} \frac{li}{li} \frac{g}{g} \frac{n}{n} \quad (2.42)$$

Dimana ρ adalah densitas udara, U adalah kecepatan aliran *free stream*, A adalah area *airfoil* yang telah diproyeksikan ($c \times l$), c adalah *chord*, dan l adalah *airfoil span*.

Koefisien penting lainnya yang dapat digunakan untuk melakukan analisa pada sebuah turbin angin adalah koefisien tekanan yang didefinisikan sebagai berikut.

$$C_P = \frac{p-p_{\infty}}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} = \frac{S}{Dl} \frac{p}{p} \quad (2.43)$$

Untuk menganalisa aliran udara pada *airfoil*, digunakan *surface roughness ratio* yang definisikan sebagai berikut.

$$\frac{\varepsilon}{L} = \frac{S}{B} \frac{r}{li} \frac{nn}{li} \frac{ne}{n} \frac{nt}{n} \quad (2.44)$$

2.5.2 Airfoil NACA

Airfoil NACA adalah bentuk *airfoil* sayap pesawat udara yang dikembangkan oleh *National Advisory Committee for Aeronautics* (NACA).

Sampai sekitar Perang Dunia II, airfoil yang banyak digunakan adalah hasil riset Gottingen. Selama ini pengujian *airfoil* telah dilakukan diberbagai negara, namun hasil riset NACA menjadi yang paling terkemuka. Pengujian yang dilakukan NACA lebih sistematis dengan membagi pengaruh efek kelengkungan dan distribusi ketebalan serta pengujiannya dilakukan pada bilangan *Reynold* yang lebih tinggi dibanding yang lain.

Konstruksi Geometri *Airfoil* NACA yang saat ini umum digunakan sangat dipengaruhi oleh hasil penelitian yang dilakukan oleh NACA. Dan berikut adalah klasifikasi jenis-jenis *airfoil* NACA :

a. NACA Seri 4 Digit

Pada *airfoil* NACA seri empat, digit pertama menyatakan persen maksimum *chamber* terhadap *chord*. Digit kedua menyatakan persepuluh posisi maksimum *chamber* pada *chord* dari *leading edge*. Sedangkan dua digit terakhir menyatakan persen ketebalan *airfoil* terhadap *chord*. Contoh : *airfoil* NACA 4712 memiliki maksimum *chamber* 0.04 terletak pada 0.68c dari *leading edge* dan memiliki ketebalan maksimum 12% *chord* atau 0.12c.

b. NACA Seri 5 Digit

Jika dibandingkan ketebalan dan *chamber*, seri ini memiliki nilai *Cl* maksimum 0.1 hingga 0.2 lebih tinggi dibanding seri empat digit. Sistem penomoran seri lima digit ini berbeda dengan seri empat digit. Pada seri ini, digit pertama dikalikan $\frac{3}{2}$ kemudian dibagi sepuluh memberikan nilai desain koefisien *lift*. Setengah dari dua digit berikutnya merupakan persen posisi maksimum *chamber* terhadap *chord*. Dua digit terakhir merupakan persen ketebalan terhadap *chord*. Contohnya, *airfoil* NACA 23012 memiliki *Cl* desain 0.3, posisi maksimum *chamber* pada 15% *chord* dari *leading edge* dan ketebalan sebesar 12% *chord*.

2.6 Teori Momentum dan Teori *Blade Element*

Perhitungan kinerja dan bentuk sudu aerodinamis yang efektif sangat perlu dilakukan sebelum membuat bentuk nyata dari sudu turbin angin. Analisis yang dilakukan berdasarkan teori teori yang telah dijabarkan pada sub bab sebelumnya.

Sebuah rotor turbin angin tersusun atas beberapa jenis *airfoil* yang menghasilkan gaya angkat berdasarkan perbedaan tekanan pada kedua sisi *airfoil*. Geometri dari sebuah rotor dan karakteristik dari sebuah *airfoil* akan digunakan untuk menentukan bentuk dari sebuah sudu turbin angin.

Analisis perhitungan akan menggunakan *momentum theory* dan *blade element theory*. *Momentum theory* mengacu pada analisis *control volume* pada sudu. Sedangkan *blade element theory* mengacu pada analisis gaya - gaya pada bagian sudu, sebagai fungsi untuk menentukan geometri dari sudu. Hasil pendekatan dari kedua teori diatas bila dikombinasikan akan menjadi *Blade Element Momentum* (BEM). Teori ini bisa digunakan untuk menghubungkan bentuk geometri bilah dengan kemampuan rotor turbin angin mengekstraksi energi angin.

2.6.1 Teori Momentum

Gaya yang berkerja pada sudu turbin angin dan kondisi aliran pada blade dapat diturunkan dengan mempertimbangkan hukum kekekalan momentum karena gaya tersebut merupakan laju perubahan momentum. Pada analisis ini *axial induction factor* diasumsikan sebagai fungsi dari radius, r . Dengan menerapkan hukum kekekalan momentum linear pada *control volume* dengan jari - jari, r , dan ketebalan dr , maka diperoleh persamaan sebagai berikut (Manwell, 2009).

$$dT = \rho U^2 4a(1-a)\pi r dr \quad (2.45)$$

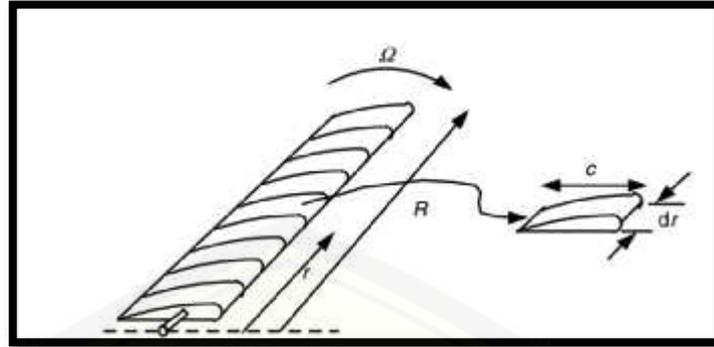
dan

$$dQ = 4a^2(1-a)\rho U \Omega r^3 \pi dr \quad (2.46)$$

Teori momentum dapat menghasilkan persamaan (2.45) dan (2.46) yang menentukan besarnya *thrust* dan torsi sebagai fungsi dari angular *induction factor* dan *axial induction factor*.

2.6.2 Teori Blade Element

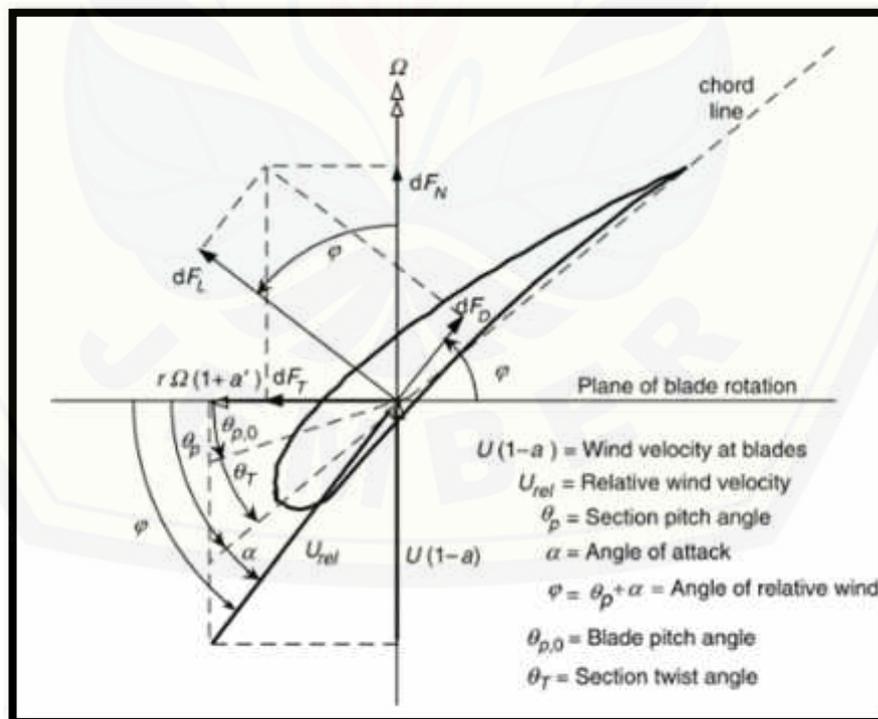
Gaya pada turbin angin dapat diekpresikan juga sebagai fungsi dari *lift* dan *drag coefficient* serta sudut serang. Pada analisa ini, bilah dibagi menjadi n elemen.



Gambar 2.17 Skema Bilah dengan n Elemen (Manwell, 2009)

Kecepatan angin relatif adalah jumlah vektor dari kecepatan rotor dan kecepatan angin yang mengenai rotor. Komponen rotasi adalah jumlah vektor dari kecepatan angin pada jari – jari parsial bilah dan kecepatan sudut yang terinduksi pada bilah dari hukum kekekalan momentum.

$$\Omega r + (\omega/2) r = \Omega r + \Omega a' r = \Omega r(1 + a') \tag{2.47}$$



Gambar 2.18 Geometri Bilah Turbin Angin Sumbu Horizontal (Manwell, 2009)

Dari Gambar 2.18, dapat ditentukan persamaan berikut:

$$\theta_T = \theta_p - \theta_{p,0} \quad (2.48)$$

$$\varphi = \theta_p + \alpha \quad (2.49)$$

$$\tan \varphi = \frac{U(1-a)}{\Omega r(1+a)} = \frac{(1-a)}{(1+a)\lambda r} \quad (2.50)$$

$$U_{rel} = U(1-a)/\sin \varphi \quad (2.51)$$

$$dFL = C_L \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr \quad (2.52)$$

$$dFD = C_D \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr \quad (2.53)$$

$$dFN = dFL \cos \varphi + dFD \sin \varphi \quad (2.54)$$

$$dFT = dFL \sin \varphi - dFD \cos \varphi \quad (2.55)$$

Jika pada rotor terdapat B bilah, total gaya normal dan torsi pada bagian yang memiliki jarak r dari pusat sumbu rotasi adalah (Manwell, 2009):

$$dFN = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi) c dr \quad (2.56)$$

$$dQ = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) c r dr \quad (2.57)$$

2.7 Computational Fluid Dynamics

2.7.1 Persamaan Kontinuitas

Persamaan aliran fluida merupakan turunan dari persamaan yang menyatakan hubungan timbal balik antara variabel aliran dan evolusinya dalam ruang dan waktu. Persamaan tersebut dilengkapi dengan hubungan algebra seperti persamaan pada keadaan *compressible flow*. Persamaan diferensiasi berikut merupakan persamaan distribus temperatur $T(x,t)$ dalam pipa sebagai fungsi pipa aksial koordinat x , yaitu:

$$\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} - \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (2.58)$$

dengan:

u = kecepatan aliran yang diasumsikan konstan diseluruh pipa (m/s)

t = waktu (s)

= *thermal diffusivity*

Persamaan diatas terdiri dari tiga bagian, dimana persamaan pertama adalah turunan waktu yang menunjukkan temperatur gradien dengan waktu dan persamaan kedua disebut sebagai *advection term* yang menimbulkan perubahan temperatur dengan aliran tanpa adanya distorsi. Sedangkan persamaan ketiga disebut *diffusion term* yang bertanggung jawab untuk penyebaran gangguan di semua area. Apabila *diffusivity* diabaikan, maka persamaan diatas menjadi:

$$\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} = 0 \quad (2.59)$$

Gangguan suhu yang memasuki pipa dari kiri pada waktu $t = 0$ akan dikonvensikan tanpa distorsi setelah beberapa waktu kemudian menjadi grafik di kanan jika kecepatan aliran = 0, sehingga persamaan menjadi:

$$\frac{\partial}{\partial t} - \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (2.60)$$

Kesederhanaan dari sistem ini berupa mudahnya interpretasi berbagi kondisi pada persamaan 2.58 linear karena diasumsikan kecepatan konstan dan tidak tergantung terhadap suhu. Maka dari itu, hanya terdapat satu variabel yang mempengaruhi yakni temperatur.

Sebuah sistem yang terdapat di dalamnya mungkin memiliki kondisi *nonlinear convective* yang ditunjukkan oleh Persamaan (2.61):

$$\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} - \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (2.61)$$

Persamaan 2.61 tersebut mewakili perubahan perpindahan momentum sepanjang pipa. Selain itu, kecepatan merupakan variabel yang mempengaruhi dan tidak didefinisikan konstan. Ketidaklinearan muncul pada kondisi *convective*, yang mana kecepatan sebagai variabel yang dicari akan dipengaruhi oleh perubahan kecepatan itu sendiri.

2.7.2 Persamaan Navier Stoke

Persamaan *Navier stoke* dan persamaan *continuity* adalah persamaan dasar yang digunakan untuk mendesain aliran dari suatu fluida. Hukum pergerakan benda dapat diterapkan pada semua cairan dan gas. Meskipun begitu, terdapat perbedaan mendasar antara keduanya berupa fluida terdistorsi tanpa batasan. Analisis terhadap suatu fluida dibutuhkan untuk mengetahui jumlah dari distorsi yang terjadi dan masih banyak lagi.

Partikel pada fluida memberikan respon terhadap gaya yang bekerja terhadapnya, begitu juga dengan partikel padatan. Jika suatu gaya diberikan kepada suatu partikel, percepatan akan terjadi sesuai dengan yang dinyatakan dalam hukum newton II. Dimana, hukum newton II menyatakan bahwa laju perubahan momentum suatu benda sama dengan jumlah gaya yang bekerja padanya dan searah dengan arah gaya tersebut. Hal ini bermanfaat untuk menentukan gaya – gaya yang dapat diterima oleh partikel fluida, misalnya:

1. Gaya gravitasi dan gaya elektromagnetik;
2. Gaya yang diakibatkan oleh tekanan;
3. Gaya yang diakibatkan oleh tingkat kekentalan fluida;
4. Dan gaya yang diakibatkan oleh perputaran.

Navier (1823) menurunkan persamaan pergerakan fluida viscous dalam bentuk yang berbeda dan persamaan dasar yang menentukan aliran fluida dengan cara mendefinisikan laju pergeseran pada suatu fluida berbanding lurus dengan tegangan geser yang terjadi serta aliran fluida laminar dikenal sebagai *Navier Stoke equation of motion*. Turunan tersebut juga dapat digunakan untuk aliran turbulen dengan beberapa modifikasi.

2.7.3 Compressible Flow

Persamaan *continuity equation* dan *navier stoke equation* adalah persamaan umum yang digunakan untuk menentukan aliran. Persamaan tersebut berupa.

Persamaan Kontinuitas:

$$-\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho)}{\partial t} \quad (2.62)$$

Persamaan Navier Stokes:

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \right) = -\frac{\partial}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + F_x \quad (2.63)$$

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \right) = -\frac{\partial}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + F_y$$

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \right) = -\frac{\partial}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + F_z$$

Persamaan Energi:

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \right) = \Phi + \frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{\partial}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k \frac{\partial}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial}{\partial z} \right] + \left(u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (2.64)$$

Dimana Φ adalah fungsi disipasi dengan persamaan:

$$\Phi = 2\mu \left[\left(\frac{\partial}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial z} \right)^2 + 0,5 \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \right)^2 + 0,5 \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \right)^2 + 0,5 \left(\frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \right)^2 \quad (2.65)$$

Continuity equation menggambarkan bahwa zat yang bersifat kekal dalam aliran. Berdasarkan satuan volume, jumlah massa yang mengalir masuk dan keluar per waktu harus sama dengan perubahan massa akibat perubahan massa jenis per satuan waktu. *Continuity equation* diterapkan pada semua fluida, baik secara *compressible flow* maupun *incompressible flow*, baik dalam newtonian atau non-newtonia. Hukum kekekalan massa dalam setiap kondisi terjadi dalam daerah aliran ditunjukkan dalam aplikasi *continuity equation* tersebut.

Persamaan 2.62-2.65 menunjukkan rumusan sebelah kiri disebut sebagai persamaan inersia yang didapatkan dari perubahan momentum. Hal tersebut dilawan dengan *pressure gradient*, gaya *viscous* selalu memperlambat aliran dan jika ada body force. Pengukuran suatu perubahan kecepatan suatu elemen fluida dalam pergerakannya dalam suatu ruang diberikan persamaan inersia. Rumusan

$\frac{\partial}{\partial t}$ memberi variasi kecepatan dalam suatu kondisi konstan dan dikenal sebagai turunan parsial. Ketiga rumusan lain dalam rumusan inersia dikelompokkan dan dikenal dengan *convective term* atau *convective differential*.

Viskositas dan *specific heat* memiliki nilai konstan, maka sistem persamaan di atas terdiri dari 6 konstanta yang tidak diketahui. Hanya dengan 5 persamaan, persamaan selanjutnya digunakan untuk memenuhi sistem yang ada. Biasanya tersedia persamaan pokok mengenai tekanan. Contoh, hubungan antara temperatur dan tekanan gas ideal dinyatakan dalam persamaan $p = RT$, dimana R merupakan konstanta gas ideal.

2.7.4 Incompressible Flow

Persamaan di atas dapat disederhanakan jika nilai density dianggap konstan. Apabila temperatur juga dianggap konstan, maka persamaan di atas dapat disederhanakan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} &= 0 \\ \rho \left(\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (2.66)$$

Incompressible flow dengan variasi temperatur, *energy equation* perlu diselesaikan meskipun akan berdampak pada *continuity equation* dan *momentum equation* diabaikan.

2.7.5 Persamaan Momentum

Hukum Newton I menyatakan bahwa suatu benda akan tetap diam dan akan tetap bergerak dengan kecepatan yang sama dan arah yang tetap apabila tidak ada gaya yang bekerja pada benda tersebut atau gaya sama dengan 0. Hukum Newton I tersebut berhubungan dengan pergerakan dari suatu body dan gaya yang bekerja pada body tersebut. Hukum Newton II menyatakan bahwa percepatan pada suatu

benda proporsional dengan jumlah gaya yang berkerja pada benda tersebut dan berbanding terbalik dengan massa yang dimiliki oleh benda itu sendiri.

$$F = m \times a = m \frac{d}{dt} v = \frac{d(mv)}{dt} \quad (2.67)$$

Hasil perkalian massa dan kecepatan yang terdapat dalam suatu body disebut sebagai momentum atau linear momentum. Melalui persamaan di atas, hukum Newton II dapat dinyatakan menjadi perubahan momentum dari suatu body sebanding atau sama dengan total gaya yang bekerja pada body tersebut. Momentum dari suatu sistem akan tetap konstan jika total gaya yang bekerja pada sistem tersebut akan tetap terjaga. Prinsip ini disebut dengan *conservation of momentum principle*.

Hukum newton untuk rigid body yang berotasi dinyatakan dengan $M = I \alpha$ dimana M merupakan total momen atau torsi yang terdapat pada body. I merupakan momen inersia dari body tentang sumbu rotasi serta α adalah percepatan angular. Persamaan (2.68) juga dapat dinyatakan dalam bentuk perubahan momentum angular $\frac{dL}{dt}$.

$$M = I \alpha = I \frac{d\omega}{dt} = \frac{d(I\omega)}{dt} = \frac{dL}{dt} \quad (2.68)$$

Total momentum angular suatu body yang berotasi akan tetap konstan jika total torsi yang bekerja pada body tersebut sama dengan 0. Sehingga momentum angular sistem akan terjaga. Hal ini dikenal sebagai *conservation of angular momentum principle*.

Hukum newton III menyatakan bahwa apabila suatu gaya diberikan pada body pertama kemudian mendesak body kedua, maka body kedua akan mendesak body pertama dengan gaya yang sama besar namun dengan arah yang berlawanan.

2.7.6 Fundamental Laminar dan Turbulen

Perubahan aliran *laminar* yang menjadi kacau di dalam sebuah pipa terjadi akibat kecepatan aliran dalam pipa tersebut mencapai nilai tertentu. Oleh sebab itu, didapatkan Persamaan (2.69):

$$R = \frac{\rho}{\mu} \quad (2.69)$$

dengan:

U = kecepatan rata – rata dalam pipa (m/s)

D = diameter dalam pipa (m)

Reynold number (Re) melambangkan perbandingan antara gaya inersia dan gaya *viscous*. Re akan mempengaruhi struktur aliran, dimana jika nilai Re rendah maka akan terbantu aliran yang teratur (*streamline*) dan jika nilai Re meningkat pada titik tertentu maka struktur aliran yang teratur akan berubah menjadi acak. Umumnya efek *viscous* dan turbulensi terjadi di daerah yang berdekatan dengan *solid boundary* yang biasa disebut *boundary layer*. Aliran tertutup dalam pipa, *boundary layer* berkembang dari *inlet* pipa hingga sepanjang pipa. Sedangkan pada aliran eksternal, *boundary layer* terbatas pada daerah sempit yang dekat dengan dinding. Sementara, pada daerah yang jauh dari dinding, efek *viscous* dapat diabaikan dan aliran di daerah itu disebut aliran *invisid*.

Aliran *laminar* adalah aliran yang terjadi ketika belum mencapai batas *plate*. Setelah aliran mencapai batas *plate*, aliran laminar akan berubah menjadi aliran turbulen. Hal ini ditandai dengan terbentuknya *boundary layer*. Ketika berada di daerah *inlet*, nilai inersia lebih kecil dibanding dengan gaya *viscous* dan nilai Re masih kecil. Kemudian, jika aliran mulai memasuki pipa, nilai Re akan meningkat dan gaya *viscous* menjadi rendah serta nilai inersia semakin besar. Perubahan ini akan mempengaruhi ketidakstabilan pada *boundary layer*, yang mana daerah ini disebut daerah transisi. Daerah transisi terjadi percampuran antara aliran *laminar* dan turbulen dan daerah ini akan tetap ada sebelum seluruh aliran berubah menjadi aliran turbulen. Pada bagian bawah *boundary layer turbulent* terdapat daerah dekat dengan dinding yang masih bersifat *laminar* disebut daerah *sublayer*.

Aliran yang terjadi dalam kehidupan sehari – hari merupakan aliran turbulen yang disebabkan oleh kesulitan dalam menjaga aliran untuk tetap menjadi aliran *luminar*. Meskipun begitu, sifat turbulen aliran lebih dibutuhkan seperti untuk

melakukan pencampuran fluida. Aliran turbulen memiliki kecepatan aliran yang tidak konstan. Untuk memudahkan perhitungan terhadap aliran tersebut, digunakan nilai rata-rata kecepatan aliran turbulen. Pada persamaan *two dimensional steady incompressible flow* dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} &= 0 \\ \rho \left(u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ \rho \left(u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right)\end{aligned}\quad (2.70)$$

Pada persamaan *Reynold-averaged* yang menggunakan kecepatan rata-rata dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} &= 0 \\ \rho \left(u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \rho u'u' \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} - \rho u'v' \right) \\ \rho \left(u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} - \rho u'v' \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \rho v'v' \right)\end{aligned}\quad (2.71)$$

Kedua persamaan diatas hampir sama tetapi memiliki dua perbedaan. Perbedaannya adalah semua nilai yang bersifat *instantaneous* diganti dengan nilai *timeaveraged* masing – masing. Kemudian, perbedaan kedua muncul nilai baru yaitu: $-\rho u'u'$, $-\rho u'v'$, dan $-\rho v'v'$. Ketiga nilai baru tersebut bersifat seperti tegangan, dimana 2 nilai pertama adalah normal stres dan nilai terakhir adalah *shear stress*. Ketiga nilai tersebut mewakili kecepatan aliran turbulen yang fluktuatif yang dibiaya disebut *Reynold-stresses*.

Penggunaan *Computational Fluid Dynamic (CFD)* biasanya menggunakan pendekatan untuk mendesain kasus aliran turbulen. Pada pendekatan pertama disebut *second moment closure*, dan pada pendekatan kedua disebut *eddy-viscosity* atau *turbulent viscosity*. Pendekatan kedua merupakan pendekatan yang lebih populer digunakan. Dimana, pendekatan ini dihipotesakan bahwa *Reynold stresses* bersifat seperti *viscous term* dan *turbulent viscosity* diperkenalkan.

$$-\rho u' u' = \mu_t \frac{\partial}{\partial x}, -\rho v' v' = \mu_t \frac{\partial}{\partial y}, -\rho u' v' = \mu_t \frac{\partial}{\partial z} = \mu_t \frac{\partial}{\partial z} \quad (2.72)$$

Jika ketiga persamaan tersebut disubstitusikan ke dalam persamaan *momentum Reynold-averaged*, akan didapatkan persamaan:

$$\rho \left(u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.73)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

Persamaan diatas hampir serupa dengan persamaan momentum asli dengan pengecualian *viscosity* diubah oleh jumlah *viscosity* dan *turbulent viscosity*.

2.7.7 Inviscid Flow

Daerah aliran inviscid merupakan daerah aliran yang jauh dari dinding sehingga efek *viscous* dari aliran dapat diabaikan. Hal ini dapat dinyatakan dengan persamaan *viscous* yang sangat kecil jika dibanding dengan *derivate* waktu dan adveksi persamaan momentum. Dalam kasus ini memungkinkan memperoleh penjelasan aliran yang baik dengan menghilangkan persamaan *viscous*.

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.74)$$

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} \quad (2.75)$$

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad (2.76)$$

2.8 QBlade

QBlade merupakan perangkat lunak yang di desain khusus untuk melakukan analisa pada turbin angin dengan menggunakan metode *Blade Element Momentum*. QBlade di rancang oleh David Martin dan terus dikembangkan di Berlin Institute of Technology (TU Berlin). Perangkat lunak ini merupakan perangkat lunak yang terdistribusi berdasarkan pada GNU *General Public License* dan merupakan perangkat lunak yang *open-source*. (Marten, dkk., 2008)



Gambar 2.19 *Copy Right* Perangkat Lunak QBlade

2.8 Hipotesis

Hipotesis yang dapat diambil dari penelitian ini adalah bilah turbin angin sumbu horizontal dengan *airfoil* NACA 4712 dapat menghasilkan nilai *coefficient of performance* (C_p) yang lebih baik dari pada *airfoil* NACA 4412 pada kondisi *Tip Speed Ratio* (TSR) dan *angle of attack* () yang tepat akan sehingga menghasilkan nilai *coefficient of performance* (C_p) dan *daya output* (P) yang paling baik.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan dengan mengambil lokasi di wilayah Pantai Pancer, Kecamatan Puger, Kabupaten Jember, Provinsi Jawa Timur. Metode simulasi digunakan untuk melakukan pendekatan secara komputasi terhadap kondisi riil yang ada dilapangan. Data parameter – parameter lingkungan yang bekerja pada sebuah turbin angin akan dikumpulkan dan selanjutnya diolah, diharapkan mampu menghasilkan data potensi pembangkitan energi angin menjadi energi listrik yang dapat diperoleh dari sebuah turbin angin tipe horizontal di wilayah Pantai Puger. Penelitian ini menggunakan kombinasi beberapa perangkat lunak untuk melakukan simulasi antara lain:

a. *Inventor 2015*;

Digunakan untuk menginterpretasikan hasil perhitungan nilai geometri bilah turbin dalam bentuk gambar tiga dimensi (3D).

b. *QBlade v0.96*;

Digunakan untuk melakukan simulasi BEM pada rotor turbin yang telah dibuat.

c. *Microsoft Excel 2016*.

Digunakan untuk melakukan perhitungan geometri bilah rotor turbin angin.

3.2

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan untuk melakukan penelitian ini antara lain sebagai berikut.

3.3.1 Alat

- a. 1 Unit Komputer Desktop WorkStation

Spesifikasi sistem komputer yang digunakan untuk melakukan simulasi ditunjukkan pada Gambar (3.1), sedangkan spesifikasi display komputer tersebut ditunjukkan pada Gambar (3.2).

```

-----
System Information
Time of this report: 5/26/2019, 18:37:24
Machine name: PROTECTIGNITER
Machine Id: {5F2E088E-FF34-4999-AE46-327C1C59900}
Operating System: Windows 10 Enterprise 64-bit (10.0, Build 17763) (17763.rs5_release.180914-1434)
Language: English (Regional Setting: English)
System Manufacturer: Acer
System Model: Aspire 4736
BIOS: InsydeH2O Version V2.08 (type: BIOS)
Processor: Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU P7570 @ 2.00GHz (2 CPUs), ~2.0GHz
Memory: 3872MB RAM
Available OS Memory: 3070MB RAM
Page File: 3236MB used, 4868MB available
Windows Dir: C:\WINDOWS
DirectX Version: DirectX 12
DX Setup Parameters: Not found
User DPI Setting: 96 DPI (100 percent)
System DPI Setting: 96 DPI (100 percent)
DWM DPI Scaling: Disabled
Miracast: Not Available
Microsoft Graphics Hybrid: Not Supported
Uxdiag Version: 10.00.17763.0001 64bit Unicode

```

Gambar 3.1 Spesifikasi Sistem Komputer Untuk Penelitian

```

-----
Display Devices
Card name: NVIDIA GeForce G 105M
Manufacturer: NVIDIA
Chip type: GeForce G 105M
DAC type: Integrated RAMDAC
Device Type: Full Device (POST)
Device Key: Enum\PCI\VEN_10DEDEV_06ECSRUBSYS_026010258REV_A1
Device Status: 01882804 [DN_DRIVER_LOADED|DN_STARTED|DN_DISABLEABLE|DN_NT_ENUMERATOR|DN_NT_DRIVER]
Device Problem Code: No Problem
Driver Problem Code: Unknown
Display Memory: 2036 MB
Dedicated Memory: 491 MB
Shared Memory: 1534 MB
Current Mode: 1366 x 768 (32 bit) (60Hz)
HDR Support: Not Supported
Display Topology: Internal
Display Color Space: DXGI_COLOR_SPACE_RGB_FULL_G22_NONE_P709
Color Primaries: Red(0.589844,0.338844), Green(0.330078,0.548839), Blue(0.155275,0.134766), White Point(0.313477,0.329182)
Display Luminance: Min Luminance = 0.500000, Max Luminance = 270.000000, MaxFullFrameLuminance = 270.000000
Monitor Name: Generic PnP Monitor
Monitor Model: unknown
Monitor Id: SEC3H50
Native Mode: 1366 x 768(p) (59.98Hz)
Output Type: Internal
Monitor Capabilities: HDR Not Supported
Display Pixel Format: DISPLAYCONFIG_PIXELFORMAT_32BPP
Advanced Color: Not Supported
Driver Name: nv3dumx.dll,nvvgf2umx.dll,nvvgf2umx.dll
Driver File Version: 21.21.0013.4201 (English)
Driver Version: 21.21.13.4201
DDI Version: 11.1
Feature Levels: 10_0_9_3_0_2_0_1
Driver Model: WDDM 1.2
Graphics Preemption: DPA

```

Gambar 3.2 Spesifikasi *Display* Komputer

b. Anemometer Digital

Anemometer digital digunakan untuk mengukur kecepatan angin sesaat yang terjadi serta juga untuk melakukan kalibrasi pada anemometer yang dipasang pada *data logger*.



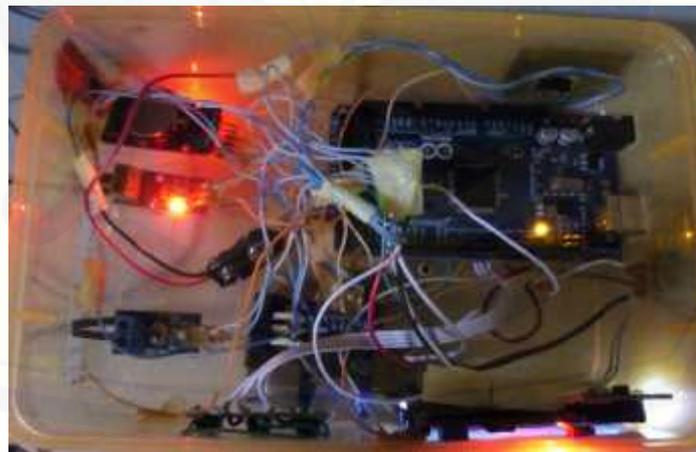
Gambar 3.3 Anemometer Digital

c. Data Logger

Data logger digunakan untuk merekam kecepatan angin, temperatur udara dan kelembaban udara. Penelitian ini hanya menggunakan data kecepatan angin. Data akan disimpan setiap satu detik dalam memori penyimpanan.



(a)



(b)

(a) tampak depan, (b) tampak atas.

Gambar 3.4 Data Logger

3.3.2 Perangkat Lunak

a. *Inventor 2015*;

Digunakan untuk menginterpretasikan hasil perhitungan nilai geometri bilah turbin dalam bentuk gambar tiga dimensi (3D).

b. *QBlade v0.96*;

Digunakan untuk melakukan simulasi BEM pada rotor turbin yang telah dibuat.

c. *Microsoft Excel 2016*.

Digunakan untuk melakukan perhitungan geometri bilah rotor turbin angin.

3.4 Variabel Penelitian

a. Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang mempengaruhi variabel terikat.

a. *Angle of Attack*, $\alpha = -10$ s.d. $\alpha = 20$;

b. *Tip Speed Ratio*, $TSR = 0$ s.d. $TSR = 10$;

c. *Pitch Angle*, $\beta = 0$ s.d. $\beta = 10$.

b. Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas.

a. *Coefficient of performance* (C_p)

b. Daya output (P)

c. Variabel Kontrol

Variabel kontrol adalah variabel yang dibuat konstan dan tidak terpengaruh oleh variabel yang lain.

a. Jenis *airfoil* adalah NACA Series 4712 dan 4412;

b. Jenis bilah adalah *tapperless*;

c. Turbin Angin Sumbu Horizontal;

d. Panjang chord, $c = 0,15$ meter.

e. Efisiensi (η) diasumsikan sebagai berikut: generator = 90%,
kontroler = 90% transmisi = 80 %.

3.5 Prosedur Penelitian

Tahap – tahap yang akan dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.4.1 Studi Literatur dan Studi Lapangan

Studi literatur dan studi lapangan perlu dilakukan pada awal penelitian untuk mengumpulkan data dan mengetahui kondisi alam yang ada di wilayah Pantai Puger. Studi literatur bertujuan untuk mendapatkan data informasi yang berkaitan langsung dengan penelitian ini. Sumber literatur berupa jurnal penelitian, buku, database dan situs internet. Sedangkan studi lapangan adalah kegiatan mengumpulkan data aktual pada lokasi potensial yang telah ditentukan melalui survei lapang di sepanjang lokasi Pantai Selatan Kecamatan Puger.

Data hasil pengujian lapang dan studi literatur yang diperlukan pada penelitian ini, antara lain sebagai berikut:

1. Koordinat *airfoil* NACA 4412 dan NACA 4712
2. Data kecepatan angin rata-rata di Pantai Puger.
3. Titik koordinat lokasi potensial yang baik untuk turbin angin.
4. Melakukan pengukuran kecepatan angin menggunakan anemometer yang dirangkai dengan data logger di letakkan pada ketinggian 5 meter.



Gambar 3.5 Koordinat dan Peta Lokasi Penelitian di Pantai Puger

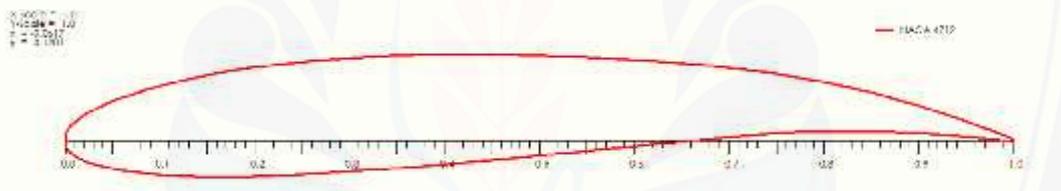
3.4.2 Analisis Potensi Energi Angin

Analisis potensi energi angin dilakukan setelah data didapatkan melalui kegiatan survei lapang. Untuk melakukan analisis potensi energi angin ini, digunakan persamaan dasar untuk menentukan daya angin yang tersedia berdasarkan data kecepatan angin.

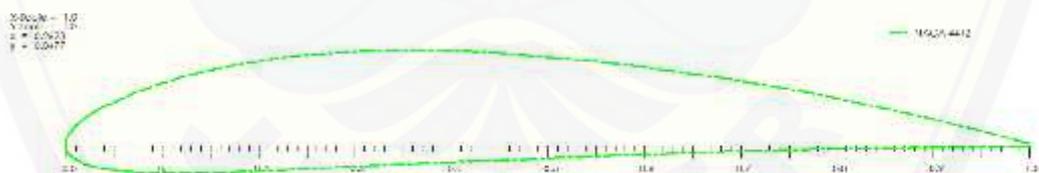
$$P_w = \frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (3.1)$$

3.4.3 Penentuan Jenis Turbin dan Airfoil

Berdasarkan data kecepatan angin yang ada di wilayah Pantai Puger, angin yang paling sering terjadi termasuk dalam kategori kecepatan rendah hingga sedang sehingga paling sesuai menggunakan jenis turbin angin sumbu horizontal dengan dan jumlah bilah 3 buah. Airfoil yang digunakan adalah tipe NACA 4712 dan NACA 4412.



Gambar 3.6 Profil Airfoil NACA 4712



Gambar 3.7 Profil Airfoil NACA 4412

3.4.4 Penentuan Jenis Bilah

Berdasarkan data kecepatan angin yang ada di wilayah Pantai Puger, angin yang paling sering terjadi termasuk dalam kategori kecepatan rendah hingga sedang sehingga paling sesuai menggunakan jenis turbin angin sumbu horizontal dengan model bilah *taperless*.

3.4.5 Perhitungan Matematis

Perhitungan matematis dilakukan untuk mencari data geometri dari turbin angin yang akan digunakan. Parameter yang dapat dihitung antara lain adalah radius rotor, *chord* dan *twist*. Selain perhitungan manual, parameter yang dibutuhkan untuk melakukan perhitungan juga diambil dari database perangkat lunak.

d. Menentukan Daya dan Radius Bilah

Daya turbin yang diharapkan adalah 500 Watt, untuk itu akan dilakukan perhitungan sehingga memperoleh radius rotor turbin angin.

e. Menentukan *Tip Speed Ratio* (TSR)

Tip Speed Ratio (TSR) yang digunakan adalah 7. Nilai ini disesuaikan dengan fungsi turbin angin yang digunakan untuk memutar generator.

f. Menentukan jumlah bilah

Fungsi turbin yang dibuat digunakan untuk memutar generator. Dalam hal ini jumlah bilah yang sesuai untuk menjalankan fungsi tersebut adalah 3 buah.

g. Menganalisa persamaan empiris *airfoil*

Airfoil memiliki persamaan empiris yang hasilnya ditampilkan dalam bentuk grafik.

h. Membagi bilah menjadi 20 elemen

Bilah dibagi menjadi 20 elemen agar dapat menganalisa perubahan – perubahan parameter turbin pada setiap elemen.

i. Melakukan linearisasi

Karena bilah yang dibuat adalah jenis *taperless* maka perlu dilakukan linearisasi untuk membentuk sudut *twist* yang perubahannya linier dari pangkal bilah hingga ujung bilah.

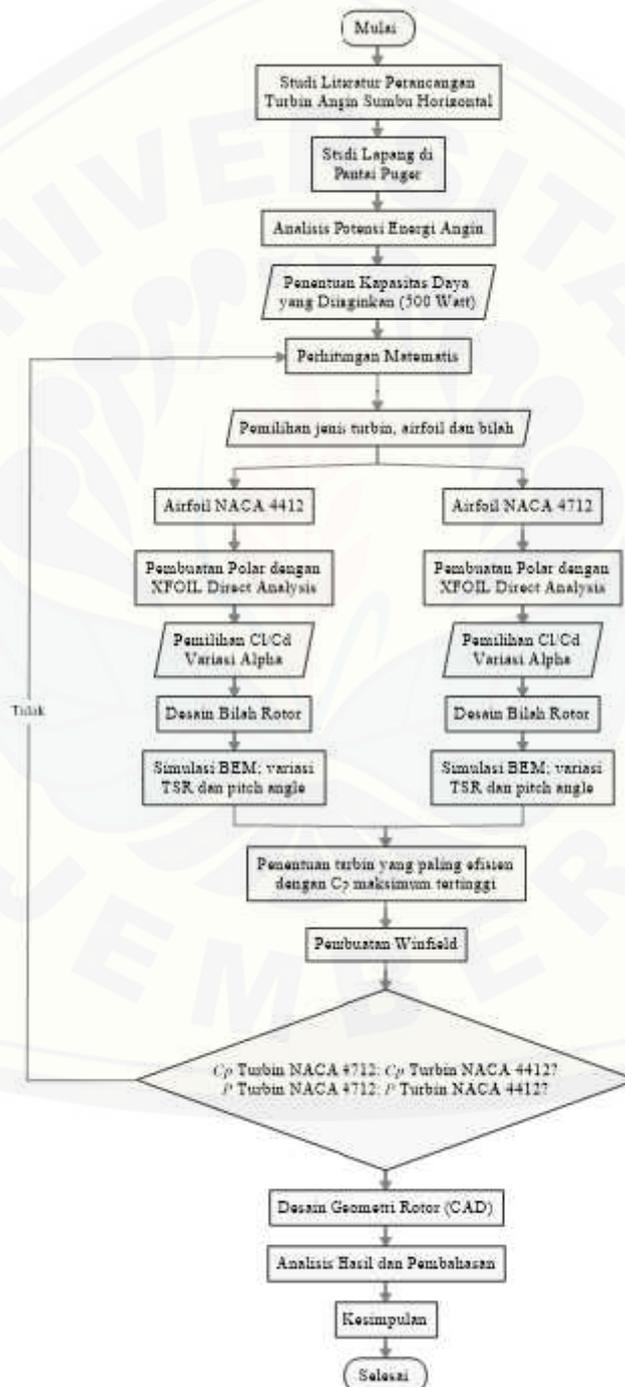
3.4.6 Pemodelan dan Konfigurasi *Airfoil*

Pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak QBlade dengan metode BEM dengan memberikan variasi nilai *angle of attack*, *TSR* dan *pitch angle*.

3.4.7 Pembuatan Geometri Bilah (CAD 3D)

Untuk menginterpretasikan hasil perhitungan yang telah dilakukan, parameter desain diwujudkan dalam bentuk gambar tiga dimensi (3D) yang dibuat menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor.

3.5 Diagram Alir



BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat dari penelitian tentang karakteristik turbin angin sumbu horizontal menggunakan *airfoil* NACA 4712 adalah sebagai berikut:

1. *Airfoil* NACA 4712 memiliki nilai C_l maksimum = 1.696 pada posisi $\alpha = 14^\circ$ sedangkan *airfoil* NACA 4412 memiliki nilai C_l maksimum = 1.628 pada posisi $\alpha = 15^\circ$ sehingga nilai C_l maksimum *airfoil* NACA 4712 lebih tinggi daripada *airfoil* NACA 4412.
2. *Airfoil* NACA 4712 memiliki nilai maksimum $C_l/C_d = 153$ pada posisi $\alpha = 2^\circ$, sedangkan *airfoil* NACA 4412 memiliki nilai maksimum $C_l/C_d = 133.5$ pada posisi $\alpha = 5.5^\circ$ sehingga nilai maksimum C_l/C_d *airfoil* NACA 4712 lebih tinggi daripada *airfoil* NACA 4412.
3. Turbin dengan *airfoil* NACA 4712 nilai maksimum C_p terjadi pada rentang TSR 5.3 s.d 6.8 yaitu $C_p = 0.46$, sedangkan Turbin dengan *airfoil* NACA 4412 nilai maksimum C_p terjadi pada rentang TSR 5.4 s.d 7.0 yaitu $C_p = 0.48$.
4. Sudut *pitch* 0 derajat menghasilkan daya keluaran yang paling baik untuk turbin angin dengan *airfoil* NACA 4712 dan 4412.
5. Pada kecepatan angin 7,66 m/s dengan kondisi turbulensi 10%, turbin angin dengan *airfoil* NACA 4712 memiliki parameter performa turbin $C_p = 0,49929$ dan memperoleh daya 1,15 kW, sedangkan Turbin angin dengan *airfoil* NACA 4412 memiliki parameter performa turbin $C_p = 0,395365$ dan memperoleh daya 0.889 kW pada kecepatan angin yang sama.

5.2 Saran

Saran yang dapat disampaikan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengambilan data kecepatan angin perlu dilakukan secara kontinyu dalam rentang waktu yang lebih lama.
2. Efisiensi komponen turbin angin perlu disesuaikan dengan hasil uji.
3. Jenis *airfoil* penyusun bilah perlu dibuat beragam agar berfungsi optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- A.R. Jha Ph.D. 2011. *Wind Turbine Technology*. Boca Raton: CRC Press.
- Aji, Dean Rudityo, and M Nur Cahyadi. 2015. "Analisa Karakteristik Kecepatan Angin Dan Tinggi Gelombang Menggunakan Data Satelit Altimetri (Studi Kasus : Laut Jawa)." *Geoid* 11 (1): 75–78.
- Corten, Gustave Paul. 2001. *Flow Separation on Wind Turbine Blades*.
- Fandi, D. Suprianto, Sutrisno, and Peter Jonathan. 2013. "Perancangan Propeler Turbin Angin Poros Horisontal Dengan Metoda *Blade Element Momentum*." *Seminar Nasional Teknik Mesin 8*.
- Gunarto, Rahmat Nanang, and Eko Sarwono. 2017. "Study Eksperimental Berbagai Macam Jenis Sudu Turbin Angin Sumbu Horisontal Skala Laboratorium" 3 (2): 113–20.
- Hemami, Ahmad. 2006. *Wind Turbine Technology. Solar Energy*. Vol. 62. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(97\)82047-6](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(97)82047-6).
- Hsiao, Fei-Bin, and dkk. 2013. "The Performance Test of Three Different Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) Blade Shapes Using Experimental and Numerical Methods." *Energies* 6 (6): 2784–2803. <https://doi.org/10.3390/en6062784>.
- Manikandan, N, and B Stalin. 2013. "Design of Naca63215 Airfoil for a Wind Turbine \n." *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* 10 (2): 18–26. <http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol10-issue2/D01021826.pdf?id=7622>.
- Manwell, James F, Jon G McGowan, and Anthony L Rogers. 2009. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. John Wiley&Sons Ltd, UK*. <https://doi.org/10.1002/9781119994367>.
- Marten, D, J Wendler G Pechlivanoglou C N Nayeri, and C O Paschereit. 2008.

“QBlade : OpenSource Horizontal and Vertical Axis Wind Turbine Design and Simulation,” 2030.

Sekretaris Jendral Dewan Energi Nasional. 2016. *Outlook Energi Indonesia 2016*.

Npower, RWE. 2009. “Wind Turbine Power Calculations.” *Wind Turbine Power Calculations* 1 (1): 1–5. <https://www.raeng.org.uk/publications/other/23-wind-turbine>.

Piggot, Hugh. 2005. *How to Build a Wind Turbine*.

———. 2008. “Windpower Workshop, Building Your Own Wind Turbine,” 156.

Prasetya, Maret Enggar. 2015. “Studi Kinerja Turbin Angin Sumbu Horizontal NACA 4412 Dengan Modifikasi Sudu Tipe Flat Pada Variasi,” 1–13.

Sitompul, Rismina. 2011. *Teknologi Energi Terbarukan Yang Tepat Untuk Aplikasi Di Masyarakat Perdesaan*. Edited by Bono Pranoto. PNPM Support Facility (PSF).

Titanio, Gilang, and Arrad Ghani Safitra. 2015. “Unjuk Kerja Turbin Angin Sumbu Horisontal Menggunakan Airfoil,” no. April.

Tong, Wei. 2010. *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*. WIT Press. <https://doi.org/10.5860/CHOICE.48-3904>.

Wu, Bin, Yongqiang Lang, Navid Zargari, and Samir Kouro. 2011. *Power Conversion and Control Of Wind Energy Systems*. IEEE Press. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>.

LAMPIRAN

Lampiran 4.1 Data Geometri Turbin Airfoil NACA 4412

Blade Export File Created with QBlade v0.963 64bit v0.96 on 23.07.2019 at 10:33:03				
Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]	Airfoil Name	360 Polar Name
0.20	0.15	8.76	NACA 4412	N44 360 M
0.27	0.15	8.62	NACA 4412	N44 360 M
0.33	0.15	8.48	NACA 4412	N44 360 M
0.40	0.15	8.33	NACA 4412	N44 360 M
0.47	0.15	8.19	NACA 4412	N44 360 M
0.53	0.15	8.05	NACA 4412	N44 360 M
0.60	0.15	7.91	NACA 4412	N44 360 M
0.67	0.15	7.77	NACA 4412	N44 360 M
0.73	0.15	7.63	NACA 4412	N44 360 M
0.80	0.15	7.49	NACA 4412	N44 360 M
0.87	0.15	7.35	NACA 4412	N44 360 M
0.94	0.15	7.21	NACA 4412	N44 360 M
1.00	0.15	7.06	NACA 4412	N44 360 M
1.07	0.15	6.92	NACA 4412	N44 360 M
1.14	0.15	6.78	NACA 4412	N44 360 M
1.20	0.15	6.64	NACA 4412	N44 360 M
1.27	0.15	6.50	NACA 4412	N44 360 M
1.34	0.15	6.36	NACA 4412	N44 360 M
1.40	0.15	6.22	NACA 4412	N44 360 M
1.47	0.15	6.08	NACA 4412	N44 360 M
1.54	0.15	5.93	NACA 4412	N44 360 M

Lampiran 4.2 Data Geometri Turbin Airfoil NACA 4712

Blade Export File Created with QBlade v0.963 64bit v0.96 on 23.07.2019 at 10:33:21

Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]	Airfoil Name	360 Polar Name
0.20	0.15	10.12	NACA 4412	N44 360 M
0.27	0.15	10.00	NACA 4412	N44 360 M
0.33	0.15	9.88	NACA 4412	N44 360 M
0.40	0.15	9.77	NACA 4412	N44 360 M
0.47	0.15	9.65	NACA 4412	N44 360 M
0.53	0.15	9.53	NACA 4412	N44 360 M
0.60	0.15	9.42	NACA 4412	N44 360 M
0.67	0.15	9.30	NACA 4412	N44 360 M
0.73	0.15	9.19	NACA 4412	N44 360 M
0.80	0.15	9.07	NACA 4412	N44 360 M
0.87	0.15	8.95	NACA 4412	N44 360 M
0.94	0.15	8.84	NACA 4412	N44 360 M
1.00	0.15	8.72	NACA 4412	N44 360 M
1.07	0.15	8.61	NACA 4412	N44 360 M
1.14	0.15	8.49	NACA 4412	N44 360 M
1.20	0.15	8.37	NACA 4412	N44 360 M
1.27	0.15	8.26	NACA 4412	N44 360 M
1.34	0.15	8.14	NACA 4412	N44 360 M
1.40	0.15	8.03	NACA 4412	N44 360 M
1.47	0.15	7.91	NACA 4412	N44 360 M
1.54	0.15	7.79	NACA 4412	N44 360 M

Lampiran 4.3 Data Korelasi *Cl-Cd Ratio* dengan *Angle of attack* ()

Export File Created with Qbladed with Qblade v0.963 64bit on 28.07.2019 at 06:56:21

NACA 4412		NACA 4712	
Alpha	Cl/Cd	Alpha	Cl/Cd
-1.00	51.55	-1.00	86.22
-0.50	60.05	-0.50	98.40
0.00	69.17	0.00	113.22
0.50	82.78	0.50	126.18
1.00	96.94	1.00	139.49
1.50	106.90	1.50	151.46
2.00	112.67	2.00	153.00
2.50	116.87	2.50	129.92
3.00	120.99	3.00	121.99
3.50	124.85	3.50	116.83
4.00	127.95	4.00	111.96
4.50	131.03	4.50	107.26
5.00	131.72	5.00	101.92
5.50	133.61	5.50	98.00
6.00	133.64	6.00	93.37
6.50	131.21	6.50	90.24
7.00	127.54	7.00	89.47
7.50	119.17	7.50	86.62
8.00	111.08	8.00	84.02
8.50	102.45	8.50	82.02
9.00	94.65	9.00	79.79
9.50	89.69	9.50	77.29
10.00	84.92	10.00	74.17
10.50	80.74	10.50	72.19
11.00	76.77	11.00	69.31
11.50	71.45	11.50	64.09
12.00	67.63	12.00	62.18
12.50	63.07	12.50	59.65
13.00	56.82	13.00	56.99
13.50	51.81	13.50	53.77
14.00	47.92	14.00	49.85
14.50	43.77	14.50	43.89
15.00	39.50	15.00	37.83
15.50	34.97	15.50	34.82
16.00	30.16	16.00	31.78
16.50	25.32	16.50	28.77
17.00	21.89	17.00	25.75

Lampiran 4.4 Data Korelasi *Coefficient of lift (Cl)* dengan *Angle of attack ()*

Export File Created with Qblade v0.963 64bit on 28.07.2019 at 06:55:28			
NACA 4412		NACA 4712	
Alpha	Cl	Alpha	Cl
-1.00	0.36	-1.00	0.55
-0.50	0.42	-0.50	0.61
0.00	0.47	0.00	0.67
0.50	0.53	0.50	0.73
1.00	0.57	1.00	0.78
1.50	0.64	1.50	0.84
2.00	0.70	2.00	0.88
2.50	0.75	2.50	0.91
3.00	0.81	3.00	0.95
3.50	0.86	3.50	0.99
4.00	0.91	4.00	1.02
4.50	0.97	4.50	1.06
5.00	1.02	5.00	1.10
5.50	1.07	5.50	1.14
6.00	1.13	6.00	1.18
6.50	1.18	6.50	1.23
7.00	1.22	7.00	1.26
7.50	1.27	7.50	1.30
8.00	1.31	8.00	1.34
8.50	1.34	8.50	1.38
9.00	1.37	9.00	1.42
9.50	1.40	9.50	1.46
10.00	1.43	10.00	1.49
10.50	1.46	10.50	1.53
11.00	1.49	11.00	1.56
11.50	1.51	11.50	1.58
12.00	1.54	12.00	1.61
12.50	1.56	12.50	1.64
13.00	1.58	13.00	1.66
13.50	1.59	13.50	1.68
14.00	1.61	14.00	1.70
14.50	1.62	14.50	1.69
15.00	1.63	15.00	1.67
15.50	1.63	15.50	1.68
16.00	1.62	16.00	1.69

Lampiran 4.5 Data Korelasi *Coefficient of drag (Cd)* dengan *Angle of attack ()*

Export File Created with Qblade v0.963 64bit on 27.07.2019 at 22:01:47			
NACA 4412		NACA 4712	
Alpha	Cd	Alpha	Cd
-1.00	0.01	-1.00	0.01
-0.50	0.01	-0.50	0.01
0.00	0.01	0.00	0.01
0.50	0.01	0.50	0.01
1.00	0.01	1.00	0.01
1.50	0.01	1.50	0.01
2.00	0.01	2.00	0.01
2.50	0.01	2.50	0.01
3.00	0.01	3.00	0.01
3.50	0.01	3.50	0.01
4.00	0.01	4.00	0.01
4.50	0.01	4.50	0.01
5.00	0.01	5.00	0.01
5.50	0.01	5.50	0.01
6.00	0.01	6.00	0.01
6.50	0.01	6.50	0.01
7.00	0.01	7.00	0.01
7.50	0.01	7.50	0.02
8.00	0.01	8.00	0.02
8.50	0.01	8.50	0.02
9.00	0.01	9.00	0.02
9.50	0.02	9.50	0.02
10.00	0.02	10.00	0.02
10.50	0.02	10.50	0.02
11.00	0.02	11.00	0.02
11.50	0.02	11.50	0.02
12.00	0.02	12.00	0.03
12.50	0.02	12.50	0.03
13.00	0.03	13.00	0.03
13.50	0.03	13.50	0.03
14.00	0.03	14.00	0.03
14.50	0.04	14.50	0.04
15.00	0.04	15.00	0.04
15.50	0.05	15.50	0.05
16.00	0.05	16.00	0.05
16.50	0.06	16.50	0.06

Lampiran 4.6 Data Korelasi *Coefficient of drag (Cd)* dengan *Coefficient of lift (Cl)*

Export File Created with QBlade v0.963 64bit on 28.07.2019 at 06:55:44			
NACA 4412		NACA 4712	
Cd	Cl	Cd	Cl
0.02	-0.62	0.01	-0.50
0.02	-0.56	0.01	-0.44
0.02	-0.50	0.01	-0.38
0.01	-0.46	0.01	-0.32
0.01	-0.41	0.01	-0.27
0.01	-0.35	0.01	-0.22
0.01	-0.30	0.01	-0.17
0.01	-0.25	0.01	-0.11
0.01	-0.19	0.01	-0.05
0.01	-0.14	0.01	0.01
0.01	-0.08	0.01	0.07
0.01	-0.02	0.01	0.14
0.01	0.03	0.01	0.20
0.01	0.09	0.01	0.25
0.01	0.14	0.01	0.31
0.01	0.20	0.01	0.37
0.01	0.25	0.01	0.43
0.01	0.31	0.01	0.50
0.01	0.36	0.01	0.55
0.01	0.42	0.01	0.61
0.01	0.47	0.01	0.67
0.01	0.53	0.01	0.73
0.01	0.57	0.01	0.78
0.01	0.64	0.01	0.84
0.01	0.70	0.01	0.88
0.01	0.75	0.01	0.91
0.01	0.81	0.01	0.95
0.01	0.86	0.01	0.99
0.01	0.91	0.01	1.02
0.01	0.97	0.01	1.06
0.01	1.02	0.01	1.10
0.01	1.07	0.01	1.14
0.01	1.13	0.01	1.18
0.01	1.18	0.01	1.23
0.01	1.22	0.01	1.26
0.01	1.27	0.02	1.30

0.01	1.31	0.02	1.34
0.01	1.34	0.02	1.38
0.01	1.37	0.02	1.42
0.02	1.40	0.02	1.46
0.02	1.43	0.02	1.49
0.02	1.46	0.02	1.53
0.02	1.49	0.02	1.56
0.02	1.51	0.02	1.58
0.02	1.54	0.03	1.61
0.02	1.56	0.03	1.64
0.03	1.58	0.03	1.66
0.03	1.59	0.03	1.68
0.03	1.61	0.03	1.70
0.04	1.62	0.04	1.69
0.04	1.63	0.04	1.67
0.05	1.63	0.05	1.68
0.05	1.62	0.05	1.69
0.06	1.59	0.06	1.69
0.07	1.57	0.07	1.68
0.08	1.56	0.07	1.67
0.09	1.55	0.08	1.66
0.10	1.54	0.09	1.64
0.10	1.53	0.10	1.61
0.11	1.52	0.12	1.58
0.12	1.50	0.13	1.55