

Simulasi CFD (Computational Fluid Dynamics) Turbin Angin Sumbu Horizontal Tipe Propeler Tiga Blade Rotor Ganda Melalui Variasi Geometri

Verdy A. Koehuan^{1*}, Roybertho A Hale², Daud P. Mangesa³

¹⁻³) Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknik Universitas Nusa Cendana
Jl. Adisucipto, Penfui-Kupang, NTT 85001, Tlp. (0380)881597

*Corresponding author: verdy.koehuan@staf.undana.ac.id

ABSTRAK

Pengujian performa rotor turbin angin sumbu horizontal tipe propeler tiga blade rotor ganda melalui penurunan skala geometri rotor sangat berpengaruh selain terhadap parameter geometri rotor tapi juga terhadap parameter aliran. Pada pengujian turbin dengan ukuran skala lapangan (*full scale*) $D_1=0,944$ m dilakukan pengujian skala laboratorium dengan penurunan skala menjadi tiga variasi diameter rotor, yaitu 30% 26,5%, dan 25% (koefisien skala, $SC = 0,3$; $SC = 0,265$; dan $SC = 0,26$). Rasio diameter rotor depan dan rotor belakang, $D_1/D_2=1$ dan rasio jarak, $Z/D_1=0,5$ (Z adalah jarak aksial rotor depan dan rotor belakang). Sehingga diameter turbin yang diuji adalah, $D_1=0,2832$ m, $0,2502$ m, dan $0,236$ m. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui performa turbin angin sumbu horisontal atau *horizontal axis wind turbine* (HAWT) tipe propeler tiga blade rotor ganda kontra rotasi (*double rotor counter-rotation*) terhadap variasi geometri rotor CRWT menggunakan metode *computational fluid dynamics* (CFD). Hasil simulasi CFD rotor turbin CRWT dengan penurunan skala geometri menunjukkan turbin cenderung beroperasi pada TSR rendah. Rotor depan turbin CRWT cenderung beroperasi dengan koefisien daya dan TSR yang lebih tinggi dari rotor belakang. Vektor kecepatan pada tip *blade* antara rotor depan dan rotor belakang pada turbin CRWT dengan penurunan skala geometri ($FC = 0,25$ dan $0,26$ serta $0,3$) yang beroperasi di TSR rendah yang arahnya cenderung menguat menuju ke tip blade dengan besaran vektor yang makin kuat di sisi hisap (*suction surface*) *blade* rotor belakang. Besaran vektor ini semakin kuat ini dapat membentuk vorteks yang menurunkan performa CRWT.

ABSTRACT

Testing the rotor performance of a horizontal axis wind turbine type three-blade double-rotor propeller through decreasing the rotor geometry scale greatly influences not only the rotor geometry parameters but also the flow parameters. In the turbine test with field scale size (full scale) $D_1 = 0.944$ m, a laboratory scale test was carried out with a reduced scale to three variations of the rotor diameter, namely 30% 26.5% and 25% (scale coefficient, $SC = 0.3$; $SC = 0.265$ and $SC = 0.26$). The ratio of the diameters of the front and rear rotors, $D_1/D_2=1$ and the distance ratio, $Z/D_1=0.5$ (Z is the axial distance of the front and rear rotors). So that the diameter of the turbine tested is, $D_1 = 0.2832$ m, 0.2502 m, and 0.236 m. The purpose of this study was to determine the performance of a horizontal axis wind turbine (HAWT) three-blade propeller type double rotor counter-rotation against variations in CRWT rotor geometry using computational fluid dynamics (CFD) methods. CFD simulation results of the CRWT turbine rotor with decreasing geometry scale show that the turbine tends to operate at low TSR. The front rotor of a CRWT turbine tends to operate with a higher power coefficient and TSR than the rear rotor. The velocity vector on the blade tip between the front and rear rotors in a CRWT turbine with a decreasing geometric scale ($FC = 0.25$ and 0.26 and 0.3) operating at a low TSR whose direction tends to strengthen towards the tip blade with a large vector magnitude getting stronger on the suction side (suction surface) of the rear rotor blade. This vector quantity gets stronger, it can form a vortex which reduces CRWT performance.

Keywords: Wind Turbine, Counter-rotating, Double Rotor, tip speed ratio, CFD

PENDAHULUAN

Dewasa ini banyak dikembangkan sumber energi terbarukan, seperti sumber

energi angin, panas matahari, biogas, biomassa, gelombang air laut, panas bumi dan sebagainya. Turbin angin merupakan salah satu sistem konversi energi angin yang sudah

sejak lama dikembangkan. Perkembangan teknologi turbin angin ini, khususnya turbin angin sumbu horisontal atau *horizontal axis wind turbine* (HAWT) tipe propeler tiga *blade* dewasa ini menunjukkan suatu kemajuan sangat pesat. Hal ini ditandai dengan adanya peningkatan efisiensi turbin dan penurunan biaya per kWh yang cukup baik. Rotor turbin angin merupakan kunci utama dalam proses perubahan energi kinetik angin menjadi energi mekanik, sehingga rancangan geometri *blade* yang aerodinamis dengan efisiensi optimum mutlak dibutuhkan agar dapat memaksimalkan energi yang dapat dikonversi tersebut (Vermeer dkk., 2003).

Turbin angin sumbu horisontal tipe propeler tiga *blade* dengan rotor ganda (*double rotor*) yang dikenal dengan *double rotor wind turbine* (DRWT) memiliki dua rotor yang ditempatkan pada satu sumbu putar. DRWT dengan arah putaran saling berlawanan atau *counter-rotating* yang lebih dikenal dengan *counter-rotating wind turbine* (CRWT) dapat membangkitkan daya listrik dengan atau tanpa menggunakan sistem transmisi. Turbin angin ini memiliki dua buah rotor yang diameternya sama atau berbeda, sama-sama menggerakkan satu alternator dengan arah putaran saling berlawanan arah. Secara aerodinamika dapat meningkatkan koefisien daya turbin angin dua rotor lebih tinggi dari pada kondisi rotor tunggal. Rotor berukuran besar ditempatkan di depan rotor yang berukuran kecil atau sebaliknya, kecepatan rotasi dari kedua rotor ini cukup sinkron bekerja sama dan saling dukung dalam menggerakkan alternator (Kanemoto & Galal, 2006).

Studi tentang turbin angin sumbu horisontal tipe propeler tiga *blade* rotor ganda kontra rotasi (*double rotor counter-rotation*) secara numerik maupun eksperimental belum dijelaskan secara lengkap performa maupun fenomena aliran pada kondisi operasi CRWT yang lebih lebar terhadap parameter aerodinamika rotor turbin. Parameter-parameter tersebut diantaranya rasio diameter rotor, rasio jarak rotor, dan *tip speed ratio* (TSR) (Verdy A Koehuan & Mandala, 2020; V A. Koehuan dkk., 2019). Hal ini

mengakibatkan performa CRWT dalam aplikasinya masih terbatas mengkonversi energi angin kurang dari 50 %, yang secara kumulatif tidak lebih baik dari desain dan aplikasi optimal SRWT.

Hasil kajian ini tidak dapat diprediksi dengan tepat performa CRWT dengan konfigurasi rasio diameter maupun rasio jarak yang untuk suatu jenis *blade* tertentu. Namun hasil kajian tersebut menunjukkan bahwa turbin angin rotor ganda lebih baik performanya jika arah putaran rotor depan dan rotor belakang saling berlawanan (*counter-rotating*). Parameter penelitian seperti rasio diameter turbin angin *counter-rotating*, yakni D_1/D_2 dimana D_1 adalah diameter rotor depan dan D_2 adalah diameter rotor belakang. Rasio diameter ini meliputi D_1/D_2 kurang dari satu, D_1/D_2 sama dengan satu dan D_1/D_2 lebih besar satu terhadap rasio jarak aksial rotor Z/D_1 dalam aplikasinya masing-masing menunjukkan performa terbaik (V. A. Koehuan dkk., 2017). Akan tetapi, penelitian-penelitian yang telah dilakukan masih dikaji secara parsial, cenderung pada salah satu kategori rasio diameter saja. Sehingga dalam aplikasinya masing-masing CRWT ini menunjukkan performa yang belum kompetitif dengan turbin angin rotor tunggal.

Analisis performa CRWT pada skala lapangan termasuk sangat mahal, sehingga pengujian skala laboratorium menjadi sangat penting dilakukan untuk memperoleh hasil analisis performa CRWT yang memadai. Selain eksperimen skala laboratorium, metode *computational fluid dynamics* (CFD) juga dewasa ini sangat berkembang pesat dengan berbagai kontribusi hasil penelitian yang sangat membantu dalam analisis performa turbin angin. Oleh karena itu dalam penelitian ini dilakukan analisis performa CRWT melalui metode *computational fluid dynamics* (CFD) pada skala pengujian laboratorium. Variable CRWT seperti rasio diameter rotor depan dan rotor belakang, rasio jarak, *tip speed ratio*, karakteristik aliran di sekitar rotor menjadi sangat penting untuk dipahami pengaruhnya terhadap performa CRWT. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui performa turbin angin sumbu horisontal atau

horizontal axis wind turbine (HAWT) tipe propeler tiga blade rotor ganda kontra rotasi (*double rotor counter-rotation*) terhadap variasi geometri rotor CRWT menggunakan metode *computational fluid dynamics* (CFD).

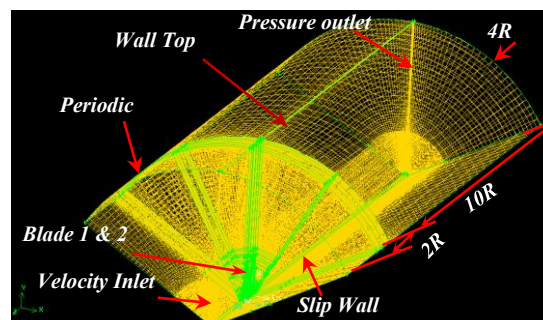
METODE PENELITIAN

Metode yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah metode *computational fluid dynamics* (CFD) melalui *software* Fluent penelitian ini dilakukan selama 3 bulan, terhitung mulai. Tempat penelitian *computational fluid dynamics* (CFD) di Laboratorium Teknik Mesin, Fakultas Sains Dan Teknik, Universitas Nusa Cendana.

Model *blade* yang digunakan dalam penelitian ini yang selanjutnya disebut sebagai prototipe *blade* adalah *blade* turbin angin sumbu horisontal tipe propeler tiga yang diadopsi dari model *blade* yang dikembangkan oleh NORCOWE (*Norwegian Centre for Offshore Wind Energy*) dan *Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Science and Technology* NTNU, *Trondheim, Norway*. *Blade* rotor turbin ini menggunakan seri airfoil S826 yang dikeluarkan oleh NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), dimana diameter rotor 0,944 m (Krogstad dan Eriksen, 2013).

Model numerik yang digunakan adalah model dengan hanya 1/3 dari domain (Gambar 1) menggunakan asumsi periodisitas pada penampang antarmukanya sebagai interface yang selanjutnya model numerik tersebut diputar 120° untuk solusi 1/3 domain dengan kondisi batas pada domain fluida adalah sebagai berikut:

- *Inlet* : kecepatan masuk 4 m/s hingga 5 m/s, intensitas turbulen dari 5% dan rasio viskositas turbulen 10
- *Outlet* : Tekanan 1 atm
- *Blade* atau *wall* : kondisi *non slip*
- *Interface periodic* : *Periodic (rotational)*
- *Slip wall* : kondisi *non slip*
- *Wall top* : specified *shear stress to zero*



Gambar 1. Domain komputasi.

Variabel bebas adalah variasi kecepatan angin dan rasio geometri CRWT, yakni 30%, 26,5% dan 25% (Tabel 1).

Variabel terikat yaitu kecepatan sudut poros, torsi poros dan daya poros yang dihasilkan dari rotor depan dan rotor belakang.

Variabel terkontrol terdiri atas, rasio diameter rotor depan (D_1) terhadap rasio diameter rotor belakang ($D_1/D_2=1$), sudut pitch, dan jumlah sudu tiga buah untuk rotor depan dan rotor belakang.

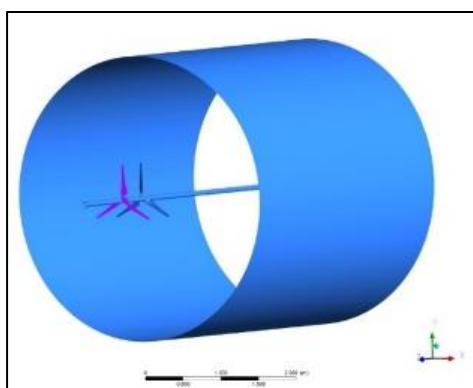
Table 1. Variabel rasio geometri rotor RWT.

Faktor Skala Geometri	100%	30%	26,5%	25%
Diameter rotor depan D_1 (m)	0,944	0,283	0,250	0,236
Diameter rotor belakang D_2 (m)	0,944	0,283	0,250	0,236

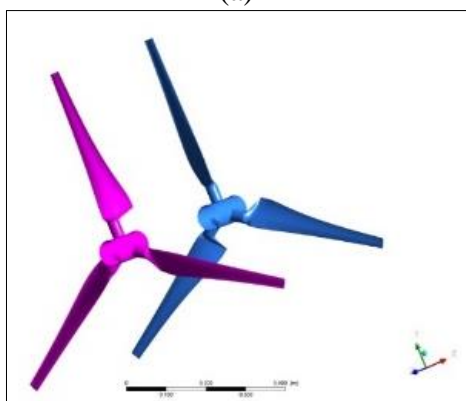
HASIL DAN PEMBAHASAN

Domain Komputasi

Domain simulasi CFD pada CRWT seperti pada Gambar 2a (domain lengkap), dengan rotor yang disimulasikan berada dalam domain berupa terowongan angin berbentuk silinder (Gambar 2). Simulasi dilakukan dengan variasi skala geometri turbin (domain dan geometri rotor) dan *tip speed ratio*. Tipe meshing yang digunakan adalah mesh terstruktur, yakni mesh hexahedra seperti terlihat pada penampang *blade* (Gambar 3).

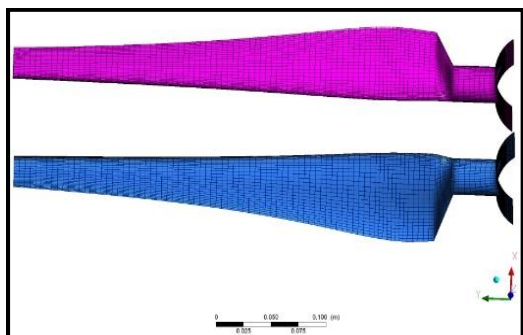


(a)



(b)

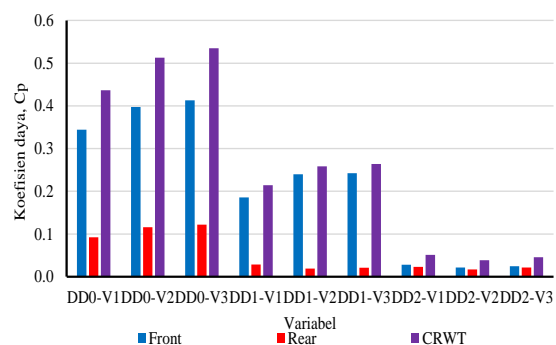
Gambar 2. (a) Domain komputasi (terowongan angin berbentuk silinder), (b) rotor depan dan rotor belakang.



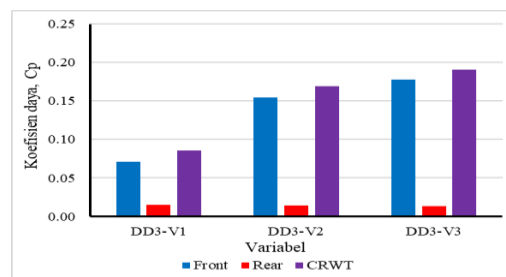
Gambar 3. Mesh penampang *blade* dimeshing menggunakan tipe *mesh hex*.

Performa Turbin CRWT Hasil Simulasi

Analisis data dari hasil simulasi CFD dilakukan untuk menentukan besar koefisien daya turbin angin sumbu horisontal rotor ganda *counter-rotating*. Berikut ini adalah contoh perhitungan performa CRWT dari hasil simulasi CFD pada kondisi kecepatan angin 4 m/s hingga 5 m/s dengan skala geometri turbin 100%, 30%, 25,5 %, dan 25%.



(a)

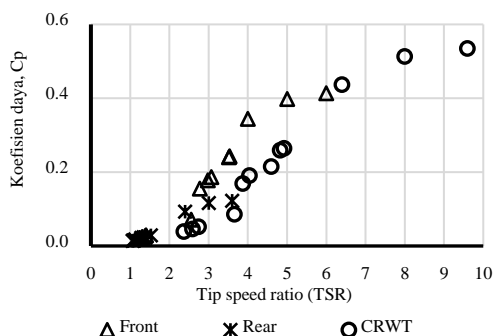


(b)

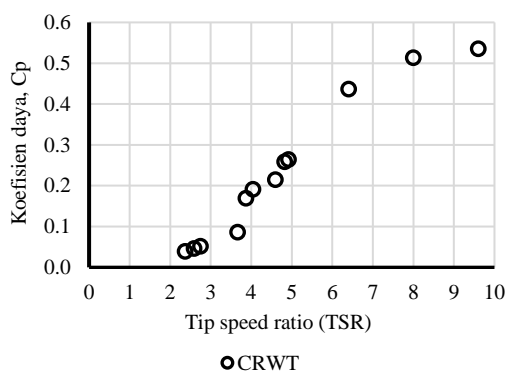
Gambar 3. a) Performa rotor turbin CRWT (rotor depan, rotor belakang, dan gabungan) terhadap variasi skala geometri rotor dan kecepatan angin, b) Performa rotor turbin CRWT terhadap variasi kecepatan angin dengan skala geometri rotor 25 % ($D=0,236$ m).

Hasil simulasi menunjukkan dengan peningkatan kecepatan aliran, maka koefisien daya turbin rotor depan, rotor belakang, dan gabungan (CRWT) cenderung meningkat. Koefisien daya turbin CRWT cenderung menurun dengan penurunan skala geometri rotor, namun mengalami peningkatan dengan

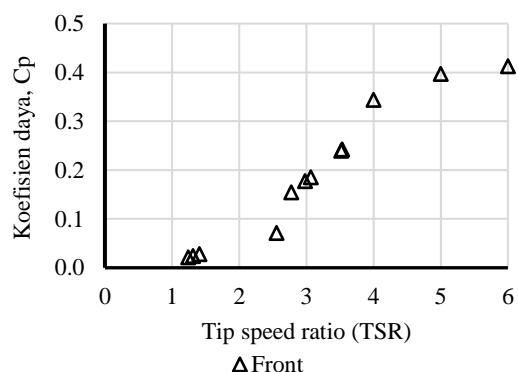
naiknya TSR. Pada skala geometri terkecil (faktor skala atau FC = 0,25) dari hasil eksperimen menunjukkan turbin tidak dapat beroperasi ketika diberi beban. Namun dari hasil simulasi CFD ini, turbin dengan faktor skala 0,25 dapat disimulasikan pada tip speed ratio (TSR) yang lebih tinggi, maka daya output dari turbin dapat meningkat. Hal ini juga dapat meningkatkan koefisien dayanya seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Turbin CRWT dengan penurunan skala geometri cenderung beroperasi pada TSR rendah. Sementara turbin CRWT rotor depan cenderung beroperasi dengan koefisien daya yang lebih tinggi pada TSR yang lebih tinggi dari turbin rotor belakang.



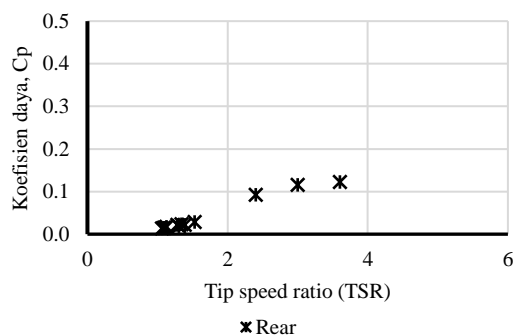
Gambar 4 Performa rotor turbin CRWT (rotor depan, rotor belakang, dan gabungan) terhadap variasi tip speed ratio (TSR).



Gambar 4. Performa rotor turbin CRWT (rotor gabungan) terhadap variasi tip speed ratio (TSR).



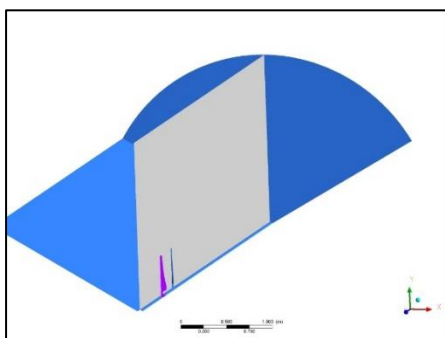
Gambar 5 Performa rotor turbin CRWT (rotor depan) terhadap variasi tip speed ratio (TSR).



Gambar 6. Performa rotor turbin CRWT (rotor belakang) terhadap variasi tip speed ratio (TSR).

Kontur kecepatan dan turbulent kinetic energy aliran melewati CRWT

Visualisasi aliran yang melewati rotor turbin CRWT dari hasil simulasi CFD ini diamati pada penampang dalam arah aksial melalui bidang vertikal seperti pada Gambar 7. Visualisasi aliran ini dapat menjelaskan hubungan antara karakteristik aliran terhadap performa dari turbin CRWT dengan variasi kecepatan dan faktor skala geometri. Karakteristik aliran yang akan divisualisasikan adalah kontur kecepatan, kontur *turbulent kinetic energy*, dan vektor kecepatan aliran melewati rotor turbin CRWT dalam arah aksial.



Gambar 7. Sepertiga domain komputasi simulasi CFD turbin angin rotor ganda (CRWT) dengan pendefinisian bidang vertikal sepanjang arah aksial.

Parameter *tip speed ratio*, λ (TSR) sebagai rasio kecepatan ujung *blade* rotor turbin terhadap kecepatan aksial dari kecepatan aliran menunjukkan pada TSR rendah aliran lebih fluktuatif dari pada TSR yang lebih tinggi. Namun pada TSR tinggi, rotor cenderung berada pada kondisi propeler yang mana *thrust* tinggi dengan pertumbuhan vorteks yang cukup kuat di *tip blade*. Visualisasi aliran pada rotor turbin angin yang dilakukan oleh Zhang dkk. (2012), Massouh dan Dobrev (2014), dan Tran dkk. (2015) diadopsi untuk menggambarkan karakteristik penurunan kecepatan di daerah *wake* turbin. Visualisasi aliran pada CRWT dari hasil simulasi CFD terhadap variasi *tip speed ratio* ditunjukkan dalam kontur kecepatan dan kontur *turbulent kinetic energy*, serta vektor kecepatan di sekitar *blade* rotor depan maupun rotor belakang dalam arah aksial ke arah *downstream*.

Gambar 8 hingga Gambar 11 menunjukkan kontur kecepatan aliran dan kontur *turbulent kinetic energy* dalam arah aksial menuju ke *downstream* dari hasil simulasi CFD pada kondisi *tip speed ratio* yang berbeda. Pola aliran dengan adanya rotor belakang untuk kasus CRWT membawa dampak tidak seragamnya aliran terutama setelah melewati rotor belakang. Efek kontra rotasi kedua rotor memberikan gradien kecepatan yang sangat curam di sekitar tip dan hub *blade* ke arah *downstream* yang

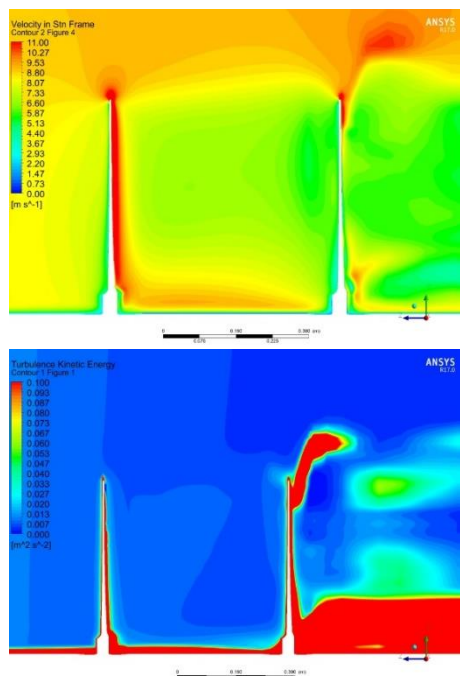
membentuk pertumbuhan vorteks di daerah tersebut terhadap perubahan TSR.

Kontur kecepatan aliran dan distribusi *turbulent kinetic energy* terhadap dalam arah aksial rotor CRWT dari hasil simulasi CFD menunjukkan terjadi puncak penurunan kecepatan (*velocity deficit*) pada daerah mendekati *tip blade*, tapi setelah melewati *tip blade* kecepatan kembali meningkat dengan cepat membentuk gradien kecepatan yang cukup besar. Gradien kecepatan yang besar dapat memicu pertumbuhan vorteks yang besar di daerah *tip* dan bergerak ke arah *downstream* yang mana hal ini berkaitan dengan level *turbulent kinetic energy* yang tinggi di daerah tersebut Ozbay dkk. (2014b).

Vorteks yang kuat di daerah tip, dapat meningkatkan kerugian aliran dan sekaligus kerugian energi mekanik rotor turbin angin. Selain itu, penurunan kecepatan yang tinggi dan diikuti dengan level *turbulent kinetic energy* yang tinggi, juga menunjukkan adanya kerugian aliran di area tersebut (terjadi separasi). Namun demikian, penurunan kecepatan yang tinggi di belakang rotor juga menunjukkan adanya konversi energi angin yang efisien dari rotor tersebut (kasus SRWT), (Adaramola dan Krogstad, 2011). Sebaliknya penurunan kecepatan dan *turbulent kinetic energy* dengan level tertentu dapat mempercepat laju pemulihan aliran (*velocity recovery*) dalam gelombang aliran (*near wake*) khususnya pada kasus CRWT. Hal ini sebaliknya dapat memperbaiki performa rotor belakang dan CRWT secara keseluruhan. Penurunan kecepatan aliran setelah rotor depan yang lebih tinggi ini menunjukkan adanya konversi energi kinetik yang lebih baik dari CRWT.

Daerah di belakang rotor dengan penurunan kecepatan yang tinggi tidak secara langsung berkontribusi positif pada kenaikan daya turbin, sebaliknya penurunan kecepatan yang tinggi pada CRWT setelah melewati rotor depan mengakibatkan terlambatnya pemulihan kecepatan aliran masuk rotor belakang. Keterlambatan pemulihan kecepatan aliran saat masuk rotor belakang CRWT cenderung menurunkan performa rotornya. Sebaliknya adanya pemulihan

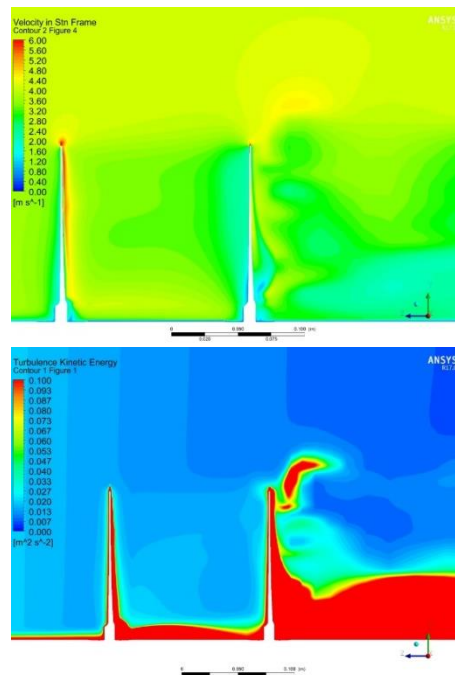
kecepatan angin yang meningkat saat masuk rotor belakang sebagai akibat dari adanya efek kontra rotasi CRWT berperan dalam percepatan pemulihan kecepatan tersebut. Peningkatan pemulihan kecepatan aliran saat memasuki rotor belakang dengan level *turbulent kinetic energy* yang cukup rendah dapat meningkatkan performa rotornya.



Gambar 8. Kontur kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada bidang vertikal aliran dalam arah aksial pada CRWT dengan $FC=1,0$ di $TSR=4$ (DDOV1).

Karakteristik aliran di sekitar rotor CRWT terhadap TSR dapat menjelaskan fenomena aliran dan pengaruhnya terhadap performa rotor. Penurunan kecepatan aksial yang tinggi menunjukkan konversi energi mekanik yang tinggi, sesuai dengan performa CRWT yang telah dijelaskan sebelumnya. Interferensi aliran oleh rotor belakang makin kuat pada performa rotor depan dengan aliran yang fluktuatif pada level *turbulent kinetic energy* yang tinggi di rotor belakang. Aliran setelah melewati rotor belakang sangat fluktuatif terutama di daerah sekitar hub

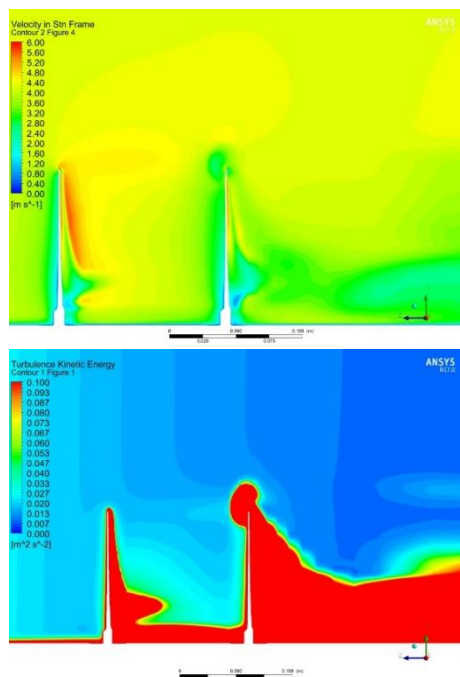
sebagai akibat dari vorteks pada hub yang cenderung bergerak menjauh ke *downstream* yang meningkatkan separasi.



Gambar 9. Kontur kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada bidang vertikal aliran dalam arah aksial pada CRWT dengan $FC=0,3$ di $TSR=3,06$ (DD2V1).

Level turbulensi pada CRWT terhadap TSR menunjukkan peningkatan pada TSR rendah terutama di daerah sekitar hub dan tip *blade* ke arah *downstream*. Peningkatan level turbulensi di sebagian penampang *blade* rotor belakang maupun daerah *wake* CRWT memperburuk performa rotor, seperti terlihat pada grafik performa atau koefisien daya. Selain separasi aliran pada penampang *blade*, pembentukan vorteks di daerah tip pada rotor belakang CRWT juga ditandai dengan adanya peningkatan level *turbulent kinetic energy* di area tersebut yang merupakan faktor penyebab turunnya performa rotor. Hasil simulasi CFD seperti pada Gambar 8 hingga Gambar 11 mengkonfirmasi pembentukan vorteks dan separasi serta level turbulensi yang semakin kuat di hub hingga tip *blade* rotor belakang

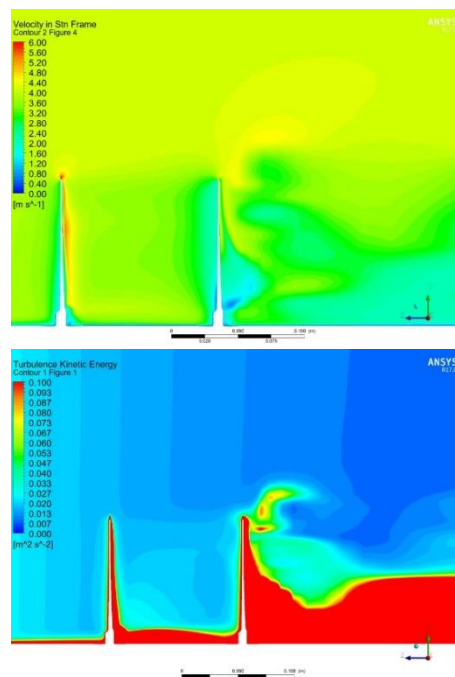
CRWT melalui variasi *tip speed ratio* sehingga menurunkan performa rotor belakang.



Gambar10. Kontur kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada bidang vertikal aliran dalam arah aksial CRWT dengan $FC=0,265$ di $TSR_1=1,40$ (DD2V1).

Kontur kecepatan aksial aliran di daerah hub menunjukkan kontur kecepatan yang lebih renggang dimulai dari dinding *blade* ke *downstream* dengan menurunnya *tip speed ratio*. Kontur kecepatan yang renggang dan fluktuatif ini juga disertai dengan adanya peningkatan level turbulensi yang semakin tinggi dengan adanya penurunan *tip speed ratio* terutama di belakang rotor kedua. Hal ini diakibatkan oleh adanya separasi dan aliran balik yang semakin besar di rotor belakang. Sebaliknya pada *tip speed ratio* yang tinggi, maka gradient kecepatan akan meningkat ke arah *tip blade* yang dapat mempercepat pertumbuhan vorteks di daerah tersebut. Pertumbuhan vorteks dapat meningkatkan kerugian energi yang terkonversi pada rotor turbin CRWT. Peningkatan level *turbulent kinetic energy* di daerah *wake* ini karena

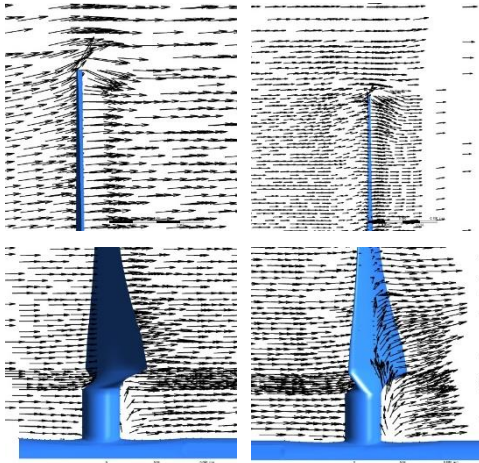
adanya gradient kecepatan dengan pertumbuhan vorteks yang cukup tinggi di daerah tersebut (Moghadassian, dkk., 2016).



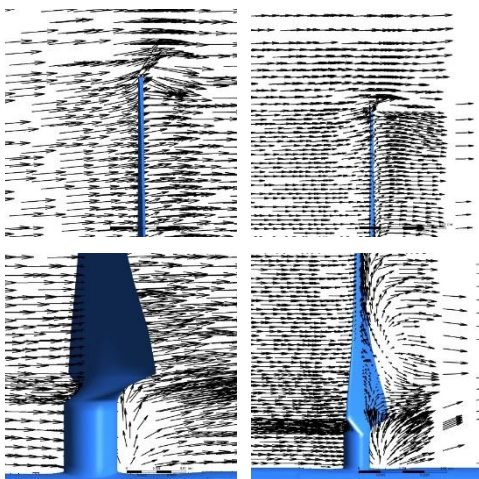
Gambar 11. Kontur kecepatan dan *turbulent kinetic energy* pada bidang vertikal aliran dalam arah aksial CRWT dengan $FC=0,25$ di $TSR_1=2,56$ (DD3V1).

Gambar 12 hingga Gambar 15 masing-masing menunjukkan vektor resultan kecepatan di tip *blade* rotor depan dan rotor belakang CRWT terhadap variasi skala geometri rotor dengan $D_1/D_2=1,0$ dan $L/D_1=0,25$ pada TSR_1 yang berbeda. Besar dan arah vektor di sekitar tip *blade* relatif berbeda terutama pada TSR tinggi dan TSR rendah. Vektor kecepatan pada tip *blade* antara rotor depan dan rotor belakang pada turbin CRWT dengan penurunan skala geometri ($FC = 0,25$ dan $0,26$ serta $0,3$) yang beroperasi di TSR rendah arahnya cenderung menguat menuju ke tip dengan besaran vektor yang makin kuat di sisi hisap (*suction surface*) *blade* rotor belakang. Arah dan besaran dari vektor ini cenderung meningkatkan gaya sentrifugal pada penampang *blade* yang menyebabkan peningkatan gaya hambat dan

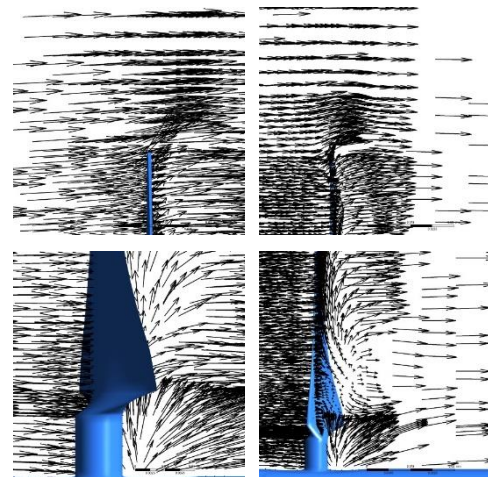
penurunan gaya angkat. Peningkatan gaya hambat pada blade dapat menyebabkan penurunan torsi yang dibangkitkan oleh rotor turbin.



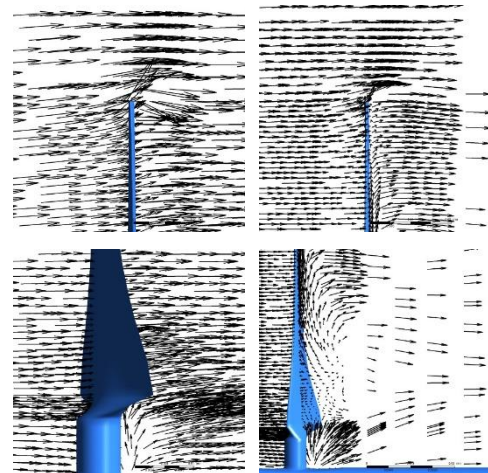
Gambar 12. Vektor kecepatan aliran pada bidang vertikal aliran dalam arah aksial pada CRWT dengan $FC=1,0$ di $TSR1=4$ (DD0V1).



Gambar 13. Vektor kecepatan aliran pada bidang vertikal aliran dalam arah aksial pada CRWT dengan $FC=0,3$ di $TSR1=3,06$ (DD1V1).



Gambar 14. Vektor kecepatan aliran pada bidang vertikal aliran dalam arah aksial pada CRWT dengan $FC=0,265$ di $TSR1=1,40$ (DD2V1).



Gambar 15. Vektor kecepatan aliran pada bidang vertikal aliran dalam arah aksial pada CRWT dengan $FC=0,25$ di $TSR1=2,56$ (DD3V1).

Arah dan besaran vektor di sisi hisap permukaan *blade* tersebut menunjukkan adanya separasi yang semakin kuat ke tip *blade* rotor belakang dengan penurunan TSR. Sementara pada TSR tinggi besaran vektor ini semakin kuat di sisi tekan permukaan *blade* dan bergerak ke arah *downstream* yang

menunjukkan adanya pembentukan vorteks yang lebih kuat di daerah tip *blade* dengan penambahan TSR

Pembahasan

Performa turbin CRWT dari hasil simulasi CFD terhadap penurunan skala geometri turbin menunjukkan dengan peningkatan kecepatan aliran, maka koefisien daya turbin rotor depan, rotor belakang, dan gabungan (CRWT) cenderung meningkat. Koefisien daya turbin CRWT cenderung menurun dengan penurunan skala geometri rotor, namun mengalami peningkatan dengan naiknya TSR. Turbin CRWT dengan penurunan skala geometri cenderung beroperasi pada TSR rendah. Sementara turbin CRWT rotor depan cenderung beroperasi dengan koefisien daya yang lebih tinggi pada TSR yang lebih tinggi dari turbin rotor belakang.

Tip speed ratio, λ (TSR) sebagai rasio kecepatan ujung *blade* rotor turbin terhadap kecepatan aksial dari kecepatan aliran menunjukkan pada TSR rendah aliran lebih fluktuatif dari pada TSR yang lebih tinggi. Visualisasi aliran pada CRWT dari hasil simulasi CFD terhadap variasi *tip speed ratio* ditunjukkan dalam kontur kecepatan dan kontur *turbulent kinetic energy*, serta vektor kecepatan di sekitar *blade* rotor depan maupun rotor belakang dalam arah aksial ke arah *downstream*. Kontur kecepatan aliran dan kontur *turbulent kinetic energy* dalam arah aksial menuju ke *downstream* dari hasil simulasi CFD pada kondisi *tip speed ratio* yang berbeda memberikan pemahaman tentang hubungan karakter aliran terhadap performa CRWT. Pola aliran dengan adanya rotor belakang untuk kasus CRWT membawa dampak tidak seragamnya aliran terutama setelah melewati rotor belakang. Efek kontra rotasi kedua rotor memberikan gradien kecepatan yang sangat curam di sekitar tip dan hub *blade* ke arah *downstream* yang membentuk pertumbuhan vorteks di daerah tersebut terhadap perubahan TSR.

Turbin CRWT dengan penurunan faktor skala geometri yang cenderung beroperasi

pada TSR rendah memperlihatkan pola aliran dengan kontur kecepatan arah aksial yang sangat fluktuatif. Kontur kecepatan aliran dan distribusi *turbulent kinetic energy* terhadap dalam arah aksial rotor CRWT dari hasil simulasi CFD menunjukkan terjadi puncak penurunan kecepatan (*velocity deficit*) pada daerah mendekati *tip blade*, tapi setelah melewati *tip blade* kecepatan kembali meningkat dengan cepat membentuk gradien kecepatan yang cukup besar. Gradien kecepatan yang besar dapat memicu pertumbuhan vorteks yang besar di daerah *tip* dan bergerak ke arah *downstream* yang mana hal ini berkaitan dengan level *turbulent kinetic energy* yang tinggi di daerah tersebut Ozbay dkk. (2014b).

Vorteks yang kuat di daerah tip, dapat meningkatkan kerugian aliran dan sekaligus kerugian energi mekanik rotor turbin angin. Selain itu, penurunan kecepatan yang tinggi dan diikuti dengan level *turbulent kinetic energy* yang tinggi, juga menunjukkan adanya kerugian aliran di area tersebut (terjadi separasi). Namun demikian, penurunan kecepatan yang tinggi di belakang rotor juga menunjukkan adanya konversi energi angin yang efisien dari rotor tersebut, (Adaramola dan Krogstad, 2011). Sebaliknya penurunan kecepatan dan *turbulent kinetic energy* dengan level tertentu dapat mempercepat laju pemulihan kecepatan aliran (*velocity recovery*) dalam gelombang aliran (*near wake*) khususnya pada kasus CRWT. Hal ini sebaliknya dapat memperbaiki performa rotor belakang dan CRWT secara keseluruhan. Penurunan kecepatan aliran setelah rotor depan yang lebih tinggi ini menunjukkan adanya konversi energi kinetik yang lebih baik pada CRWT.

Daerah di belakang rotor dengan penurunan kecepatan yang tinggi tidak secara langsung berkontribusi positif pada kenaikan daya turbin, sebaliknya penurunan kecepatan yang tinggi pada CRWT setelah melewati rotor depan mengakibatkan terlambatnya pemulihan kecepatan aliran masuk rotor belakang. Keterlambatan pemulihan kecepatan aliran saat masuk rotor belakang CRWT cenderung menurunkan performa

rotornya. Sebaliknya adanya pemulihan kecepatan angin yang meningkat saat masuk rotor belakang sebagai akibat dari adanya efek kontra rotasi CRWT berperan dalam percepatan pemulihan kecepatan tersebut. Peningkatan pemulihan kecepatan aliran saat memasuki rotor belakang dengan level *turbulent kinetic energy* yang cukup rendah dapat meningkatkan performa rotornya.

Vektor kecepatan aliran pada bidang vertikal arah aksial CRWT juga mengkonfirmasi hasil analisis kontur kecepatan aliran terhadap performa CRWT. Vektor kecepatan pada tip *blade* antara rotor depan dan rotor belakang pada turbin CRWT dengan penurunan skala geometri ($FC = 0,25$ dan $0,26$ serta $0,3$) yang beroperasi di TSR rendah arahnya cenderung menguat menuju ke tip dengan besaran vektor yang makin kuat di sisi hisap (*suction surface*) *blade* rotor belakang. Arah dan besaran dari vektor ini cenderung meningkatkan gaya sentrifugal pada penampang *blade* yang menyebabkan peningkatan gaya hambat dan penurunan gaya angkat. Peningkatan gaya hambat pada *blade* dapat menyebabkan penurunan torsi yang dibangkitkan oleh rotor turbin. Arah dan besaran vektor di sisi hisap permukaan *blade* tersebut menunjukkan adanya separasi yang semakin kuat ke tip *blade* rotor belakang dengan penurunan faktor skala geometri turbin. Hal ini karena turbin CRWT dengan penurunan skala geometri cenderung beroperasi pada TSR rendah. Sementara pada TSR tinggi besaran vektor ini semakin kuat di sisi tekan permukaan *blade* dan bergerak ke arah *downstream* yang menunjukkan adanya pembentukan vorteks yang lebih kuat di daerah tip *blade* dengan penambahan TSR

KESIMPULAN

Turbin CRWT dengan penurunan skala geometri cenderung beroperasi pada TSR rendah. Sementara turbin CRWT rotor depan cenderung beroperasi dengan koefisien daya yang lebih tinggi pada TSR yang lebih tinggi dari turbin rotor belakang. Koefisien daya turbin CRWT dapat ditingkatkan lagi melalui

desain geometri *blade* yang tepat dan sesuai dengan kondisi operasi turbin secara alamiah di lapangan.

Vektor kecepatan aliran pada bidang vertikal arah aksial CRWT juga dikonfirmasi oleh hasil analisis kontur kecepatan aliran dan kontur *turbulent kinetic energy* terhadap penurunan performa CRWT karena adanya penurunan faktor skala geometri rotor turbin. Vektor kecepatan pada tip *blade* antara rotor depan dan rotor belakang pada turbin CRWT dengan penurunan skala geometri ($FC = 0,25$ dan $0,26$ serta $0,3$) yang beroperasi di TSR rendah yang arahnya cenderung menguat menuju ke tip *blade* dengan besaran vektor yang makin kuat di sisi hisap (*suction surface*) *blade* rotor belakang. Besaran vektor ini semakin kuat ini dapat membentuk vorteks yang menurunkan performa CRWT.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Eggleston, D. M., & Stoddard, F. (1987). *Wind turbine engineering design*.
- [2]. Fluent, A. (2008). 12.0 Documentation 2009. *Theory Guide*.
- [3]. Jung, S. N., No, T.-S., & Ryu, K.-W. (2005). Aerodynamic performance prediction of a 30 kW counter-rotating wind turbine system. *Renewable Energy*, 30(5), 631–644.
- [4]. Kanemoto, T., & Galal, A. M. (2006). Development of intelligent wind turbine generator with tandem wind rotors and double rotational armatures (1st report, superior operation of tandem wind rotors). *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 49(2), 450–457.
- [5]. Koehuan A., V., Sugiyono, & Kamal, S. (2019). Numerical Analysis on Aerodynamic Performance of Counter-rotating Wind Turbine through Rear Rotor Configuration. *Modern Applied Science*, 13(2), 140–257.
- [6]. Koehuan, V. A., Sugiyono, & Kamal, S. (2017). Investigation of Counter-Rotating Wind Turbine Performance using Computational Fluid Dynamics

- Simulation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 267(1), 12034.
- [7]. Koehuan, Verdy A, & Mandala, J. F. (2020). Simulasi CFD Performa Aerodinamika Rotor Turbin Angin Counter-Rotating melalui Variasi Rasio Kecepatan Tip *Blade* dengan Solidity Konstan. *LONTAR Jurnal Teknik Mesin Undana (LJTMU)*, 7(02), 1–14. <https://doi.org/10.1234/ljtmu.v9i02.3342>
- [8]. Koehuan, Verdy Ariyanto, Nogur, L., & Jasron, J. U. (2014). Studi Eksperimental Variasi Sudut *Blade* terhadap Kinerja Rotor *Blade* Turbin Angin Tipe Propeler Poros Horizontal Model Contra Rotating. *LONTAR Jurnal Teknik Mesin Undana (LJTMU)*, 1(2), 72–81.
- [9]. Krogstad, P.-Å., & Eriksen, P. E. (2013). “Blind test” calculations of the performance and wake development for a model wind turbine. *Renewable Energy*, 50, 325–333.
- [10]. Kumar, P. S., Abraham, A., Bensingh, R. J., & Ilangovan, S. (2013). *Computational and experimental analysis of a counter-rotating wind turbine system*.
- [11]. Kumar, P. S., Bensingh, R. J., & Abraham, A. (2012). Computational analysis of 30 Kw contra rotor wind turbine. *ISRN Renewable Energy*, 2012.
- [12]. Lee, S., Kim, H., & Lee, S. (2010). Analysis of aerodynamic characteristics on a counter-rotating wind turbine. *Current Applied Physics*, 10(2 SUPPL.), S339–S342. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2009.11.073>
- [13]. MAULANA, A. (2019). *STUDI EKSPERIMENTAL PERFORMA COUNTER ROTATING WIND TURBINE BERDIAMETER 3 M*. Universitas Gadjah Mada.
- [14]. Mo, J. O., & Lee, Y. H. (2012). CFD Investigation on the aerodynamic characteristics of a small-sized wind turbine of NREL PHASE VI operating with a stall-regulated method. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(1), 81–92. <https://doi.org/10.1007/s12206-011-1014-7>
- [15]. Oggiano, L. (2014). CFD simulations on the NTNU wind turbine rotor and comparison with experiments. *Energy Procedia*, 58, 111–116.
- [16]. Sanderse, B. (2009). Aerodynamics of wind turbine wakes. *Energy Research Center of the Netherlands (ECN), ECN-E-09-016, Petten, The Netherlands, Tech. Rep*, 5(15), 153.
- [17]. Ushiyama, I., Shimota, T., & Miura, Y. (1996). An experimental study of the two-staged wind turbines. *Renewable Energy*, 9(1–4), 909–912. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0960148196884278>
- [18]. Vermeer, L. J., Sørensen, J. N., & Crespo, A. (2003). Wind turbine wake aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, 39, 467–510. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042103000782>
- [19]. Yulistiyanto, B. (2009). *Vorticity Fields on Flow with Vortex System*. 16(2), 83–94