

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSETUJUAN	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xxii
DAFTAR SINGKATAN	xxiii
DAFTAR NOTASI	xxiv
ABSTRAK	xxvi
<i>ABSTRACT</i>	xxvii
Bab I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	6
1.3. Batasan Masalah	7
1.4. Keaslian Penelitian	8
1.5. Tujuan Penelitian	9
1.6. Manfaat Penelitian	10
Bab II. KAJIAN PUSTAKA	11
2.1. Analisis Performa <i>Counter-rotating Wind Turbine</i>	11
2.2. Aerodinamika Turbin Angin <i>Counter-rotating</i>	15
2.3. Modifikasi <i>Blade</i> Turbin Angin Rotor Tunggal	25
2.3.1. Winglet	25
2.3.2. Vortex generator	26
2.4. Jalan Penelitian Turbin Angin <i>Counter-rotating</i>	27
2.5. Ringkasan Kajian Pustaka	37
Bab III. LANDASAN TEORI	39
3.1. Teori Aktuator Disk Rankine–Froude dan Teori Betz	39
3.2. Gaya-gaya Aerodinamika <i>Blade</i> Turbin Angin	44
3.3. Metode <i>Blade Element Momentum</i> (BEM)	46
3.4. Turbin Angin Rotor Ganda <i>Counter-Rotating</i>	51
3.5. Near Wake	54
3.6. <i>Computational Fluid Dynamic</i>	59
3.6.1. Hukum kekekalan massa dan momentum	59
3.6.2. Model turbulen	60
3.6.3. Cara kerja komputasi numerik dengan menggunakan Ansys Fluent	63
Bab IV. METODE PENELITIAN	67
4.1 Simulasi Rotor Tunggal	67
4.1.1. Geometri <i>blade</i>	67
4.1.2. Model numerik	71
4.1.3. Kondisi batas	71

4.1.4. Meshing.....	72
4.1.5. Prosedur solusi numerik.....	76
4.1.6. Verifikasi solusi numerik	76
4.1.7. Validasi dan analisis data turbin rotor tunggal	80
4.2 Simulasi Rotor ganda	82
4.2.1. Metode simulasi.....	82
4.2.2. Variabel penelitian.....	85
4.2.3. Tahapan pengambilan sampel	85
4.3 Desain Eksperimen.....	86
4.3.1. Pembuatan model <i>blade</i> dan layout pengujian.....	87
4.3.2. Setup eksperimen.....	87
4.3.3. Teknik pengumpulan data	94
4.3.4. Analisis data	95
4.4 Tempat dan Waktu Penelitian.....	97
Bab V. HASIL DAN PEMBAHASAN	98
5.1. Model Simulasi CFD Turbin Angin Rotor Tunggal (SRWT)....	98
5.1.1. Model simulasi CFD dan pemilihan model turbulen.....	98
5.1.2. Model analisis aerodinamika turbin angin rotor tunggal	100
5.1.3. Validasi model simulasi CFD turbin rotor tunggal.....	110
5.2. Eksperimen dan Validasi Model Simulasi CFD pada CRWT....	118
5.2.1. Pembuatan model <i>blade</i> CRWT untuk eksperimen.....	118
5.2.2. Prosedur eksperimen.....	119
5.2.3. Pra-Test CRWT	120
5.2.4. Hasil eksperimen CRWT	124
5.2.5. Pembuatan model simulasi CFD pada CRWT	128
5.2.6. Validasi model simulasi CFD pada SRWT dan CRWT	129
5.3. Performansi CRWT melalui Metode Simulasi CFD.....	135
5.3.1. Variabel penelitian CRWT	135
5.3.2. Kualitas Meshing CRWT	137
5.3.3. Performansi CRWT terhadap rasio diameter rotor	138
5.3.4. Performansi CRWT terhadap rasio jarak aksial rotor.....	145
5.4. Efek near wake terhadap performa CRWT	156
5.4.1. Efek near wake CRWT terhadap rasio diameter	156
5.4.2. Efek near wake CRWT terhadap rasio jarak aksial rotor	160
5.4.3. Visualisasi aliran pada CRWT dari terhadap <i>tip speed ratio</i>	164
5.4.4. Visualisasi aliran terhadap variasi rasio diameter dan rasio jarak	188
5.4.5. <i>Pathline</i> kecepatan aliran arah <i>downstream</i> pada CRWT	226
5.4.6. Visualisasi <i>vortex core</i> pada CRWT.....	231
5.4.7. Kontur tekanan statis arah <i>downstream</i> pada CRWT	233
5.5. Modifikasi Model <i>Blade</i> CRWT melalui Metode CFD	237
5.5.1. Geometri rotor CRWT dengan modifikasi <i>blade</i>	237
5.5.2. Meshing dan model turbulen	238
5.5.3. Performa CRWT terhadap variasi model <i>blade</i>	240

5.5.4. Visualisasi aliran dari hasil simulasi CFD model <i>blade</i> modifikasi	242
Bab VI. KESIMPULAN DAN SARAN	258
6.1. Kesimpulan	258
6.2. Saran	259
DAFTAR PUSTAKA	260
Lampiran A. Hukum Kekekalan Massa dan Momentum	266
Lampiran B. Kualitas Mesh Model CFD <i>Blade</i> Standard dan Modifikasi	283
Lampiran C. Kegiatan Eksperimen.....	286

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Turbin angin rotor ganda <i>counter-rotating</i> (Kubo dan Kanemoto, 2008).	11
Gambar 2.2.	Kondisi ideal kecepatan aksial aliran melewati tabung alir turbin angin rotor ganda, Chantharasenawong (2008).....	13
Gambar 2.3.	Hubungan koefisien daya turbin rotor ganda terhadap rasio induksi kecepatan aksial pada kondisi ideal, Chantharasenawong (2008).....	13
Gambar 2.4.	Konfigurasi rotor turbin angin terdiri dari dua <i>blade</i> rotor tunggal, empat <i>blade</i> rotor tunggal, dan dua <i>blade counter-rotating</i> (Lee dkk., 2010).	17
Gambar 2.5.	Distribusi kecepatan aliran melewati turbin angin dalam arah aksial (Lee dkk., 2010).....	17
Gambar 2.6.	Model aliran dalam metode BEM pada CRWT (Lee dkk., 2012).	17
Gambar 2.7.	Koefisien daya terhadap variasi rasio jari-jari rotor CRWT (Lee dkk., 2012).	18
Gambar 2.8.	Koefisien daya terhadap variasi rasio jarak aksial rotor CRWT (Lee dkk., 2013).	18
Gambar 2.9.	Kontur kecepatan aksial (kiri) dan kontur <i>vorticity</i> (kanan) SRWT dan CRWT pada TSR=6 dengan rasio jarak aksial rotor $d/R=0,5$ (Lee dkk., 2013).....	19
Gambar 2.10.	Skema konsep turbin angin dual rotor (Rosenberg dkk., 2014).	21
Gambar 2.11.	Kontur tekanan (kiri) dan kontur penambahan koefisien daya DRWT terhadap SRWT (kanan) pada dua rasio diameter berbeda (Rosenberg dkk., 2014).....	21
Gambar 2.12.	Kontur tekanan (kiri) dan kontur penambahan koefisien daya DRWT terhadap SRWT (kanan) pada dua rasio jarak berbeda (Rosenberg dkk., 2014).....	22
Gambar 2.13.	Studi secara eksperimen skala laboratorium melalui teknologi PIV (<i>Particle Image Velocimetry</i>) oleh Wang dkk. (2015). ...	23
Gambar 2.14.	Profil aliran dalam arah <i>streamline</i> pada CRWT dengan vektor (kiri) dan kontur (kanan) kecepatan rata-rata pada $TSR_1=3,6$ (Ozbay dkk., 2014b).	23
Gambar 2.15.	Profil aliran dalam arah <i>streamline</i> pada CRWT dengan kontur kontur <i>vorticity</i> (kiri) dan kontur <i>swirling strength</i> (kanan) pada $TSR_1=3,6$ (Ozbay dkk., 2014b).	24
Gambar 2.16.	Profil aliran dalam arah <i>streamline</i> pada SRWT (kiri) dan CRWT (kanan) kecepatan rata-rata pada angka $Re=1,2 \times 10^5$ (Wang dkk., 2015).	24

Gambar 2.17.	Profil aliran dalam arah <i>streamline</i> pada SRWT (kiri) dan CRWT (kanan) <i>turbulent kinetic energy</i> pada angka $Re=1,2 \times 10^5$ (Wang dkk., 2015).	24
Gambar 2.18.	Profil penurunan kecepatan dalam arah <i>streamline</i> pada CRWT, co-rotating, dan SRWT di dua lokasi <i>downstream</i> yang berbeda (Yuan dkk., 2014).	25
Gambar 2.19.	Model desain winglet pada <i>blade</i> turbin angin	26
Gambar 2.20.	(a) Geometri airfoil DU97-W-300 menggunakan vorteks generator, (b) mesh pada bagian airfoil yang terdapat vorteks generator (Gao dkk., 2015).	27
Gambar 2.21.	Konfigurasi vorteks generator pada <i>blade</i> turbin angin (a) counter rotasi dan ko-rotasi, (b) geometri vorteks generator (Gao dkk., 2015).	27
Gambar 3.1.	Volume kendali pada model <i>actuator disc</i> rotor turbin angin (Eggleston dan Stoddard, 1987).	40
Gambar 3.2.	Bentuk aliran menurut teori rotor disk turbin angin rotor tunggal (Eggleston dan Stoddard, 1987).	41
Gambar 3.3.	Gaya angkat dan gaya hambat pada airfoil.	44
Gambar 3.4.	Gaya angkat dan gaya hambat pada airfoil yang dilengkapi dengan komponen kecepatan.	45
Gambar 3.5.	Gaya angkat dan gaya hambat serta gaya normal dan gaya tangensial pada airfoil.	45
Gambar 3.6.	Diagram vektor kecepatan dan gaya-gaya pada airfoil <i>blade</i> rotor turbin angin <i>counter-rotating</i> .	46
Gambar 3.7.	Annular plane rotor turbin angin dalam teori BEM (Moriarty dan Hansen, 2005).	47
Gambar 3.8.	Bentuk aliran aksial menurut teori rotor disk rotor ganda (Newman, 1983).	52
Gambar 3.9.	Pengujian pada dua tingkat rotor turbin angin dengan prinsip <i>counter-rotating</i> dan <i>co-axial</i> (Ushiyama dkk., 1996).	52
Gambar 3.10.	Aplikasi turbin angin <i>counter-rotating</i> daya output 30 kW (Jung dkk., 2005).	53
Gambar 3.11.	Produksi energi tahunan turbin angin rotor tunggal dan rotor ganda (Shen dkk., 2007).	53
Gambar 3.12.	Profil kecepatan pada daerah <i>wake</i> dari turbin angin (Sanderse, 2009).	54
Gambar 3.13.	Kontur kecepatan arah aksial pada daerah <i>near wake</i> turbin angin rotor tunggal dari hasil simulasi CFD (Oggiano, 2014).	55
Gambar 3.14.	Profil <i>wake</i> horisontal pada posisi 1-D arah <i>downstream</i> untuk kondisi desain turbin angin pada TSR 6 dan kecepatan angin 10 m/s (Oggiano, 2014).	55
Gambar 3.15.	Profil aliran melewati airfoil pada tiga sudut serang yang berbeda.	56
Gambar 3.16.	Hubungan antara profil kecepatan aliran dan vortisitas pada aliran radial (Yulistiyanto, 2009).	56

Gambar 3.17.	Sistem vorteks pada <i>blade</i> atau sayap (Sanderse, 2009).....	57
Gambar 3.18.	Sistem vorteks pada rotor turbin dengan tiga <i>blade</i> (Sanderse, 2009).	58
Gambar 3.19.	Separasi aliran dalam arah radial pada <i>blade</i> turbin angin (Mo dan Lee, 2012).	59
Gambar 3.20.	Struktur Dasar Fluent (Fluent, 2017).....	64
Gambar 4.1.	Diagram alir penelitian.	68
Gambar 4.2.	Diagram alir simulasi rotor tunggal.	69
Gambar 4.3.	Geometri rotor <i>blade</i> turbin angin, satuan dalam meter.	71
Gambar 4.4.	Domain komputasi.	72
Gambar 4.5.	Distribusi <i>mesh node</i> arah aksial domain komputasi.....	73
Gambar 4.6.	Distribusi <i>mesh node</i> pada airfoil.	73
Gambar 4.7.	Distribusi <i>mesh node</i> pada sisi luar airfoil.	73
Gambar 4.8.	<i>Meshing</i> pada sepertiga domain menggunakan <i>software</i> <i>Gambit</i>	74
Gambar 4.9.	Hex mesh pada hub (kiri) dan tip <i>blade</i> (kanan).	74
Gambar 4.10.	Skema dan distribusi mesh pada domain komputasi model CFD turbin rotor tunggal melalui variasi <i>mesh ratio</i> dan jumlah <i>mesh node</i>	75
Gambar 4.11.	Monitoring residual selama proses iterasi.....	77
Gambar 4.12.	Monitoring tekanan statis melalui <i>integral</i> permukaan <i>blade</i> selama proses iterasi.	77
Gambar 4.13.	Kontur y^+ pada penambang <i>blade</i> turbin rotor tunggal melalui variasi jumlah <i>mesh node</i>	79
Gambar 4.14.	Hubungan koefisien daya dan <i>error</i> (terhadap hasil eksperimen) dari hasil uji independensi mesh pada model CFD turbin rotor tunggal melalui variasi jumlah <i>mesh node</i> . .	80
Gambar 4.15.	Grafik hubungan koefisien daya terhadap TSR rotor tunggal dari hasil eksperimen oleh Bartl dan Sætran (2017).....	82
Gambar 4.16.	Diagram alir simulasi rotor ganda.	83
Gambar 4.17.	Disain model <i>blade</i> yang dikembangkan dalam penelitian ini.	86
Gambar 4.18.	Tipe-tipe <i>stall</i> pada <i>blade</i> yang diidentifikasi oleh Sutrisno dkk (2016).	87
Gambar 4.19.	Skema pengujian turbin angin sumbu horisontal <i>counter- rotating</i>	88
Gambar 4.20.	Terowongan angin aliran subsonik sirkuit terbuka.....	89
Gambar 4.21.	Detail geometri terowongan angin, satuan dalam mm.	89
Gambar 4.22.	Detail geometri terowongan angin, satuan dalam mm.	89
Gambar 4.23.	Detail geometri sisi masuk terowongan angin (sarang tawon), satuan dalam mm.	90
Gambar 4.24.	Detail geometri pipa untuk sarang tawon, satuan dalam mm.	90
Gambar 4.25.	Skema seksi uji terowongan angin.	90
Gambar 4.26.	(a) Sisi inlet terowongan angin yang dilengkapi dengan sarang tawon, dan (b) sisi samping terowongan angin.	91
Gambar 4.27.	(a) seksi uji terowongan angin dan (b) Sisi blower.	91

Gambar 4.28.	Model CRWT (kiri) dan Diagram benda bebas komponen torsi yang bekerja pada poros CRWT (kanan).	92
Gambar 4.29.	(a) <i>Hot wire anemometer</i> , (b) <i>tachometer</i> , (c) timbangan digital, dan (d) <i>Capacitive proximity sensor</i>	94
Gambar 4.30.	(a) Rangkaian mikrokontroler Arduino Uno, (b) <i>Interface</i> computer, dan (c) Model turbin dan penempatan sensor pada seksi uji.	95
Gambar 4.31.	Diagram benda bebas gaya-gaya pada pengukuran torsi menggunakan metode <i>prony-type brake</i> (Hosman, 2012).	96
Gambar 4.32.	Proses pengukuran torsi menggunakan metode <i>prony-type brake</i>	96
Gambar 5.1.	Hubungan koefisien daya dan <i>tip speed ratio</i> terhadap model turbulen.	100
Gambar 5.2.	Kontur tekanan static pada penampang <i>blade</i> (98%, 50%, dan 20 % jari-jari rotor) untuk TSR=3, 6, dan 10 dengan model turbulen <i>k – ε realizable</i>	101
Gambar 5.3.	Kontur resultan kecepatan aliran pada <i>blade</i> (98%, 50%, dan 20 % jari-jari rotor) untuk TSR=3 dengan model turbulen <i>k – ε realizable</i>	102
Gambar 5.4.	Kontur resultan kecepatan aliran pada <i>blade</i> (98%, 50%, dan 20 % jari-jari rotor) untuk TSR=6 dengan model turbulen <i>k – ε realizable</i>	103
Gambar 5.5.	Kontur resultan kecepatan aliran pada <i>blade</i> (98%, 50%, dan 20 % jari-jari rotor) untuk TSR=10 dengan model turbulen <i>k – ε realizable</i>	104
Gambar 5.6.	Domain komputasi dengan kondisi batas pada Y–Z <i>plane</i> dalam analisis profil kecepatan pada garis vertikal sejajar <i>blade</i> (garis putus-putus berwarna merah) di beberapa posisi Z/D ke arah <i>downstream</i>	105
Gambar 5.7.	Profil resultan kecepatan sepanjang sebuah garis vertikal sejajar <i>blade</i> ke arah <i>downstream</i> pada TSR=3 dengan model turbulen <i>k–ε realizable</i>	106
Gambar 5.8.	Profil kecepatan sepanjang sebuah garis horisontal sejajar <i>blade</i> ke arah <i>downstream</i> pada TSR=6 model turbulen <i>k–ε realizable</i>	106
Gambar 5.9.	Profil kecepatan sepanjang sebuah garis horisontal sejajar <i>blade</i> ke arah <i>downstream</i> pada TSR=10 model turbulen <i>k–ε realizable</i>	107
Gambar 5.10.	Vektor kecepatan aliran melewati tip <i>blade</i> rotor tunggal dari hasil simulasi CFD model turbulen <i>k–ε realizable</i>	108
Gambar 5.11.	Vektor kecepatan aliran melewati hub <i>blade</i> rotor tunggal dari hasil simulasi CFD model turbulen <i>k–ε realizable</i>	109
Gambar 5.12.	Hubungan koefisien daya terhadap TSR rotor tunggal dari hasil simulasi CFD dan eksperimen, <i>Measured data</i> : (Bartl dan Sætran, 2017).	112

Gambar 5.13.	Kontur resultan kecepatan aliran dalam arah aksial ke arah downstream untuk TSR=3 dengan putaran rotor 728 rpm (atas) dan 1396 rpm (bawah).....	113
Gambar 5.14.	Kontur resultan kecepatan aliran dalam arah aksial ke arah downstream untuk TSR=6 dengan putaran rotor 728 rpm (atas) dan 1396 rpm (bawah).....	114
Gambar 5.15.	Kontur resultan kecepatan aliran dalam arah aksial ke arah downstream untuk TSR=10 dengan putaran rotor 728 rpm (atas) dan 1396 rpm (bawah).....	115
Gambar 5.16.	Kontur resultan kecepatan aliran pada penampang <i>blade</i> (dari kiri, 98%, 50%, dan 20 % jari-jari rotor) untuk TSR=6 dari hasil simulasi CFD dengan putaran rotor 728 rpm.....	116
Gambar 5.17.	Kontur resultan kecepatan aliran pada penampang <i>blade</i> (dari kiri, 98%, 50%, dan 20 % jari-jari rotor) untuk TSR=6 dari hasil simulasi CFD putaran rotor 1396 rpm.....	117
Gambar 5.18.	Model <i>blade</i> turbin angin CRWT.....	118
Gambar 5.19.	Karakteristik kecepatan angin pada seksi uji terowongan angin yang digunakan dengan tiga posisi horizontal yang berbeda, (A) posisi kiri, (B) posisi kiri, dan (C) posisi tengah.....	121
Gambar 5.20.	Hasil pengujian alat ukur yang dibandingkan dengan alat ukur standar, (a) timbangan untuk pengukuran beban dan (b) sensor proximity untuk pengukuran putaran rotor.	121
Gambar 5.21.	Proses pengukuran torsi menggunakan metode <i>prony-type brake</i>	122
Gambar 5.22.	Hasil <i>deceleration test</i> untuk putaran rotor depan (D_1) dan rotor belakang (D_2).	123
Gambar 5.23.	Hasil <i>deceleration test</i> dari rotor depan (D_1) dan rotor belakang (D_2) berdasarkan: (a) perlambatan sudut dan (b) kerugian torsi.....	123
Gambar 5.24.	Hubungan angka Reynolds terhadap <i>tip speed ratio</i> untuk beberapa kecepatan angin, (a) rotor tunggal, (b) rotor depan, dan (c) rotor belakang.....	125
Gambar 5.25.	Hubungan putaran rotor terhadap <i>tip speed ratio</i> untuk beberapa kecepatan angin, (a) rotor tunggal, (b) rotor depan, dan (c) rotor belakang.....	126
Gambar 5.26.	Hubungan koefisien daya turbin terhadap <i>tip speed ratio</i> (TSR) untuk beberapa kecepatan angin, (a) rotor tunggal, (b) rotor depan, dan (c) rotor belakang.....	127
Gambar 5.27.	Hubungan koefisien daya turbin CRWT terhadap <i>tip speed ratio</i> untuk beberapa kecepatan angin.	128
Gambar 5.28.	Meshing dan domain komputasi CRWT, $R=0.472$ m.	129
Gambar 5.29.	Mesh pada permukaan <i>blade</i> , slip wall dan sisi periodik pada simulasi CRWT.....	129
Gambar 5.30.	Hubungan koefisien daya terhadap <i>tip speed ratio</i> SRWT dari hasil eksperimen dan simulasi CFD.	130

Gambar 5.31.	Hubungan koefisien daya terhadap <i>tip speed ratio</i> rotor depan dari hasil eksperimen dan simulasi CFD.	131
Gambar 5.32.	Hubungan koefisien daya terhadap <i>tip speed ratio</i> rotor belakang dari hasil eksperimen dan simulasi CFD.	132
Gambar 5.33.	Hubungan koefisien daya terhadap <i>tip speed ratio</i> CRWT dari hasil eksperimen dan simulasi CFD.	132
Gambar 5.34.	Hubungan koefisien daya terhadap <i>tip speed ratio</i> rotor depan dari hasil eksperimen dan simulasi CFD.	133
Gambar 5.35.	Hubungan koefisien daya terhadap <i>tip speed ratio</i> rotor belakang dari hasil eksperimen dan simulasi CFD.	133
Gambar 5.36.	Hubungan koefisien daya terhadap <i>tip speed ratio</i> CRWT dari hasil eksperimen dan simulasi CFD.	134
Gambar 5.37.	Perbandingan peningkatan performa rotor depan, rotor belakang, dan CRWT terhadap turbin rotor tunggal dari hasil eksperimen dan hasil simulasi CFD.	135
Gambar 5.38.	Performa rotor depan, rotor belakang, dan CRWT terhadap turbin rotor tunggal dari hasil eksperimen dan hasil simulasi CFD melalui normalisasi koefisien daya pada TSR yang sama.	135
Gambar 5.39.	Meshing hub dan <i>blade</i> pada ratio diameter rotor $D_1/D_2=0,5$; $D_1/D_2=1,0$; dan $D_1/D_2=1,5$ pada simulasi CRWT.	137
Gambar 5.40.	Perbandingan koefisien daya CRWT terhadap SRWT dengan rasio diameter rotor $D_1/D_2=0,5$ atau DR_1 pada rasio jarak $L/D_1=0,25$	139
Gambar 5.41.	Perbandingan koefisien daya CRWT terhadap SRWT dengan rasio diameter rotor $D_1/D_2=0,75$ atau DR_2 pada rasio jarak $L/D_1=0,25$	140
Gambar 5.42.	Perbandingan koefisien daya CRWT terhadap SRWT dengan variasi rasio diameter rotor $D_1/D_2=1,0$ atau DR_3 pada rasio jarak $L/D_1=0,25$	140
Gambar 5.43.	Perbandingan koefisien daya CRWT terhadap SRWT dengan rasio diameter rotor $D_1/D_2=1,25$ atau DR_4 pada rasio jarak $L/D_1=0,25$	141
Gambar 5.44.	Perbandingan koefisien daya CRWT terhadap SRWT dengan variasi rasio diameter rotor $D_1/D_2=1,5$ atau DR_5 pada rasio jarak $L/D_1=0,25$	141
Gambar 5.45.	Normalisasi koefisien daya total dan maksimum dari CRWT terhadap SRWT melalui variasi rasio diameter rotor pada rasio jarak $L/D_1=0,25$	142
Gambar 5.46.	Koefisien daya rotor depan, rotor belakang, dan CRWT terhadap SRWT melalui variasi rasio diameter rotor pada rasio jarak $L/D_1=0,25$ dan $TSR_1=3$	143
Gambar 5.47.	Koefisien daya rotor depan, rotor belakang, dan CRWT terhadap SRWT melalui variasi rasio diameter rotor pada rasio jarak $L/D_1=0,25$ dan $TSR_1=6$	144

Gambar 5.48.	Koefisien daya rotor depan, rotor belakang, dan CRWT terhadap SRWT melalui variasi rasio diameter rotor pada rasio jarak $L/D_1=0,25$ dan $TSR_1=10$.	144
Gambar 5.49.	Perbandingan koefisien daya CRWT dan SRWT terhadap <i>tip speed ratio</i> melalui variasi rasio jarak aksial rotor dengan rasio diameter, $D_1/D_2=1,0$.	147
Gambar 5.50.	Peningkatan koefisien daya total dan koefisien daya maksimum CRWT terhadap SRWT melalui variasi rasio jarak rotor dengan rasio diameter $D_1/D_2=1,0$.	148
Gambar 5.51.	Normalisasi koefisien daya total rotor depan dan rotor belakang terhadap SRWT dengan variasi rasio jarak rotor pada rasio diameter rotor $D_1/D_2=0,5$.	149
Gambar 5.52.	Normalisasi koefisien daya total dan koefisien daya maksimum CRWT terhadap SRWT dengan variasi rasio jarak rotor pada rasio diameter rotor $D_1/D_2=0,5$.	149
Gambar 5.53.	Koefisien daya CRWT terhadap variasi rasio jarak aksial rotor dengan rasio diameter, $D_1/D_2=0,5$ pada $TSR=3, 6$, dan 10 .	150
Gambar 5.54.	Koefisien daya CRWT terhadap variasi rasio jarak aksial rotor dengan rasio diameter, $D_1/D_2=1,0$ pada $TSR_1=3, 6$, dan 10 .	151
Gambar 5.55.	Rata-rata normalisasi koefisien daya rotor depan, rotor belakang, dan CRWT terhadap SRWT melalui variasi rasio diameter dan rasio jarak rotor.	153
Gambar 5.56.	Normalisasi koefisien daya rotor depan terhadap SRWT melalui variasi rasio diameter dan rasio jarak rotor.	154
Gambar 5.57.	Normalisasi koefisien daya rotor belakang terhadap SRWT melalui variasi rasio diameter dan rasio jarak rotor.	155
Gambar 5.58.	Normalisasi koefisien daya CRWT terhadap SRWT melalui variasi rasio diameter dan rasio jarak rotor.	155
Gambar 5.59.	Profil resultan kecepatan (kiri) distribusi <i>turbulent kinetic energy</i> (kanan) sepanjang garis vertikal dalam arah <i>streamwise</i> terhadap rasio diameter di posisi <i>downstream</i> $Z/D=0,15$ pada $TSR_1=6$ dengan rasio jarak rotor $L/D_1=0,25$.	157
Gambar 5.60.	Profil resultan kecepatan (kiri) distribusi <i>turbulent kinetic energy</i> (kanan) sepanjang garis vertikal dalam arah <i>streamwise</i> terhadap rasio diameter di posisi <i>downstream</i> $Z/D=0,35$ pada $TSR_1=6$ dengan rasio jarak rotor $L/D_1=0,25$.	158
Gambar 5.61.	Profil resultan kecepatan (kiri) distribusi <i>turbulent kinetic energy</i> (kanan) sepanjang garis vertikal dalam arah <i>streamwise</i> terhadap rasio diameter di posisi <i>downstream</i> $Z/D=0,65$ pada $TSR_1=6$ dengan rasio jarak rotor $L/D_1=0,25$.	158
Gambar 5.62.	Penurunan kecepatan tertinggi dalam arah <i>streamwise</i> dari rotor CRWT dengan variasi rasio diameter terhadap SRWT pada rasio jarak rotor $L/D_1=0,25$.	159

Gambar 5.63.	Profil resultan kecepatan (kiri) distribusi <i>turbulent kinetic energy</i> (kanan) sepanjang garis vertikal dalam arah <i>streamwise</i> terhadap SRWT di posisi beberapa <i>downstream</i> pada konsisi TSR=6.	161
Gambar 5.64.	Profil resultan kecepatan (kiri) distribusi <i>turbulent kinetic energy</i> (kanan) sepanjang garis vertikal dalam arah <i>streamwise</i> terhadap rotor CRWT ($L/D_1=0.25$) di posisi <i>downstream</i> pada $TSR_1=6$ dengan rasio diameter rotor $D_1/D_2=1,0$	162
Gambar 5.65.	Profil resultan kecepatan (kiri) distribusi <i>turbulent kinetic energy</i> (kanan) sepanjang garis vertikal dalam arah <i>streamwise</i> terhadap rotor CRWT ($L/D_1=0.5$) di posisi <i>downstream</i> pada $TSR_1=6$ dengan rasio diameter rotor $D_1/D_2=1,0$	163
Gambar 5.66.	Penurunan kecepatan tertinggi dalam arah <i>streamwise</i> dari rotor CRWT dengan variasi rasio jarak terhadap SRWT CRWT untuk konsisi <i>peak performance</i> ($TSR_1=6$) dengan rasio diameter rotor $D_1/D_2=1,0$	164
Gambar 5.67.	(a) Kontur kecepatan aksial dalam iso garis kecepatan dan (b) kontur <i>turbulent kinetic energy</i> pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=1,0$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,25$ ($TSR_1=1$).	167
Gambar 5.68.	(a) Kontur kecepatan aksial dalam iso garis kecepatan dan (b) kontur <i>turbulent kinetic energy</i> pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=1,0$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,25$ ($TSR_1=3$).	168
Gambar 5.69.	(a) Kontur kecepatan aksial dalam iso garis kecepatan dan (b) kontur <i>turbulent kinetic energy</i> pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=1,0$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,25$ ($TSR_1=6$).	169
Gambar 5.70.	(a) Kontur kecepatan aksial dalam iso garis kecepatan dan (b) kontur <i>turbulent kinetic energy</i> pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=1,0$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,25$ ($TSR_1=8$).	170
Gambar 5.71.	(a) Kontur kecepatan aksial dalam iso garis kecepatan dan (b) kontur <i>turbulent kinetic energy</i> pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=1,0$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,25$ ($TSR_1=10$). ...	171
Gambar 5.72.	Kontur <i>vorticity</i> pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=1,0$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,25$ (a) $TSR_1=1$ dan (b) $TSR_1=3$. .	172
Gambar 5.73.	Kontur <i>vorticity</i> pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=1,0$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,25$ (a) $TSR_1=6$ dan (b) $TSR_1=10$. .	173
Gambar 5.74.	Vektor resultan kecepatan di tip <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=1,0$ dan $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=1$ dan $TSR_2=0,6$	175
Gambar 5.75.	Vektor resultan kecepatan di tip <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=1,0$ dan $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=3$ dan $TSR_2=1,8$	176
Gambar 5.76.	Vektor resultan kecepatan di tip <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=1,0$ dan $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=6$ dan $TSR_2=3,6$	177

Gambar 5.77.	Vektor resultan kecepatan di tip <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=1,0$ dan $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=10$	178
Gambar 5.78.	Vektor resultan kecepatan di hub <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=1,0$ dan $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=1$ dan $TSR_2=0,6$	179
Gambar 5.79.	Vektor resultan kecepatan di hub <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=1,0$ dan $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=3$ dan $TSR_2=1,8$	180
Gambar 5.80.	Vektor resultan kecepatan di hub <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=1,0$ dan $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=6$ dan $TSR_2=3,6$	181
Gambar 5.81.	Vektor resultan kecepatan di hub <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=1,0$ dan $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=10$	182
Gambar 5.82.	Kontur kecepatan di tiga posisi penampang melintang <i>blade</i> rotor CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=1,0$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=2$	183
Gambar 5.83.	Kontur kecepatan di tiga posisi penampang melintang <i>blade</i> rotor CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=1,0$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=3$	184
Gambar 5.84.	Kontur kecepatan di tiga posisi penampang melintang <i>blade</i> rotor CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=1,0$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=4$	185
Gambar 5.85.	Kontur kecepatan di tiga posisi penampang melintang <i>blade</i> rotor CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=1,0$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=6$	186
Gambar 5.86.	Kontur kecepatan di tiga posisi penampang melintang <i>blade</i> rotor CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=1,0$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=8$	187
Gambar 5.87.	Kontur kecepatan di tiga posisi penampang melintang <i>blade</i> rotor CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=1,0$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=10$	188
Gambar 5.88.	(a) Kontur kecepatan aksial dalam iso garis kecepatan dan (b) kontur <i>turbulent kinetic energy</i> pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=0,5$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,25$ ($TSR_1=6$).	190
Gambar 5.89.	Kontur <i>vorticity</i> pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=0,5$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,25$ ($TSR_1=6$).	191
Gambar 5.90.	(a) Kontur kecepatan aksial dalam iso garis kecepatan dan (b) kontur <i>turbulent kinetic energy</i> pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=0,5$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,5$ ($TSR_1=6$).	192
Gambar 5.91.	(a) Kontur kecepatan aksial dalam iso garis kecepatan dan (b) kontur <i>turbulent kinetic energy</i> pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=0,5$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,75$ ($TSR_1=6$).	193
Gambar 5.92.	Kontur <i>vorticity</i> pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=0,5$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,5$ ($TSR_1=6$).	194

Gambar 5.93.	Kontur vorticity pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=0,5$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,75$ ($TSR_1=6$).	194
Gambar 5.94.	(a) Kontur kecepatan aksial dalam iso garis kecepatan dan (b) kontur <i>turbulent kinetic energy</i> pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=0,75$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,25$ ($TSR_1=6$)...	196
Gambar 5.95.	Kontur vorticity pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=0,75$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,25$ ($TSR_1=6$).....	197
Gambar 5.96.	Kontur vorticity pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=1,0$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,25$ ($TSR_1=6$).	197
Gambar 5.97.	(a) Kontur kecepatan aksial dalam iso garis kecepatan dan (b) kontur <i>turbulent kinetic energy</i> pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=1,0$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,25$ ($TSR_1=6$).....	199
Gambar 5.98.	(a) Kontur kecepatan aksial dalam iso garis kecepatan dan (b) kontur <i>turbulent kinetic energy</i> pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=1,0$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,5$ ($TSR_1=6$).....	200
Gambar 5.99.	(a) Kontur kecepatan aksial dalam iso garis kecepatan dan (b) kontur <i>turbulent kinetic energy</i> pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=1,0$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,75$ ($TSR_1=6$).....	201
Gambar 5.100.	Kontur vorticity pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=1,5$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,5$ ($TSR_1=6$).	202
Gambar 5.101.	Kontur vorticity pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=1,0$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,75$ ($TSR_1=6$).	202
Gambar 5.102.	(a) Kontur kecepatan aksial dalam iso garis kecepatan dan (b) kontur <i>turbulent kinetic energy</i> pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=1,25$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,25$ ($TSR_1=6$)...	204
Gambar 5.103.	(a) Kontur kecepatan aksial dalam iso garis kecepatan dan (b) kontur <i>turbulent kinetic energy</i> pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=1,5$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,25$ ($TSR_1=6$).....	205
Gambar 5.104.	Kontur vorticity pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=1,25$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,25$ ($TSR_1=6$).....	206
Gambar 5.105.	Kontur vorticity pada CRWT dengan rasio diameter $D_1/D_2=1,5$ dan rasio jarak, $L/D_1=0,25$ ($TSR_1=6$).	206
Gambar 5.106.	Vektor resultan kecepatan di hub <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=0,5$ dan $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=3$	208
Gambar 5.107.	Vektor resultan kecepatan di hub <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=0,5$ dan $L/D_1=0,5$ pada $TSR_1=3$	209
Gambar 5.108.	Vektor resultan kecepatan di hub <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=0,5$ dan $L/D_1=0,75$ pada $TSR_1=3$	210
Gambar 5.109.	Vektor resultan kecepatan di hub <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=0,75$ dan $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=3$	211

Gambar 5.110. Vektor resultan kecepatan di hub <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=1,0$ dan $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=3$.	212
Gambar 5.111. Vektor resultan kecepatan di hub <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=1,0$ dan $L/D_1=0,5$ pada $TSR_1=3$.	213
Gambar 5.112. Vektor resultan kecepatan di hub <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=1,0$ dan $L/D_1=0,75$ pada $TSR_1=3$.	214
Gambar 5.113. Vektor resultan kecepatan di hub <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=1,25$ dan $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=3$.	215
Gambar 5.114. Vektor resultan kecepatan di hub <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=1,5$ dan $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=3$.	216
Gambar 5.115. Vektor resultan kecepatan di tip <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=0,5$ dan $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=10$.	217
Gambar 5.116. Vektor resultan kecepatan di tip <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=0,5$ dan $L/D_1=0,5$ pada $TSR_1=10$.	218
Gambar 5.117. Vektor resultan kecepatan di tip <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=0,5$ dan $L/D_1=0,75$ pada $TSR_1=10$.	219
Gambar 5.118. Vektor resultan kecepatan di tip <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=0,75$ dan $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=10$.	220
Gambar 5.119. Vektor resultan kecepatan di tip <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=1,0$ dan $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=10$.	221
Gambar 5.120. Vektor resultan kecepatan di tip <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=1,0$ dan $L/D_1=0,5$ pada $TSR_1=10$.	222
Gambar 5.121. Vektor resultan kecepatan di tip <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=1,0$ dan $L/D_1=0,75$ pada $TSR_1=10$.	223
Gambar 5.122. Vektor resultan kecepatan di tip <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=1,25$ dan $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=10$.	224
Gambar 5.123. Vektor resultan kecepatan di tip <i>blade</i> dari rotor depan (atas) dan rotor belakang (bawah) untuk $D_1/D_2=1,5$ dan $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=10$.	225
Gambar 5.124. <i>Pathline</i> kecepatan di hub <i>blade</i> dari hasil simulasi CFD rotor CRWT ($L/D_1=0,25$) terhadap variasi diameter rotor pada $TSR_1=3$.	227

Gambar 5.125. <i>Pathline</i> resultan kecepatan di hub <i>blade</i> dari hasil simulasi CFD rotor CRWT ($D_1/D_2=1,0$) terhadap variasi jarak rotor pada $TSR_1=3$	228
Gambar 5.126. <i>Pathline</i> resultan kecepatan di tip <i>blade</i> dari hasil simulasi CFD rotor CRWT ($L/D_1=0,25$) terhadap variasi diameter rotor pada $TSR_1=10$	229
Gambar 5.127. <i>Pathline</i> resultan kecepatan di tip <i>blade</i> dari hasil simulasi CFD rotor CRWT ($D_1/D_2=1,0$) terhadap variasi jarak rotor pada $TSR_1=10$	230
Gambar 5.128. Visualisasi <i>vortex core</i> dari hasil simulasi CFD rotor CRWT ($L/D_1=0,25$) terhadap variasi diameter rotor pada $TSR_1=3$	231
Gambar 5.129. Visualisasi <i>vortex core</i> dari hasil simulasi CFD rotor CRWT ($L/D_1=0,25$) terhadap variasi diameter rotor pada $TSR_1=6$	232
Gambar 5.130. Visualisasi <i>vortex core</i> dari hasil simulasi CFD rotor CRWT ($L/D_1=0,25$) terhadap variasi diameter rotor pada $TSR_1=10$. .	233
Gambar 5.131. Kontur tekanan statis pada penampang melintang dari beberapa posisi arah <i>downstream</i> CRWT ($D_1/D_2=0,5$ dan $L/D_1=0,25$) untuk kondisi $TSR_1=6$	235
Gambar 5.132. Kontur tekanan statis pada penampang melintang dari beberapa posisi arah <i>downstream</i> CRWT ($D_1/D_2=1,0$ dan $L/D_1=0,25$) untuk kondisi $TSR_1=6$	235
Gambar 5.133. Kontur tekanan statis pada penampang melintang dari beberapa posisi arah <i>downstream</i> CRWT ($D_1/D_2=1,5$ dan $L/D_1=0,25$) untuk kondisi $TSR_1=6$	236
Gambar 5.134. Kontur tekanan statis pada penampang melintang dari beberapa posisi arah <i>downstream</i> CRWT ($D_1/D_2=1,0$ dan $L/D_1=0,5$) untuk kondisi $TSR_1=6$	236
Gambar 5.135. Kontur tekanan statis pada penampang melintang dari beberapa posisi arah <i>downstream</i> CRWT ($D_1/D_2=1,0$ dan $L/D_1=0,75$) untuk kondisi $TSR_1=6$	237
Gambar 5.136. Detail geometri vorteks generator.	238
Gambar 5.137. Geometri winglet.	238
Gambar 5.138. Tetrahedral meshing di sekitar penampang <i>blade</i> pada model simulasi CFD.	239
Gambar 5.139. <i>Tetrahedral meshing</i> pada domain komputasi.	239
Gambar 5.140. Koefisien daya CRWT melalui variasi model <i>blade</i> dengan rasio diameter, $D_1/D_2=1,0$ dan rasio jarak $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=3$	241
Gambar 5.141. Koefisien daya CRWT melalui variasi model <i>blade</i> dengan rasio diameter, $D_1/D_2=1,0$ dan rasio jarak $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=6$	241
Gambar 5.142. Koefisien daya CRWT melalui variasi model <i>blade</i> dengan rasio diameter, $D_1/D_2=1,0$ dan rasio jarak $L/D_1=0,25$ pada $TSR_1=10$	242
Gambar 5.143. Kontur kecepatan aksial dan <i>turbulent kinetic energy</i> dalam arah <i>streamwise</i> untuk model <i>blade</i> standar pada $TSR_1=6$	243

Gambar 5.144. Kontur kecepatan aksial dan <i>turbulent kinetic energy</i> dalam arah <i>streamwise</i> untuk model <i>blade</i> dengan vorteks generator pada $TSR_1=6$	244
Gambar 5.145. Kontur kecepatan aksial dan <i>turbulent kinetic energy</i> dalam arah <i>streamwise</i> untuk model <i>blade</i> dengan winglet pada $TSR_1=6$	245
Gambar 5.146. Kontur <i>vorticity</i> aksial dalam arah <i>streamwise</i> untuk model <i>blade</i> standar pada $TSR_1=6$	246
Gambar 5.147. Kontur <i>vorticity</i> aksial dalam arah <i>streamwise</i> untuk model <i>blade</i> dengan vorteks generator pada $TSR_1=6$	246
Gambar 5.148. Kontur <i>vorticity</i> aksial dalam arah <i>streamwise</i> untuk model <i>blade</i> dengan winglet pada $TSR_1=6$	247
Gambar 5.149. Vektor kecepatan dalam arah <i>streamwise</i> di daerah hub rotor depan dan rotor belakang untuk model <i>blade</i> standar pada $TSR_1=3$	249
Gambar 5.150. Vektor kecepatan dalam arah <i>streamwise</i> di daerah hub rotor depan dan rotor belakang untuk model <i>blade</i> dengan vorteks generator pada $TSR_1=3$	250
Gambar 5.151. Vektor kecepatan dalam arah <i>streamwise</i> di daerah hub rotor depan dan rotor belakang untuk model <i>blade</i> dengan winglet pada $TSR_1=3$	251
Gambar 5.152. <i>Pathline</i> resultan kecepatan di hub <i>blade</i> dari hasil simulasi CFD rotor CRWT ($D_1/D_2=1,0$ dan $L/D_1=0,25$) terhadap variasi model <i>blade</i> pada $TSR_1=3$	252
Gambar 5.153. <i>Pathline</i> resultan kecepatan di tip <i>blade</i> dari hasil simulasi CFD rotor CRWT ($D_1/D_2=1,0$ dan $L/D_1=0,25$) terhadap variasi model <i>blade</i> pada $TSR_1=6$	253
Gambar 5.154. <i>Pathline</i> resultan kecepatan di tip <i>blade</i> dari hasil simulasi CFD rotor CRWT ($D_1/D_2=1,0$ dan $L/D_1=0,25$) terhadap variasi model <i>blade</i> pada $TSR_1=10$	254
Gambar 5.155. Visualisasi <i>vortex core</i> dari hasil simulasi CFD rotor CRWT dengan <i>blade</i> standar, winglet, dan vorteks generator pada $TSR_1=6$	255
Gambar 5.156. Kontur tekanan statis pada penampang melintang dari beberapa posisi arah <i>downstream</i> CRWT (<i>blade</i> standar) untuk kondisi $TSR_1=6$	256
Gambar 5.157. Kontur tekanan statis pada penampang melintang dari beberapa posisi arah <i>downstream</i> CRWT (<i>blade</i> dengan <i>winglet</i>) untuk kondisi $TSR_1=6$	257
Gambar 5.158. Kontur tekanan statis pada penampang melintang dari beberapa posisi arah <i>downstream</i> CRWT (<i>blade</i> dengan vorteks generator) untuk kondisi $TSR_1=6$	257

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Parameter geometri <i>winglet</i> yang divariasikan pada turbin rotor tunggal.....	26
Tabel 2.2	Parameter vorteks generator pada <i>blade</i> turbin angin.	26
Tabel 2.3.	Deskripsi publikasi penelitian turbin angin <i>counter-rotating</i>	28
Tabel 3.1.	Metode analisis performa HAWT	39
Table 4.1	Data Geometri <i>blade</i>	70
Table 4.2.	Informasi jumlah mesh model CFD turbin rotor tunggal.	74
Tabel 4.3.	<i>Mesh Metrics</i>	74
Tabel 4.4.	Uji independensi mesh model CFD turbin rotor tunggal melalui variasi distribusi dan jumlah <i>mesh node</i>	78
Tabel 4.5.	Hasil prediksi CFD, torsi rotor dan koefisien daya turbin rotor tunggal	78
Table 4.6.	Data performa turbin rotor tunggal dari hasil eksperimen oleh Bartl dan Sætran (2017).	81
Table 4.7	Variabel rasio diameter rotor CRWT.	85
Table 4.8.	Variabel rasio jarak aksial rotor menggunakan rasio diameter dengan performa terbaik.	85
Tabel 4.9.	Fungsi dan spesifikasi alat ukur dan sensor yang digunakan dalam penelitian.....	93
Table 5.1	<i>Error</i> (RMSE) dari hasil rotor tunggal simulasi CFD terhadap eksperimen (Bartl dan Sætran, 2017).	112
Tabel 5.2.	Variabel rasio diameter rotor	136
Tabel 5.3.	Variable rasio jarak aksial rotor	137
Tabel 5.4.	Kualitas meshing pada model simulasi CFD	138
Tabel 5.5.	Performansi CRWT terhadap variasi rasio diameter dan rasio jarak rotor pada TSR=3, 6, 10, dan total TSR (1–10).	152
Table 5.6.	Posisi penampang melintang arah aksial.	234
Table 5.7.	Informasi jumlah mesh dari model CFD turbin CRWT dengan <i>blade</i> modifikasi.	239