

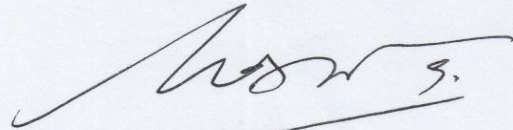
TUGAS SARJANA

Diberikan kepada : Nama : Faozan Saptadi
NIM : L2E 005 449
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Nazaruddin Sinaga , MS.
Jangka Waktu : 1(satu) tahun 3 (tiga) bulan
Judul : Pengukuran dan Perhitungan Kinerja Turbin Angin
Sumbu Horizontal Tiga Sudu Skala Rendah

Isi Tugas :

1. Mengetahui kinerja turbin angin sumbu horizontal tiga sudu skala rendah
2. Mengetahui pengaruh antara sudut serang rasio *lift/drag* pada airfoil.
3. Mengetahui pengaruh antara sudut *pitch*, sudut *yaw*, sudut *precone*, sudut *tilt* dan panjang blade dengan daya keluaran turbin angin.
4. Mengetahui pengaruh antara sudut *pitch* dengan nilai *starting torque* turbin angin.

Semarang, Desember 2010
Ketua Tim Penguji




Dr. Ir. Nazaruddin Sinaga , MS.
NIP. 196112171987031001

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi/Tesis/Disertasi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun yang dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

NAMA : FAOZAN SAPTADI

NIM : L2E 005 449

Tanda Tangan : 

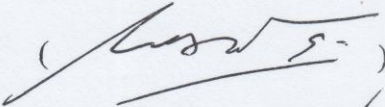
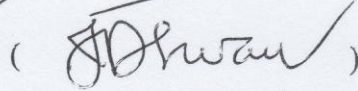
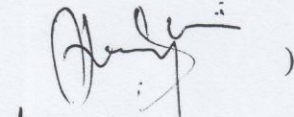
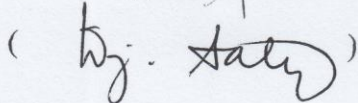
Tanggal : 27 DESEMBER 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
NAMA : FAOZAN SAPTADI
NIM : L2E 005 449
Jurusan/Program Studi : TEKNIK MESIN
Judul Skripsi : PERHITUNGAN DAN PENGUKURAN KINERJA
TURBIN ANGIN SUMBU HORIZONTAL TIGA
SUDU SKALA RENDAH

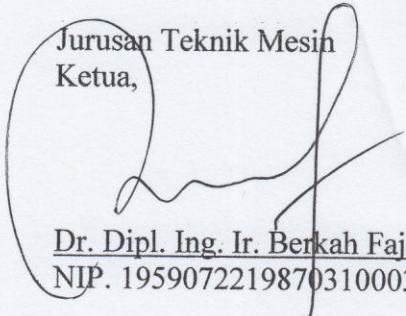
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan/ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.

TIM PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Nazaruddin Sinaga, MS ()
Penguji : Dr. Joga Darma Setiawan, MSc ()
Penguji : Dr. MSK Tony Suryo U, ST, MT ()
Penguji : Ir. Djoeli Satridjo, MT ()

Semarang, 27 Desember 2010

Jurusan Teknik Mesin
Ketua,


Dr. Dipl. Ing. Ir. Berkah Fajar TK
NIP. 1959072219870310003

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademika Universitas Diponegoro, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Faozan Saptadi
NIM : L2E005449
Jurusan/Program Studi : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi/Tesis/Disertasi

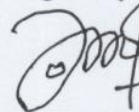
demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Diponegoro **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*None-exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :
Pengukuran dan Perhitungan Kinerja Turbin Angin Sumbu Horisontal Tiga Sudu Sakal Rendah

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Semarang
Pada Tanggal : 27 Desember 2010

Yang menyatakan



(Faozan Saptadi)

ABSTRAK

Energi listrik merupakan sebuah bagian yang tidak terpisahkan dalam kehidupan manusia. Hampir semua aspek dalam kehidupan manusia membutuhkan energi listrik. Sumber energi yang digunakan untuk membangkitkan listrik yang umum digunakan adalah sumber energi fosil yang merupakan sumber energi yang terbatas ketersediaannya dan tidak terbarukan. Peningkatan kebutuhan energy, keterbatasan sumber daya fosil serta efek negatif yang ditimbulkannya mengakibatkan perlunya dikembangkan teknologi pemanfaatan sumber energi terbarukan. Angin adalah salah satu sumber energi yang terbarukan dan ramah lingkungan.

Energi angin dapat dimanfaatkan dengan menggunakan turbin angin. Jenis turbin angin yang akan dipilih dalam tugas akhir ini adalah turbin angin sumbu horisontal tiga sudu skala rendah. Turbin angin memiliki diameter 120 cm dengan pengarah ekor.

Pengujian kinerja turbin angin untuk mendapatkan karakteristik daya turbin angin terhadap kecepatan angin dan memperoleh nilai *cut in speed* turbin angin. Simulasi aliran menggunakan program komputer dilakukan untuk memprediksi kondisi aliran pada penampang airfoil sudu dan memperkirakan sudut serang optimum untuk menghasilkan rasio *lift/drag* terbesar. Perhitungan dengan menggunakan paket program komputer juga digunakan untuk memprediksi hal-hal yang mempengaruhi daya keluaran turbin angin seperti sudut *pitch*, sudut *yaw*, sudut *tilt*, sudut *precone*, dan panjang sudu pada kondisi operasi tertentu. Simulasi aliran juga digunakan untuk memprediksi nilai torsi awal pada rotor pada kondisi operasi tertentu dan mengetahui pengaruh sudut *pitch* terhadap nilai torsi awal pada rotor.

Keywords : turbin angin, *wind turbine aerodynamics*, *blade design*, *computational fluid dynamic*

ABSTRACT

Electrical energy is a part that can not be separated from human life. Almost the whole aspect in human life needs electrical energy, the general source to rise up electricity is fossile source energy which is limited and non renewable enhancement needed, limited fossile source also negative effect that produce makes the grown up technology of renewable energy. Wind is one of reneweble energy source and it green power.

Wind energy can be used with wind turbine. The chosen of wind turbine in this final examination is three horizontal axis wind turbine low scale. It has 120 cm blade diameter.

Flow simulation using computer software to predict flow condition at airfoil section blade and estimating the optimum angle of attack to produce larger lift or drag ratio. Calculation with computer software also use to predict influence power output like pitch agle, yaw angle, tilt angle, precone angle and the length of blade in certain condition. Flow simulation also use to predict starting torque value in certain condition and perceive pitch angle influence against starting torque rotor value.

Keywords : *Wind energy, wind turbine aerodynamics, blade design, computational fluid dynamic*

HALAMAN PERSEMBAHAN

Laporan Tugas Akhir ini penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua, kakak, adik, dan keponakan yang lucu-lucu. Terimakasih atas cinta dan doa yang selalu menyertai penulis.
2. Para penghuni Asrama Barokah (Rosyad, Nico, Pambudi, Aldino). Terimakasih atas segala kerja keras, bantuan tanpa kenal lelah, dan kerelaan untuk membantu penulis.
3. Tim EECL Undip (Mas Martono, Dela, Kosim, Angga, Bahrudin Fauzan, Anghi). Terimakasih atas segala bantuan dan kesabaran dalam membantu penulis untuk melakukan pangujian.
4. Mas 'Broto' Subroto, selaku teknisi laboratorium. Terimakasih atas segala bantuan perbaikan-perbaikan peralatan pengujian Tugas Akhir ini.
5. Bapak Ir. Tabah Priangkoso. Terimakasih atas bimbingan dan kesabaran menjawab pertanyaan-pertanyaan penulis.
6. D-A-W (Siwi). Terimakasih atas pengertian, perhatian, dan kritikan dalam penulisan Tugas Akhir ini yang selalu memberi semangat penulis.
7. Teman-teman Teknik Mesin UNDIP Angkatan 2005 yang telah memberikan dukungan selama penulis menyusun laporan Tugas Akhir ini.

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur senantiasa penulis panjatkan kepada Allah S.W.T, karena berkat rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan judul “Pengukuran dan Perhitungan Turbin Angin Sumbu Horizontal Tiga Sudu Skala Rendah”. Tugas akhir ini merupakan salah satu syarat yang harus dipenuhi pada program strata satu (S-1) di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro Semarang.

Keberhasilan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan orang-orang yang dengan segenap hati memberikan bantuan, bimbingan dan dukungan, baik moral maupun material. Oleh karenanya, penulis menghaturkan ucapan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Nazaruddin Sinaga,MS, selaku dosen pembimbing yang telah begitu banyak memberikan bimbingan, pengarahan dan pengetahuan tentang banyak hal kepada penulis, terutama dalam pengerjaan dan penyelesaian Tugas Sarjana ini.
2. Para penghuni Asrama Barokah (Rosyad, Nico, Pambudi, Aldino) dan Tim *EECL* Undip (Sdr. martono, della, Bahrudin, Ambn, kosim dan aghi), atas bantuannya selama ini.
3. Teman seangkatan 2005, telah menjadi tempat keluh kesah saya selama pengerjaan Tugas Akhir ini dan mampu memberikan jalan keluar bagi saya.
4. Semua pihak yang telah membantu penulis dengan tulus.

Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi orang yang membacanya dan kelak di kemudian hari ada generasi penerus yang mampu menyempurnakan kekurangan penulis.

Semarang, Desember 2010

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN TUGAS SARJANA	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI LAPORAN UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
ABSTRACT	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
HALAMAN PERSEMBAHAN	viii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xx
NOMENKLATUR	xxi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang.	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan	3
1.4. Pembatasan Masalah	4
1.5. Metodologi Penelitian	4
1.6. Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Energi Angin	7
2.1.1. Asal Energi Angin	7
2.1.2. Potensi Angin di Indonesia	7
2.1.3. Pengukuran Angin	8

2.1.4. Prinsip Konversi Energi Angin	9
2.1.5. <i>Tip speed ratio</i>	9
2.2. Klasifikasi Aliran	10
2.2.1. Aliran <i>Inviscid</i> dan <i>Viscous</i>	12
2.2.2. Aliran <i>Laminar</i> dan Aliran <i>Turbulent</i>	13
2.2.3. Aliran <i>Compressible</i> dan <i>Incompressible</i>	14
2.2.4. Aliran <i>Internal</i> dan <i>External</i>	14
2.5. Persamaan Dasar Aliran Fluida	15
2.5.1. Persamaan Kekekalan Massa	15
2.5.2. Persamaan Kekekalan Momentum	17
2.5.3. Persamaan Energi	19
2.6. Bilangan Reynolds	20
2.7. Gaya-Gaya pada Benda	20
2.7.1. Geometri Benda	20
2.7.2. Perhitungan <i>Drag</i> dan <i>Lift</i>	22
2.7.3. Jenis Tahanan	25
2.7.4. Lapisan Batas	26
2.8. Aspek Aerodinamika dalam Perancangan Sudu Turbin Angin	30
2.9. Turbin Angin	33
2.10. Paket program Yawdyn	36
2.10.1. Aerodyn	38
2.10.2. File wind.wnd	43
2.10.3. File airfoil.dat	43
2.10.4. Yawdyn	44
2.11. <i>Computational Fluid Dynamics</i>	50
2.11.1. Pengenalan CFD	50
2.11.2. Proses Simulasi CFD	50
2.11.3. Model Turbulent	51
2.11.4. Metode Komputasi Fluent 6.2.16	54
2.11.5. <i>Modeling Move Reference Frame</i>	62
2.11.6. Kondisi Batas	62

BAB III	PENGUKURAN DAN PERHITUNGAN TURBIN ANGIN	
3.1.	Metode Penelitian	64
3.2.	Pengukuran Kinerja Turbin Angin	65
3.2.1.	Tahapan Pengujian	66
3.2.2.	Perlengkapan Pengujian	69
3.2.3.	Prosedur Pengujian	71
3.3.	Simulasi Airfoil 2D Menggunakan Paket Program Fluent	71
3.3.1.	Model Benda	71
3.3.2.	Langkah Pengerjaan	72
3.3.3.	Simulasi Numerik Pada Fluent	75
3.3.3.1.	Pembentukan Model dan Kondisi Batas	75
3.3.3.2.	Penggenerasian Mesh	76
3.3.3.3.	Solver dan Model Turbulensi	77
3.3.3.4.	Pendefinisian Material	78
3.3.3.5.	Pendefinisian Kondisi Batas	79
3.3.4.	Proses Simulasi	81
3.3.4.1.	<i>Control</i> Solusi	81
3.3.4.2.	Solusi Parameter Aerodinamik Airfoil	82
3.4.	Simulasi Turbin Angin dengan Paket program Yawdyn	83
3.4.1.	Diagram Alir Simulasi	83
3.4.2.	Pendefinisian Kecepatan Angin	84
3.4.3.	Pendefinisian Data Aerodinamik Airfoil	85
3.4.4.	Pembuatan File Aerodyn.ipt	85
3.4.5.	Pembuatan File Yawdyn.ipt	86
3.4.6.	Simulasi Kasus	87
3.5.	Simulasi Turbin Angin 3D Menggunakan Paket Program Fluent	88
3.5.1.	Pemodelan	88
3.5.2.	Langkah Pengerjaan	88
3.5.3.	Simulasi Numerik Pada Fluent 6.2.16	90

3.5.3.1. Model dan Kondisi Batas	90
3.5.3.2. Penggenerasian Mesh	91
3.5.3.4. Pendefinisian Material	92
3.5.3.5. Pendefinisian Kondisi Batas	93
3.5.4. Proses Simulasi	96
3.5.4.1. <i>Control</i> Solusi	96
3.5.4.2. <i>Reporting</i> Momen	97
BAB IV DATA dan ANALISA	
4.1. Analisis Pengujian	98
4.2.1. Pengujian Tanpa Beban	99
4.2.2. Pengujian dengan Beban	100
4.2. Simulasi Airfoil 2D dengan Fluent	103
4.2.1. Simulasi Grid	103
4.2.2. Data Hasil Simulasi Airfoil 2D	104
4.2.3. Analisa Hasil Simulasi Airfoil 2D	105
4.3. Simulasi Yawdyn	108
4.3.1. Proses Validasi	108
4.3.2. Data Hasil Simulasi Yawdyn	109
4.3.3. Analisa Hasil Simulasi Yawdyn	111
4.4. Simulasi Turbin Angin 3D Dengan Fluent	113
4.4.1. Simulasi <i>Turbulence Models</i>	113
4.4.2. Simulasi Grid	117
4.4.3. Data Hasil Simulasi Turbin Angin 3D	118
4.4.4. Analisa Hasil Simulasi Turbin Angin 3D	119
4.4.4.1. Perbandingan Kondisi Sudu Berputar dan Diam	119
4.4.4.2. Analisa Nilai <i>Starting Torque</i>	126
4.4.4.3. Analisa Nilai <i>Starting Torque</i> pada <i>Pitch</i> 23 ⁰ kecepatan 3,4 m/s dan <i>Pitch</i> 24 ⁰ kecepatan 3,2 m/s	132
4.4.4.4. Analisa Nilai <i>Starting Torque</i> pada <i>Pitch</i> 23 ⁰ kecepatan 3,4 m/s dan <i>pitch</i> 25 ⁰ kecepatan 3 m/s	135

BAB V	KESIMPULAN dan SARAN	
	5.1. Kesimpulan	138
	5.2. Saran	140
	DAFTAR PUSTAKA	141

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Nilai C_p dan Tip speed ratio pada berbagai macam turbin angin	10
Gambar 2.2	Respon terhadap gaya: (a) tidak merespon gaya yang diberikan secara tiba-tiba; (b) beberapa waktu setelah dikenai gaya; (c) setelah lama dikenai gaya	11
Gambar 2.3	Klasifikasi aliran fluida	12
Gambar 2.4	Berbagai daerah aliran lapisan batas diatas plat rata	12
Gambar 2.5	Variasi kecepatan (satu dimensi) terhadap waktu.	13
Gambar 2.6	Beberapa contoh aliran eksternal	15
Gambar 2.7	Kesetimbangan massa pada elemen <i>fluida</i>	16
Gambar 2.8	Komponen tegangan menurut arah sumbu- x .	17
Gambar 2.9	Benda dua dimensi	21
Gambar 2.10	Benda tiga dimensi	21
Gambar 2.11	Benda <i>axisymmetric</i>	22
Gambar 2.12	Distribusi tekanan dan tegangan geser pada suatu <i>airfoil</i>	22
Gambar 2.13	Geometri elemen gaya pada <i>airfoil</i>	23
Gambar 2.14	Definisi luas planform dan luas frontal	25
Gambar 2.15	Tahanan permukaan pada plat datar	26
Gambar 2.16	Tahanan bentuk pada <i>bluff bodies</i> .	26
Gambar 2.17	Lapisan batas viskos tipis pada suatu benda tipis dalam aliran dengan bilangan Reynolds tinggi	27
Gambar 2.18	Lapisan batas pada suatu pelat datar (ketebalan vertikal diperbesar)	28
Gambar 2.19	Variasi koefisien tahanan terhadap bilangan Reynolds untuk benda dengan berbagai tingkat streamlining	29
Gambar 2.20	Efek <i>streamlining</i> pada pengurangan tahanan benda dua dimensi, C_D didasarkan pada luas frontal	30

Gambar 2.21	Geometri <i>blade</i> dengan variasi profil airfoil dan sudut <i>twist</i>	31
Gambar 2.22	Efisiensi aerodinamik pada plat datar	32
Gambar 2.23	Efisiensi aerodinamik berbagai airfoil untuk bilangan Reynold $1,0 \times 10^5$	32
Gambar 2.24	Efisiensi aerodinamik berbagai airfoil untuk bilangan Reynold $1,5 \times 10^5$	33
Gambar 2.25	<i>lift</i> dan <i>drag</i>	34
Gambar 2.26	<i>Vertical Axis Wind Turbine</i>	35
Gambar 2.27	<i>Horizontal Axis Wind Turbine</i>	35
Gambar 2.28	Turbin angin <i>upwind</i> dan <i>downwind</i>	36
Gambar 2.29	Pembagian jenis program simulasi pada NREL	37
Gambar 2.30	Bagan tahapan simulasi yang akan dilakukan	38
Gambar 2.31	Diagram alir cara kerja Aerodyn	40
Gambar 2.32	Contoh file aerodyn.ipt	41
Gambar 2.33	Contoh file wind.wnd	43
Gambar 2.34	Contoh file airfoil.dat	44
Gambar 2.35	Diagram alir cara kerja Yawdyn	46
Gambar 2.36	Contoh file yawdyn.ipt	47
Gambar 2.37	Proses simulasi pada <i>command prompt</i>	49
Gambar 2.38	Diagram alir metode solusi <i>segregated</i>	56
Gambar 2.39	Diagram alir metode solusi <i>coupled</i>	57
Gambar 2.40	Kontrol volume digunakan sebagai ilustrasi diskretisasi persamaan <i>transport scalar</i>	59
Gambar 2.41	Variasi variable \emptyset antara $x = 0$ dan $x = L$	61
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	64
Gambar 3.2	Pemasangan alat pengukuran kinerja turbin angin tanpa beban	65
Gambar 3.3	Pemasangan alat pengukuran kinerja turbin angin dengan beban	66
Gambar 3.4	Diagram Alir pengujian turbin angin	68
Gambar 3.5	Tachometer	69

Gambar 3.6	Anemometer	69
Gambar 3.7	Multimeter dan tang amper	70
Gambar 3.8	Beban	70
Gambar 3.9	Blower dan Turbin angin	70
Gambar 3.10	Koordinat airfoil 4415	70
Gambar 3.11	Diagram Alir Simulasi airfoil 2D	72
Gambar 3.12	Daerah asal (domain) untuk airfoil dalam aliran dua dimensi	75
Gambar 3.13	Grid quadrilateral terstruktur pada domain	77
Gambar 3.14	Metode solusi Segregated	78
Gambar 3.15	Panel Pendefinisian Material	79
Gambar 3.16	Panel <i>velocity Inlet</i>	80
Gambar 3.17	Panel <i>pressure outlet</i>	80
Gambar 3.18	Panel <i>wall condition</i>	81
Gambar 3.19	Iterasi telah mencapai kriteria konvergensi ($1e-5$)	82
Gambar 3.20	Kontinuitas aliran massa	83
Gambar 3.21	Diagram alir simulasi	84
Gambar 3.22	Program FOILCHECK	85
Gambar 3.23	Keterangan untuk parameter pada aerodyn	86
Gambar 3.24	Keterangan untuk parameter pada yawdyn	87
Gambar 3.25	Diagram alir simulasi dengan paket program fluent	89
Gambar 3.26	Domain komputasi model turbin angin 3D	90
Gambar 3.27	Kondisi Batas domain model	91
Gambar 3.28	Hasil penggenerasian mesh pada domain <i>periodic</i>	92
Gambar 3.29	Panel <i>velocity Inlet</i>	93
Gambar 3.30	Panel <i>pressure outlet</i>	94
Gambar 3.31	Panel <i>periodic</i>	94
Gambar 3.32	Panel <i>pressure outlet..</i>	95
Gambar 3.33	Panel <i>wall condition</i>	96
Gambar 3.34	Torsi pada pangkal sudu..	97
Gambar 4.1	Grafik tegangan output tanpa beban	99
Gambar 4.2	Rangkaian beban.	100

Gambar 4.3	Grafik tegangan output dengan beban.	101
Gambar 4.4	Grafik putaran terhadap kecepatan dengan beban.	102
Gambar 4.5	Grafik daya output dengan beban.	102
Gambar 4.6	Grafik rasio lift/drag.	105
Gambar 4.7	Kontur distribusi tekanan pada sudut serang $\alpha = 8^\circ$.	106
Gambar 4.8	Kontur kecepatan pada sudut serang $\alpha = 8^\circ$.	106
Gambar 4.9	Kontur distribusi tekanan pada sudut serang $\alpha = 16^\circ$.	107
Gambar 4.10	Kontur <i>stream fuction</i> pada sudut serang $\alpha = 16^\circ$.	107
Gambar 4.11	Hasil perhitungan variasi sudut <i>pitch</i> .	109
Gambar 4.12	Hasil perhitungan variasi panjang sudu.	110
Gambar 4.13	Hasil perhitungan variasi sudut <i>yaw</i> .	110
Gambar 4.14	Hasil perhitungan variasi sudut <i>tilt</i> .	111
Gambar 4.15	Hasil perhitungan variasi <i>precone</i> .	111
Gambar 4.16	<i>Path line</i> model <i>k-epsilon standard</i> .	114
Gambar 4.17	<i>Path line</i> model <i>spalart allmaras</i> .	115
Gambar 4.18	<i>Relative total pressure</i> model <i>k-epsilon standard</i> .	116
Gambar 4.19	<i>Relative total pressure</i> model <i>spalart allmaras</i> .	117
Gambar 4.20	<i>Surface</i> pengamatan bagian sudu.	119
Gambar 4.21	Kontur tekanan pada $x = 10$ cm.	120
Gambar 4.22	Kontur tekanan pada $x = 40$ cm.	121
Gambar 4.23	Kontur tekanan pada $x = 50$ cm.	122
Gambar 4.24	Gambar kontur tekanan pada sudu yang berputar.	123
Gambar 4.25	Gambar kontur tekanan pada sudu yang diam.	124
Gambar 4.26	<i>Pathline</i> pada kondisi sudu berputar.	125
Gambar 4.27	<i>Pathline</i> pada kondisi sudu diam.	126
Gambar 4.28	Kontur intensitas turbulen pada <i>pitch</i> 23° dan jarak $x=50$ cm.	127
Gambar 4.29	Kontur intensitas turbulen pada <i>pitch</i> 24° dan jarak $x=50$ cm.	127
Gambar 4.30	Kontur intensitas turbulen pada <i>pitch</i> 25° dan jarak $x=50$ cm.	128
Gambar 4.31	Kontur intensitas turbulen pada <i>pitch</i> 26° dan jarak $x=50$ cm.	128
Gambar 4.32	Kontur tekanan statik pada <i>pitch</i> 23° dan jarak $x=50$ cm.	129
Gambar 4.33	Kontur tekanan statik pada <i>pitch</i> 24° dan jarak $x=50$ cm.	130

Gambar 4.34	Kontur tekanan statik pada <i>pitch</i> 25^0 dan jarak $x=50$ cm.	130
Gambar 4.35	Kontur tekanan statik pada <i>pitch</i> 26^0 dan jarak $x=50$ cm.	131
Gambar 4.36	Intensitas turbulensi pada <i>Pitch</i> 24^0 dan kecepatan 3,2 m/s.	132
Gambar 4.37	Intensitas turbulensi pada <i>Pitch</i> 23^0 dan kecepatan 3,4 m/s.	132
Gambar 4.38	Vektor kecepatan pada <i>Pitch</i> 24^0 , kecepatan 3.2 m/s.	133
Gambar 4.39	Vektor kecepatan pada <i>Pitch</i> 23^0 , kecepatan 3.4 m/s.	134
Gambar 4.40	Intensitas turbulensi pada <i>Pitch</i> 25^0 dan kecepatan 3 m/s.	135
Gambar 4.41	Intensitas turbulensi pada <i>Pitch</i> 23^0 dan kecepatan 3,4 m/s.	135
Gambar 4.42	Vektor kecepatan pada <i>Pitch</i> 25^0 dan kecepatan 3 m/s.	136
Gambar 4.43	Vektor kecepatan pada <i>Pitch</i> 23^0 dan kecepatan 3,4 m/s.	137

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Skala Beaufort	8
Tabel 2.2	Keterangan Parameter pada file aerodyn.ipt	41
Tabel 2.3	Keterangan Parameter pada file Yawdyn.ipt	47
Tabel 3.1	Perlengkapan pengujian	69
Tabel 3.2	Kecepatan Angin dalam Simulasi Yawdyn	84
Tabel 3.3	Simulasi kasus Ywadyn	87
Tabel 3.4	Data Sudu	88
Tabel 4.1	Data Pengukuran Tegangan Tanpa Beban	99
Tabel 4.2	Hasil Pengukuran Pada Kondisi Dengan Beban	101
Tabel 4.3	Hasil Simulasi Grid pada Simulasi airfoil 2D	103
Tabel 4.4	Solusi simulasi airfoil 2D	104
Tabel 4.5	Hasil verifikasi Yawdyn dengan hasil pengujian	108
Tabel 4.6	Data sudut serang tiap station pada variasi pitch	112
Tabel 4.7	Nilai <i>torque</i> untuk dua model turbulen	113
Tabel 4.8	Hasil Simulasi Grid	118
Tabel 4.9	Data Nilai <i>Starting torque</i> Hasil Simulasi	118

NOMENKLATUR

A	Luasan acuan	m^2
C	Panjang <i>chord</i>	m
c	Kecepatan suara	m/s
C_D	Koefisien <i>drag</i>	-
C_{Df}	Koefisien <i>friction drag</i>	-
C_{Dp}	Koefisien <i>pressure drag</i>	-
C_L	Koefisien <i>lift</i>	-
C_M	Koefisien <i>Momen</i>	-
D	Gaya hambat	N
E	Energy	Joule
$F(x)$	Fungsi rata-rata kuadrat error	-
F	Resultan gaya aerodinamika	N
h	Enthalpy	Joule/kg
J	Fluks difusi	-
k_{eff}	Konduktivitas efektif	$W/m.K$
k_t	Konduksi thermal	$W/m.K$
L	<i>Lift</i>	N
M	Momen	$N.m$
\hat{n}	Vector satuan gaya arah normal	-
P	Tekanan	N/m^2
S	Luasan acuan	m^2
s	Parameter koordinat pergeseran transformasi joukowski	-
T	Temperatur	K
t	Target	-
\hat{t}	Vector satuan gaya arah tangensial	-
u	Vector kecepatan arah sumbu x	m/s

U_{∞}	Kecepatan arus bebas	m/s
V	Kecepatan aliran	m/s
v	Vector kecepatan arah sumbu y	m/s
w	Vector kecepatan arah sumbu z	m/s
x,y,z	Sumbu koordinat kartesius	-
μ	Viskositas fluida	kg/m.s
τ	Tegangan viskos (tegangan geser fluida)	N/m ²
ρ	Densitas fluida	kg/m ³
S_h	Disipasi viskos	-
Re	Bilangan reynold	-
α	Sudut serang	0