KAJIAN AERODINAMIKA TURBIN ANGIN ROTOR GANDA COUNTER-ROTATING POROS HORISONTAL TIPE PROPELER TIGA BLADE
VERDY A KOEHUAN, Prof. Ir. Samsul Kamal, M.Sc., Ph.D.; Dr. Sugiyono, S.T., M.T.
Universitas Gadjah Mada, 2019 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

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
ABSTRACT 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 *Counter-rotating Wind Turbine* 11
2.2. Aerodinamika Turbin Angin *Counter-rotating* 15
2.3. Modifikasi *Blade* Turbin Angin Rotor Tunggal 25
2.3.1. Winglet 25
2.3.2. Vortex generator 26
2.4. Jalan Penelitian Turbin Angin *Counter-rotating* 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 *Blade* Turbin Angin 44
3.3. Metode *Blade Element Momentum* (BEM) 46
3.4. Turbin Angin Rotor Ganda *Counter-Rotating* 51
3.5. Near Wake 54
3.6. *Computational Fluid Dynamic* 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 *blade* 67
4.1.2. Model numerik 71
4.1.3. Kondisi batas 71

UNIVERSITAS GADJAH MADA
KAJIAN AERODINAMIKA TURBIN ANGIN ROTOR GANDA COUNTER-ROTATING POROS HORISONTAL TIPE PROPELER TIGA BLADE
VERDY A KOEHUAN, Prof. Ir. Samsul Kamal, M.Sc., Ph.D.; Dr. Sugiyono, S.T., M.T.
Universitas Gadjah Mada, 2019 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

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 *blade* 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 *blade* 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 *tip speed ratio* 164
5.4.4. Visualisasi aliran terhadap variasi rasio diameter dan rasio jarak 188
5.4.5. *Pathline* kecepatan aliran arah *downstream* pada CRWT 226
5.4.6. Visualisasi *vortex core* pada CRWT 231
5.4.7. Kontur tekanan statis arah *downstream* pada CRWT 233
5.5. Modifikasi Model *Blade* CRWT melalui Metode CFD 237
5.5.1. Geometri rotor CRWT dengan modifikasi *blade* 237
5.5.2. Meshing dan model turbulen 238
5.5.3. Performa CRWT terhadap variasi model *blade* 240

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KAJIAN AERODINAMIKA TURBIN ANGIN ROTOR GANDA COUNTER-ROTATING POROS HORISONTAL TIPE PROPELER TIGA BLADE
VERDY A KOEHUAN, Prof. Ir. Samsul Kamal, M.Sc., Ph.D.; Dr. Sugiyono, S.T., M.T.
Universitas Gadjah Mada, 2019 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

5.5.4. Visualisasi aliran dari hasil simulasi CFD model *blade* 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 *Blade* Standard dan Modifikasi 283
Lampiran C. Kegiatan Eksperimen..... 286

KAJIAN AERODINAMIKA TURBIN ANGIN ROTOR GANDA COUNTER-ROTATING POROS HORISONTAL TIPE PROPELER TIGA BLADE
VERDY A KOEHUAN, Prof. Ir. Samsul Kamal, M.Sc., Ph.D.; Dr. Sugiyono, S.T., M.T.
Universitas Gadjah Mada, 2019 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Turbin angin rotor ganda *counter-rotating* (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 *blade* rotor tunggal, empat *blade* rotor tunggal, dan dua blale *counter-rotating* (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 *vorticity* (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 (*Particle Image Velocimetry*) oleh Wang dkk. (2015). ... 23
Gambar 2.14. Profil aliran dalam arah *streamline* 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 *streamline* pada CRWT dengan kontur kontur *vorticity* (kiri) dan kontur *swirling strength* (kanan) pada TSR_1=3,6 (Ozbay dkk., 2014b). 24
Gambar 2.16. Profil aliran dalam arah *streamline* pada SRWT (kiri) dan CRWT (kanan) kecepatan rata-rata pada angka Re=1,2 x 10^5 (Wang dkk., 2015). 24

UNIVERSITAS GADJAH MADA
KAJIAN AERODINAMIKA TURBIN ANGIN ROTOR GANDA COUNTER-ROTATING POROS HORISONTAL TIPE PROPELER TIGA BLADE
VERDY A KOEHUAN, Prof. Ir. Samsul Kamal, M.Sc., Ph.D.; Dr. Sugiyono, S.T., M.T.
Universitas Gadjah Mada, 2019 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 2.17. Profil aliran dalam arah *streamline* pada SRWT (kiri) dan CRWT (kanan) *turbulent kinetic energy* pada angka Re=1,2 x 10^5 (Wang dkk., 2015). 24
Gambar 2.18. Profil penurunan kecepatan dalam arah *streamline* pada CRWT, co-rotating, dan SRWT di dua lokasi *downstream* yang berbeda (Yuan dkk., 2014). 25
Gambar 2.19. Model desain winglet pada *blade* 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 *blade* turbin angin (a) counter rotasi dan ko-rotasi, (b) gemotri vorteks generator (Gao dkk., 2015). 27
Gambar 3.1. Volume kendali pada model *actuator disc* 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 *blade* rotor turbin angin *counter-rotating*. 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 *counter-rotating* dan *co-axial* (Ushiyama dkk., 1996). 52
Gambar 3.10. Aplikasi turbin angin *counter-rotating* 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 *wake* dari turbin angin (Sanderse, 2009). 54
Gambar 3.13. Kontur kecepatan arah aksial pada daerah *near wake* turbin angin rotor tunggal dari hasil simulasi CFD (Oggiano, 2014). 55
Gambar 3.14. Profil *wake* horisontal pada posisi 1-D arah *downstream* 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 vorticiti pada aliran radial (Yulistiyanto, 2009). 56

UNIVERSITAS GADJAH MADA
KAJIAN AERODINAMIKA TURBIN ANGIN ROTOR GANDA COUNTER-ROTATING POROS HORISONTAL TIPE PROPELER TIGA BLADE
VERDY A KOEHUAN, Prof. Ir. Samsul Kamal, M.Sc., Ph.D.; Dr. Sugiyono, S.T., M.T.
Universitas Gadjah Mada, 2019 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 3.17. Sistem vorteks pada *blade* atau sayap (Sanderse, 2009)..... 57
Gambar 3.18. Sistem vorteks pada rotor turbin dengan tiga *blade* (Sanderse, 2009). 58
Gambar 3.19. Separasi aliran dalam arah radial pada *blade* 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 *blade* turbin angin, satuan dalam meter. 71
Gambar 4.4. Domain komputasi. 72
Gambar 4.5. Distribusi *mesh node* arah aksial domain komputasi. 73
Gambar 4.6. Distribusi *mesh node* pada airfoil. 73
Gambar 4.7. Distribusi *mesh node* pada sisi luar airfoil. 73
Gambar 4.8. *Meshing* pada sepertiga domain menggunakan *software* Gambit. 74
Gambar 4.9. Hex mesh pada hub (kiri) dan tip *blade* (kanan). 74
Gambar 4.10. Skema dan distribusi mesh pada domain komputasi model CFD turbin rotor tunggal melalui variasi *mesh ratio* dan jumlah *mesh node.* 75
Gambar 4.11. Monitoring residual selama proses iterasi. 77
Gambar 4.12. Monitoring tekanan statis melalui *integral* permukaan *blade* selama proses iterasi. 77
Gambar 4.13. Kontur y^+ pada penambang *blade* turbin rotor tunggal melalui variasi jumlah *mesh node.* 79
Gambar 4.14. Hubungan koefisien daya dan *error* (terhadap hasil eksperimen) dari hasil uji independensi mesh pada model CFD turbin rotor tunggal melalui variasi jumlah *mesh node.*. 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 *blade* yang dikembangkan dalam penelitian ini. 86
Gambar 4.18. Tipe-tipe *stall* pada *blade* yang diidentifikasi oleh Sutrisno dkk (2016). 87
Gambar 4.19. Skema pengujian turbin angin sumbu horisontal *counter-rotating.* 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

UNIVERSITAS GADJAH MADA
KAJIAN AERODINAMIKA TURBIN ANGIN ROTOR GANDA COUNTER-ROTATING POROS HORISONTAL TIPE PROPELER TIGA BLADE
VERDY A KOEHUAN, Prof. Ir. Samsul Kamal, M.Sc., Ph.D.; Dr. Sugiyono, S.T., M.T.
Universitas Gadjah Mada, 2019 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

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

UNIVERSITAS GADJAH MADA
KAJIAN AERODINAMIKA TURBIN ANGIN ROTOR GANDA COUNTER-ROTATING POROS HORISONTAL TIPE PROPELER TIGA BLADE
VERDY A KOEHUAN, Prof. Ir. Samsul Kamal, M.Sc., Ph.D.; Dr. Sugiyono, S.T., M.T.
Universitas Gadjah Mada, 2019 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

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 *blade* (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 *blade* (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 *blade* 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 *prony-type brake.* 122
Gambar 5.22. Hasil *deceleration test* untuk putaran rotor depan (D_1) dan rotor belakang (D_2). 123
Gambar 5.23. Hasil *deceleration test* 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 *tip speed ratio* untuk beberapa kecepatan angin, (a) rotor tunggal, (b) rotor depan, dan (c) rotor belakang..... 125
Gambar 5.25. Hubungan putaran rotor terhadap *tip speed ratio* untuk beberapa kecepatan angin, (a) rotor tunggal, (b) rotor depan, dan (c) rotor belakang..... 126
Gambar 5.26. Hubungan koefisien daya turbin terhadap *tip speed ratio* (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 *tip speed ratio* untuk beberapa kecepatan angin. 128
Gambar 5.28. Meshing dan domain komputasi CRWT, R=0.472 m. 129
Gambar 5.29. Mesh pada permukaan *blade*, slip wall dan sisi periodik pada simulasi CRWT..... 129
Gambar 5.30. Hubungan koefisien daya terhadap *tip speed ratio* SRWT dari hasil eksperimen dan simulasi CFD. 130

KAJIAN AERODINAMIKA TURBIN ANGIN ROTOR GANDA COUNTER-ROTATING POROS HORISONTAL TIPE PROPELER TIGA BLADE
VERDY A KOEHUAN, Prof. Ir. Samsul Kamal, M.Sc., Ph.D.; Dr. Sugiyono, S.T., M.T.
Universitas Gadjah Mada, 2019 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 5.31. Hubungan koefisien daya terhadap *tip speed ratio* rotor depan dari hasil eksperimen dan simulasi CFD. 131
Gambar 5.32. Hubungan koefisien daya terhadap *tip speed ratio* rotor belakang dari hasil eksperimen dan simulasi CFD..... 132
Gambar 5.33. Hubungan koefisien daya terhadap *tip speed ratio* CRWT dari hasil eksperimen dan simulasi CFD. 132
Gambar 5.34. Hubungan koefisien daya terhadap *tip speed ratio* rotor depan dari hasil eksperimen dan simulasi CFD. 133
Gambar 5.35. Hubungan koefisien daya terhadap *tip speed ratio* rotor belakang dari hasil eksperimen dan simulasi CFD..... 133
Gambar 5.36. Hubungan koefisien daya terhadap *tip speed ratio* 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 *blade* 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

KAJIAN AERODINAMIKA TURBIN ANGIN ROTOR GANDA COUNTER-ROTATING POROS HORISONTAL TIPE PROPELER TIGA BLADE
VERDY A KOEHUAN, Prof. Ir. Samsul Kamal, M.Sc., Ph.D.; Dr. Sugiyono, S.T., M.T.
Universitas Gadjah Mada, 2019 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

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 *tip speed ratio* 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 *turbulent kinetic energy* (kanan) sepanjang garis vertikal dalam arah *streamwise* terhadap rasio diameter di posisi *downstream* 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 *turbulent kinetic energy* (kanan) sepanjang garis vertikal dalam arah *streamwise* terhadap rasio diameter di posisi *downstream* 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 *turbulent kinetic energy* (kanan) sepanjang garis vertikal dalam arah *streamwise* terhadap rasio diameter di posisi *downstream* 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 *streamwise* dari rotor CRWT dengan variasi rasio diameter terhadap SRWT pada rasio jarak rotor L/D_1=0,25. 159

KAJIAN AERODINAMIKA TURBIN ANGIN ROTOR GANDA COUNTER-ROTATING POROS HORISONTAL TIPE PROPELER TIGA BLADE
VERDY A KOEHUAN, Prof. Ir. Samsul Kamal, M.Sc., Ph.D.; Dr. Sugiyono, S.T., M.T.
Universitas Gadjah Mada, 2019 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 5.63. Profil resultan kecepatan (kiri) distribusi *turbulent kinetic energy* (kanan) sepanjang garis vertikal dalam arah *streamwise* terhadap SRWT di posisi beberapa *downstream* pada konsisi TSR=6. 161
Gambar 5.64. Profil resultan kecepatan (kiri) distribusi *turbulent kinetic energy* (kanan) sepanjang garis vertikal dalam arah *streamwise* terhadap rotor CRWT (L/D_1=0.25) di posisi *downstream* pada TSR_1=6 dengan rasio diameter rotor D_1/D_2=1,0. 162
Gambar 5.65. Profil resultan kecepatan (kiri) distribusi *turbulent kinetic energy* (kanan) sepanjang garis vertikal dalam arah *streamwise* terhadap rotor CRWT (L/D_1=0.5) di posisi *downstream* pada TSR_1=6 dengan rasio diameter rotor D_1/D_2=1,0. 163
Gambar 5.66. Penurunan kecepatan tertinggi dalam arah *streamwise* dari rotor CRWT dengan variasi rasio jarak terhadap SRWT CRWT untuk konsisi *peak performance* (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 *turbulent kinetic energy* 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 *turbulent kinetic energy* 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 *turbulent kinetic energy* 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 *turbulent kinetic energy* 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 *turbulent kinetic energy* 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 *vorticity* 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 *vorticity* 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 *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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

UNIVERSITAS GADJAH MADA
KAJIAN AERODINAMIKA TURBIN ANGIN ROTOR GANDA COUNTER-ROTATING POROS HORISONTAL TIPE PROPELER TIGA BLADE
VERDY A KOEHUAN, Prof. Ir. Samsul Kamal, M.Sc., Ph.D.; Dr. Sugiyono, S.T., M.T.
Universitas Gadjah Mada, 2019 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 5.77. Vektor resultan kecepatan di tip *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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 *turbulent kinetic energy* 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 *vorticity* 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 *turbulent kinetic energy* 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 *turbulent kinetic energy* 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 *vorticity* pada CRWT dengan rasio diameter D_1/D_2= 0,5 dan rasio jarak, L/D_1=0,5 (TSR_1=6). 194

UNIVERSITAS GADJAH MADA
KAJIAN AERODINAMIKA TURBIN ANGIN ROTOR GANDA COUNTER-ROTATING POROS HORISONTAL TIPE PROPELER TIGA BLADE
VERDY A KOEHUAN, Prof. Ir. Samsul Kamal, M.Sc., Ph.D.; Dr. Sugiyono, S.T., M.T.
Universitas Gadjah Mada, 2019 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

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 *turbulent kinetic energy* 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 *turbulent kinetic energy* 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 *turbulent kinetic energy* 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 *turbulent kinetic energy* 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 *turbulent kinetic energy* 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 *turbulent kinetic energy* 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 *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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

UNIVERSITAS GADJAH MADA
KAJIAN AERODINAMIKA TURBIN ANGIN ROTOR GANDA COUNTER-ROTATING POROS HORISONTAL TIPE PROPELER TIGA BLADE
VERDY A KOEHUAN, Prof. Ir. Samsul Kamal, M.Sc., Ph.D.; Dr. Sugiyono, S.T., M.T.
Universitas Gadjah Mada, 2019 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 5.110. Vektor resultan kecepatan di hub *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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. *Pathline* kecepatan di hub *blade* dari hasil simulasi CFD rotor CRWT (L/D_1=0,25) terhadap variasi diameter rotor pada TSR_1=3. 227

UNIVERSITAS GADJAH MADA
KAJIAN AERODINAMIKA TURBIN ANGIN ROTOR GANDA COUNTER-ROTATING POROS HORISONTAL TIPE PROPELER TIGA BLADE
VERDY A KOEHUAN, Prof. Ir. Samsul Kamal, M.Sc., Ph.D.; Dr. Sugiyono, S.T., M.T.
Universitas Gadjah Mada, 2019 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 5.125. *Pathline* resultan kecepatan di hub *blade* dari hasil simulasi CFD rotor CRWT (D_1/D_2=1,0) terhadap variasi jarak rotor pada TSR_1=3. 228
Gambar 5.126. *Pathline* resultan kecepatan di tip *blade* dari hasil simulasi CFD rotor CRWT (L/D_1=0,25) terhadap variasi diameter rotor pada TSR_1=10. 229
Gambar 5.127. *Pathline* resultan kecepatan di tip *blade* 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 *vortex core* dari hasil simulasi CFD rotor CRWT (L/D_1=0,25) terhadap variasi diameter rotor pada TSR_1=3. ... 231
Gambar 5.129. Visualisasi *vortex core* dari hasil simulasi CFD rotor CRWT (L/D_1=0,25) terhadap variasi diameter rotor pada TSR_1=6. ... 232
Gambar 5.130. Visualisasi *vortex core* 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 *downstream* 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 *downstream* 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 *downstream* 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 *downstream* 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 *downstream* 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 *blade* pada model simulasi CFD. 239
Gambar 5.139. *Tetrahedral meshing* pada domain komputasi. 239
Gambar 5.140. Koefisien daya CRWT melalui variasi model *blade* 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 *blade* 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 *blade* 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 *turbulent kinetic energy* dalam arah *streamwise* untuk model *blade* standar pada TSR_1=6..... 243

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KAJIAN AERODINAMIKA TURBIN ANGIN ROTOR GANDA COUNTER-ROTATING POROS HORISONTAL TIPE PROPELER TIGA BLADE
VERDY A KOEHUAN, Prof. Ir. Samsul Kamal, M.Sc., Ph.D.; Dr. Sugiyono, S.T., M.T.
Universitas Gadjah Mada, 2019 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

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

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
KAJIAN AERODINAMIKA TURBIN ANGIN ROTOR GANDA COUNTER-ROTATING POROS HORISONTAL TIPE PROPELER TIGA BLADE
VERDY A KOEHUAN, Prof. Ir. Samsul Kamal, M.Sc., Ph.D.; Dr. Sugiyono, S.T., M.T.
Universitas Gadjah Mada, 2019 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Parameter geometri *winglet* yang divariasikan pada turbin rotor tunggal..... 26
Tabel 2.2 Parameter vorteks generator pada *blade* turbin angin. 26
Tabel 2.3. Deskripsi publikasi penelitian turbin angin *counter-rotating*. 28
Tabel 3.1. Metode analisis performa HAWT 39
Table 4.1 Data Geometri *blade*..... 70
Table 4.2. Informasi jumlah mesh model CFD turbin rotor tunggal. 74
Tabel 4.3. *Mesh Metrics*. 74
Tabel 4.4. Uji independensi mesh model CFD turbin rotor tunggal melalui variasi distribusi dan jumlah *mesh node*. 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 *Error* (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 *blade* modifikasi. 239