

Analisis Garis Aliran (*Streamline*) pada Turbin Angin Sumbu Horizontal Tipe Propeler Tiga Blade Rotor Ganda dengan Metode CFD (*Computational Fluid Dynamics*)

Fernanda Yusuf Hangge¹, Verdy A. Koehuan², Wenseslaus Bunganaen^{3*}

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

*Corresponding author: fernandayusufhangge@gmail.com

ABSTRAK

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pola garis aliran fluida melewati rotor turbin angin sumbu horizontal atau horizontal axis wind turbine (HAWT) tipe propeler tiga blade rotor ganda kontra rotasi (double rotor counter-rotation) melalui 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. Garis aliran (*streamline*) pada bidang horizontal arah aksial CRWT mengkonfirmasi pengaruhnya terutama aliran di sekitar permukaan blade terhadap performa CRWT. Garis aliran pada permukaan blade rotor depan dan rotor belakang pada turbin CRWT terhadap penurunan skala geometri ($FC = 0,25$ dan $0,26$ serta $0,3$), dimana turbin beroperasi di TSR rendah sangat berbeda dari CRWT pada skala penuh ($FC=1,0$). Karena CRWT dengan penurunan factor skala geometri rotor yang membuat turbin beroperasi pada TSR rendah ini menyebabkan terjadinya separasi dan vortex di sekitar permukaan blade yang sangat kuat sehingga terjadi peningkatan gaya hambat dan penurunan gaya angkat. Peningkatan gaya hambat pada blade dapat menyebabkan penurunan torsi yang dibangkitkan oleh rotor turbin yang akibatnya menurunkan daya turbin..

ABSTRACT

The purpose of this study was to determine the line pattern of fluid flow through the rotor of a horizontal axis wind turbine (HAWT) three-blade double rotor counter-rotation propeller type through a computational fluid dynamics (CFD) method. CFD simulation results of the CRWT turbine rotor with reducing 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 flow line (streamline) in the horizontal plane of the CRWT axial direction confirms the effect especially the flow around the blade surface on CRWT performance. The flow lines on the blade surface of the front rotor and rear rotor in a CRWT turbine against reducing geometric scale ($FC = 0,25$ and $0,26$ and $0,3$), where the turbine operates at low TSR are very different from CRWT at full scale ($FC = 1,0$). Because CRWT with a reduce in the rotor geometry scale factor makes the turbine operate at a low TSR this causes separation and vortexes around the blade surface which are very strong resulting in an increase in drag force and a decrease in lift force. An increase in the drag on the blades can cause a decrease in the torque generated by the turbine rotor which consequently reduces the turbine power.

Keywords: *Streamline, Counter-rotating, Double Rotor, tip speed ratio, CFD*

PENDAHULUAN

Energi terbarukan, juga dikenal sebagai energi hijau, merujuk pada sumber energi yang dihasilkan dari sumber daya alam yang dapat diperbaharui secara terus menerus. Energi ini berasal dari sumber - sumber seperti 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 horizontal atau *horizontal axis wind turbine* (HAWT) tipe propeler tiga blade saat 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 dukungs dalam menggerakkan alternator (Kanemoto & Galal, 2006).

Karakteristik aliran pada turbin angin sumbu horisontal tipe propeler tiga *blade* rotor ganda kontra rotasi (*double rotor counter-rotation*) sangat kompleks, namun dengan memahami pola aliran di sekitar airfoil pada kondisi operasi rotor yang berbeda, maka performa rotor dapat diperbaiki. Oleh karena itu, dalam penelitian ini akan dilakukan analisis garis aliran (*streamline*) pada turbin angin sumbu horisontal tipe propeler tiga *blade* rotor ganda dengan metode CFD (*computational fluid dynamics*). Metode CFD dapat menampilkan karakter aliran pada kondisi rotor yang akan disimulasikan secara lengkap sesuai dengan parameter input yang didefinisikan sebelumnya.

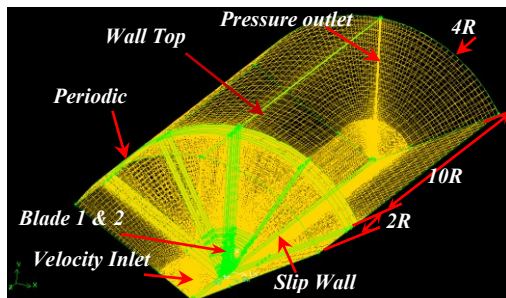
METODE PENELITIAN

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 120⁰ untuk solusi 1/3 domain dengan kondisi batas pada domain fluida adalah sebagai berikut:

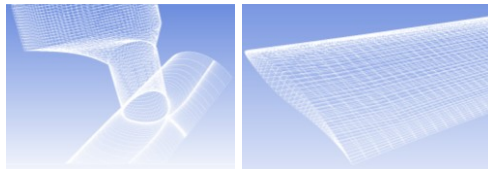
- *Inlet* : kecepatan masuk 4 m/s hingga 5 m/s, intensitas turbulen dari 5% dan rasio viskositas turbulen 10
- *Outlet* : Tekanan 1 atm
- *Blade* atau *wall* : kondisi *non slip*
- *Interface periodic* : *Periodic (rotational)*
- *Slip wall* : kondisi *non slip*
- *Wall top* : *specified shear stress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



Gambar 1. Domain komputasi.

Meshing

Pembuatan *meshing* melalui dekomposisi pada volume di sekitar *blade* agar dapat dimapping dengan elemen *mesh* tipe *hexahedral*, jumlah *mesh nodes* 1,38 juta (Tabel 1) untuk rotor tunggal menggunakan *software* Gambit 2.4.6. Gambar 2 menunjukkan komposisi *mesh* pada penampang *blade*.



Gambar 2. Hex mesh pada hub (kiri) dan tip *blade* (kanan).

Table 3.3. Informasi jumlah *mesh* model CFD turbin rotor tunggal.

Domain	Nodes	Elements	Hexahedra
Fluid	1380919	3982602	1340820

Prosedur solusi numerik

Prosedur Solusi numerik di ANSYS FLUENT mengubah persamaan diferensial nonlinear Navier-Stokes menjadi satu set persamaan aljabar dengan menggunakan solver berbasis tekanan. Menyelesaikan persamaan aljabar ini akan memberikan nilai (u, v, w, p, k, ω) di pusat sel, dan dengan persamaan aljabar ini sel-sel tetangga dari pusat sel (sebagai acuan) dapat diselesaikan secara iterasi. Mesh (jumlah sel) merupakan kunci tingkat akurasi dan lamanya proses

perhitungan, karena semakin banyak jumlah sel tentu hasil numeriknya makin baik tapi tentu waktu iterasinya makin lama. Tipe solver digunakan *pressure-based* dengan formulasi kecepatan absolut, sementara skema solusi untuk *pressure-velocity coupling* digunakan algoritma *coupled*. Dalam prosedur iterasi, metode solusi untuk penyelesaian persamaan tekanan digunakan *second order*, sedangkan untuk persamaan momentum dan turbulen digunakan QUICK, dimana sesuai dengan tipe *mesh* yang digunakan yakni *hexahedral* sehingga akurasi perhitungan akan lebih baik.

Verifikasi solusi numerik

Verifikasi solusi numerik dilakukan untuk menilai proses komputasi numeriknya sudah benar atau belum. Ada dua tahapan dalam proses verifikasi ini adalah cek konvergensi dan cek independensi *mesh*.

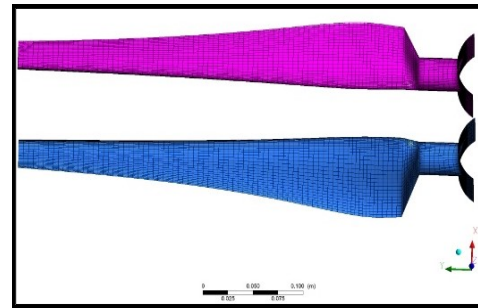
Residual adalah salah satu ukuran paling mendasar dari konvergensi solusi iteratif, karena secara langsung menghitung kesalahan dalam solusi sistem persamaan. Dalam analisis CFD, residu mengukur ketidakseimbangan lokal dari variabel yang dikonservasi dalam setiap volume kontrol. Oleh karena itu, setiap sel dalam model akan memiliki nilai residu sendiri untuk setiap persamaan yang diselesaikan. Kriteria konvergen dalam memonitor residual adalah 10^{-6} untuk semua parameter yang disimulasikan.

Surface Monitor memungkinkan untuk menyimpan riwayat konvergensi rata-rata, integral, laju aliran, atau rata-rata massa dari variabel bidang pada satu atau beberapa permukaan. *Surface monitoring* tekanan statis pada permukaan *blade* secara integral dapat dihitung setiap proses iterasi numerik, dimana nilai ini akan cenderung tetap apabila hasil komputasi numeriknya telah mencapai konvergen atau pun dengan suatu nilai residu tertentu.

Variable penelitian

Variable penelitian terdiri atas :

- Variabel bebas adalah variasi kecepatan angin dan rasio geometri CRWT, yakni 30%, 26,5% dan 25%.
- Variabel terikat yaitu pola aliran (*streamline*), 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.

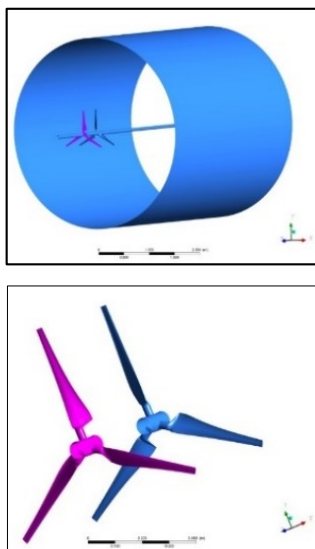


Gambar 4. Mesh penampang *blade* dimeshing menggunakan tipe *mesh hex*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Domain Komputasi

Domain simulasi CFD pada CRWT seperti pada Gambar 3 (domain lengkap), dengan rotor yang disimulasikan berada dalam domain berupa terowongan angin berbentuk silinder. 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 4).



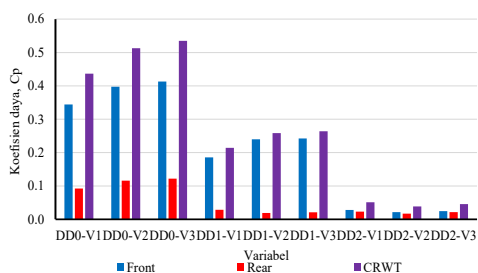
Gambar 3. Domain komputasi (terowongan angin berbentuk silinder), dan rotor depan dan rotor belakang.

Performa Turbin CRWT Hasil Simulasi

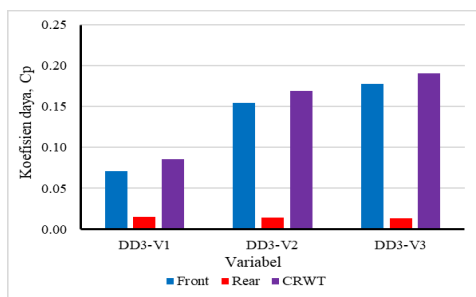
Analisis data dari hasil simulasi CFD dilakukan untuk menentukan besar koefisien daya turbin angin sumbu horizontal rotor ganda *counter-rotating*. Berikut ini adalah hasil analisis performa CRWT dari hasil simulasi CFD pada kondisi kecepatan angin 4 m/s hingga 5 m/s dengan skala geometri turbin 100%,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

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 5. 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 6 hingga Gambar 9).

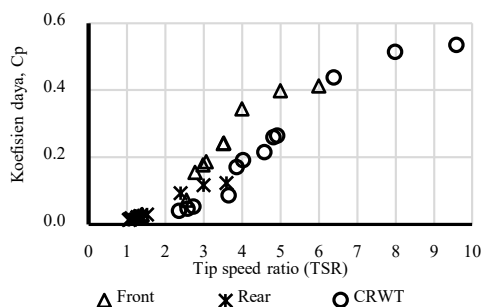


(a)

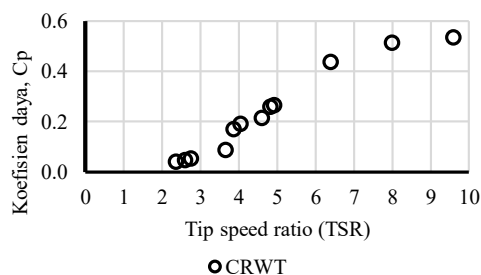


(b)

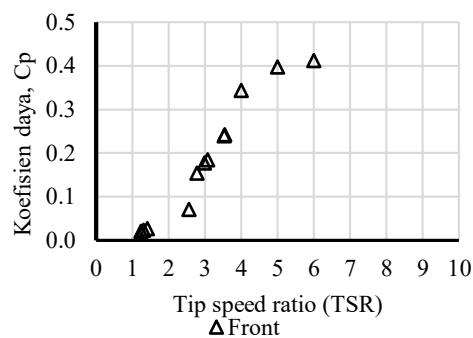
Gambar 5. a) Performa rotor turbin CRWT (rotor depan, rotor belakang, dan gabungan) terhadap variasi skala geometri rotor dan kecepatan angin, b) Performa rotor turbin CRWT terhadap variasi kecepatan angin dengan skala geometri rotor 25 % ($D=0,236$ m).



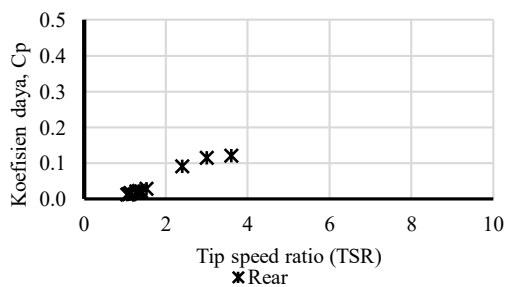
Gambar 6. Performa rotor turbin CRWT (rotor depan, rotor belakang, dan gabungan) terhadap variasi tip speed ratio (TSR).



Gambar 7. Performa rotor turbin CRWT (rotor gabungan) terhadap variasi tip speed ratio (TSR).



Gambar 8 Performa rotor turbin CRWT (rotor depan) terhadap variasi tip speed ratio (TSR).



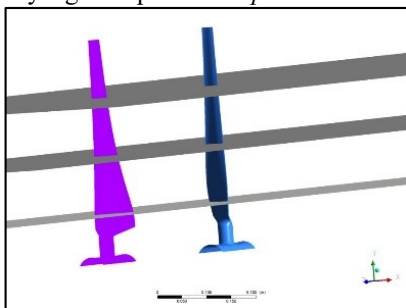
Gambar 9. Performa rotor turbin CRWT (rotor belakang) terhadap variasi tip speed ratio (TSR).

Pola Garis aliran (streamline) melewati CRWT

Visualisasi aliran yang melewati rotor turbin CRWT dari hasil simulasi CFD ini diamati pada penampang dalam arah aksial melalui bidang horisontal di sekitar permukaan *blade*. Aliran melalui permukaan *blade* dilihat pada penampang melintang

blade dalam arah horisontal, masing-masing pada posisi 25%, 50% dan 75 % dari panjang *blade* (jari-jari rotor). Visualisasi aliran ini dapat menjelaskan hubungan antara garis aliran (*streamline*) yang menggambarkan karakteristik aliran melewati rotor turbin terhadap performa dari turbin CRWT dengan variasi kecepatan angin dan faktor skala geometri. Karakteristik aliran yang akan divisualisasikan adalah garis aliran (*streamline*) melewati rotor turbin CRWT dalam arah aksial. *Streamline* adalah garis imajiner yang digambar dalam aliran fluida sehingga arah vector kecepatan fluida selalu sejajar dengan garis tersebut.

Visualisasi aliran pada rotor turbin angin yang dilakukan oleh Zhang dkk. (2012), Massouh dan Dobrev (2014), dan Tran dkk. (2015) diadopsi untuk menggambarkan karakteristik aliran di daerah *wake* turbin. Visualisasi aliran pada CRWT dari hasil simulasi CFD terhadap variasi *tip speed ratio* ditunjukkan dalam garis aliran (*streamline*) di sekitar *blade* rotor depan maupun rotor belakang dalam arah aksial ke arah *downstream*. Hasil simulasi CFD menunjukkan 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*.



Gambar 10. Plane pada posisi 25%, 50% dan 75 % dari panjang *blade* (jari-jari rotor).

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 garis aliran (*streamline*) di sekitar permukaan *blade* rotor depan maupun rotor belakang dalam arah aksial ke arah *downstream*. Garis aliran 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.

Gambar 11 hingga Gambar 18 menunjukkan garis aliran di sekitar *blade* pada penampang melintang *blade* dalam arah horisontal, masing-masing pada posisi 25%, 50% dan 75 % dari panjang *blade* (jari-jari rotor) menuju ke *downstream* 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. Pada Gambar 11 menunjukkan garis aliran (*streamline*) masing-masing pada *blade* rotor depan dan rotor belakang turbin DD0 ($D=0,9440$ m), masing-masing pada TSR = 4, 5, dan 6 serta TSR = 2,4; 3,0; dan 3,6. Hal ini

menunjukkan garis aliran pada permukaan rotor depan cenderung membentuk pola yang mengikuti bentuk airfoil di semua posisi *blade* untuk TSR = 4, 5, dan 6. Sedangkan pada permukaan *blade* rotor belakang, terutama di TSR rendah cenderung mengalami pemisahan aliran atau separasi dari permukaan airfoil. Pembentukan separasi di rotor belakang ini makin besar ke arah pangkal atau hub *blade*. Separasi sifatnya sangat merugikan karena meningkatkan gaya hambat dan menurunkan gaya angkat rotor *blade*.

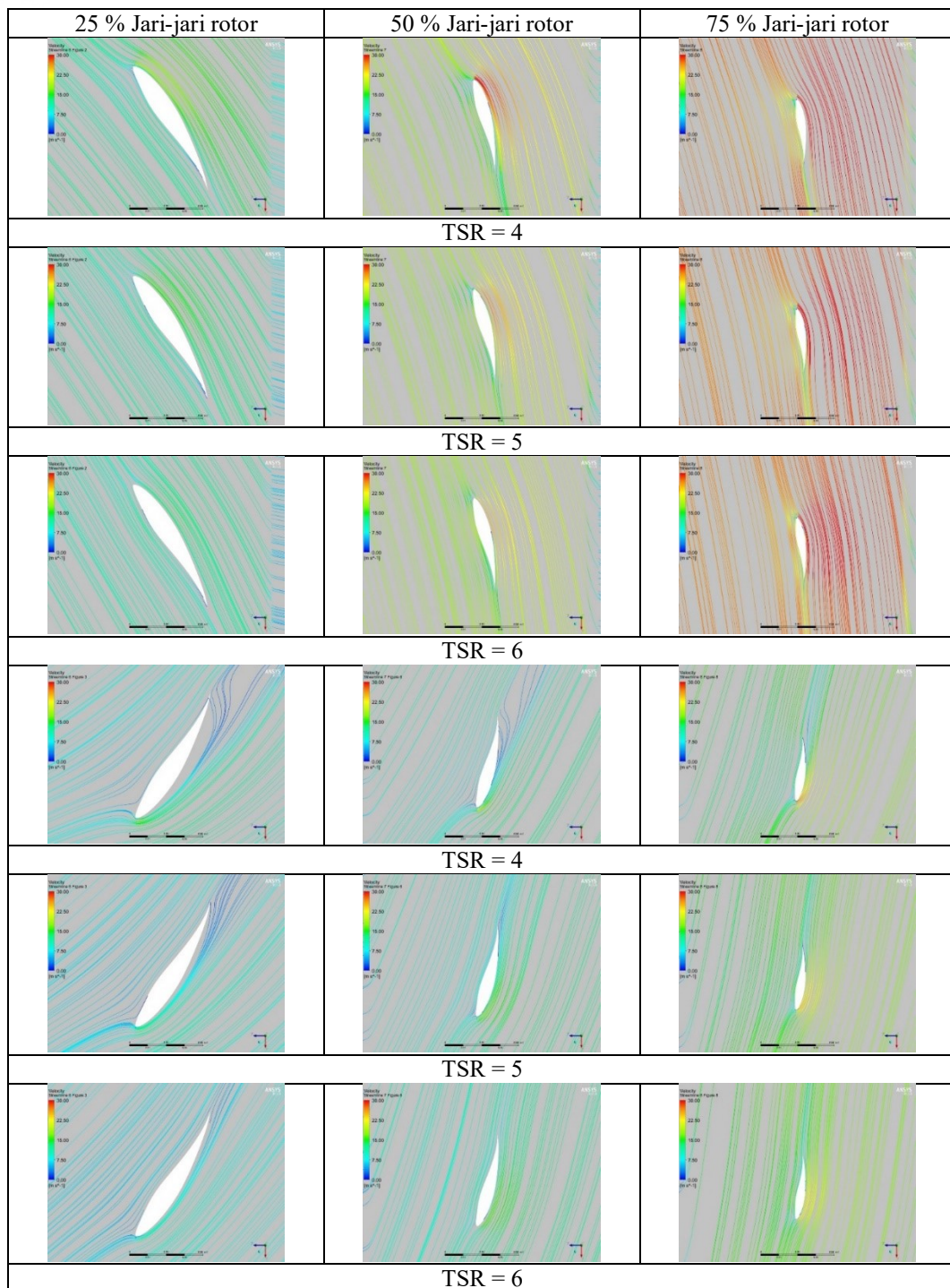
Pada Gambar 12 menunjukkan garis aliran (*streamline*) masing-masing pada *blade* rotor depan dan rotor belakang turbin DD1 ($D=0,2832$ m), masing-masing pada TSR = 3,06; 3,52; dan 3,53 serta TSR = 1,53; 1,31; dan 1,39. Hal ini menunjukkan garis aliran pada permukaan rotor depan mulai terbentuk pola yang tidak mengikuti bentuk airfoil terutama di TSR rendah dan ke arah pangkal *blade* (hub). Sedangkan pada permukaan *blade* rotor belakang, terjadi separasi yang sangat besar di sepanjang permukaan *blade* dengan pertumbuhan *vortex* terbesar terjadi di TSR rendah. Pembentukan separasi dengan *vortex* yang besar di rotor belakang ini membawa dampak meningkatnya gaya hambat dan menurunkan gaya angkat rotor *blade*. Peningkatan gaya hambat yang disertai penurunan gaya angkat ini sangat merugikan karena torsi yang dibangkitkan menjadi rendah yang menyebabkan penurunan daya output turbin. Hal ini sesuai dengan hasil analisis performa CRWT, dimana pada turbin DD1 performanya cenderung mengalami penurunan terutama pada rotor belakang yang beroperasi pada TSR yang lebih rendah.

Pada Gambar 13 menunjukkan garis aliran (*streamline*) masing-masing pada *blade* rotor depan dan rotor belakang turbin DD2 ($D=0,250$ m), masing-masing pada TSR = 1,40; 1,24; dan 1,31 serta TSR = 1,34; 1,13; dan 1,28. Hal ini menunjukkan garis aliran pada permukaan rotor depan terbentuk separasi dengan *vortex* yang sangat besar di sepanjang permukaan *blade*. Demikian juga pada permukaan *blade* rotor belakang, terjadi separasi yang sangat besar di sepanjang

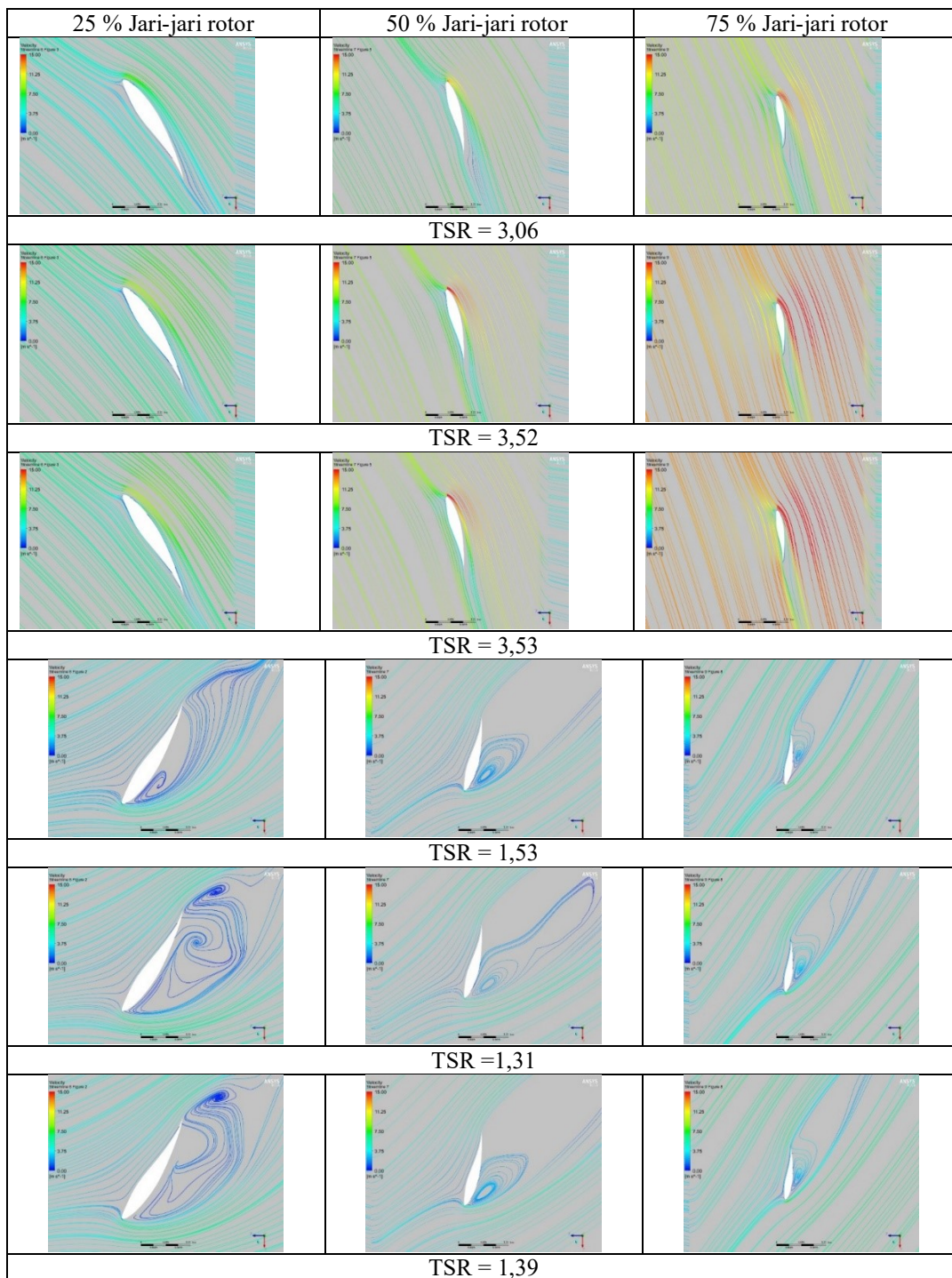
permukaan *blade* dengan pertumbuhan *vortex* lebih besar. Pembentukan separasi dengan *vortex* yang besar di rotor belakang ini membawa dampak meningkatnya gaya hambat dan menurunkan gaya angkat rotor *blade*. Peningkatan gaya hambat yang disertai penurunan gaya angkat ini sangat merugikan karena torsi yang dibangkitkan menjadi rendah yang menyebabkan penurunan daya output turbin. Hal ini sesuai dengan hasil analisis performa CRWT, dimana pada turbin DD2 performanya cenderung mengalami penurunan terutama pada rotor belakang yang beroperasi pada TSR yang lebih rendah.

Turbin CRWT dengan penurunan faktor skala geometri yang cenderung beroperasi pada TSR rendah memperlihatkan pola aliran dengan pola garis aliran yang sangat fluktuatif. Garis aliran di sekitar permukaan *blade* arah aksial rotor CRWT dari hasil simulasi CFD menunjukkan terjadi separasi aliran yang disertai *vortex* terbesar di mulai dari hub *blade* dan berkembang menuju tip *blade*. Separasi aliran dengan *vortex* yang besar ini memicu pertumbuhan vorteks yang besar di daerah tip dan bergerak ke arah *downstream* Ozbay dkk. (2014b).

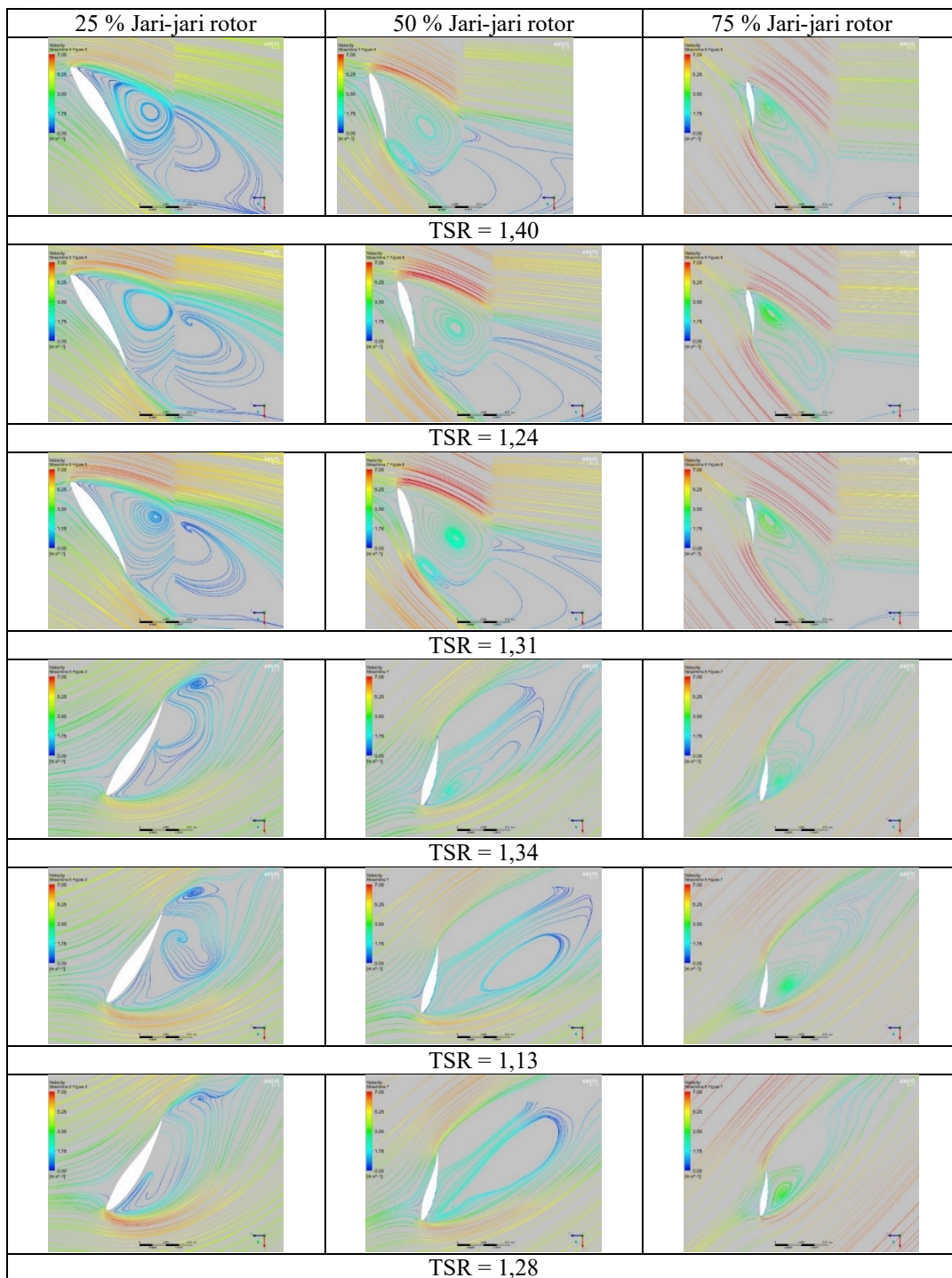
Vortex yang kuat di daerah tip, dapat meningkatkan kerugian aliran dan sekaligus kerugian energi mekanik rotor turbin angin. Selain itu, penurunan kecepatan yang tinggi dan diikuti dengan peningkatan turbulensi yang tinggi, juga menunjukkan adanya kerugian aliran di area tersebut. Namun demikian, penurunan kecepatan yang tinggi di belakang rotor juga menunjukkan adanya konversi energi angin yang efisien dari rotor tersebut, (Adaramola dan Krogstad, 2011). Sebaliknya penurunan kecepatan dengan level turbulensi tertentu dapat mempercepat laju pemulihan kecepatan aliran (*velocity recovery*) dalam gelombang aliran 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 meningkat



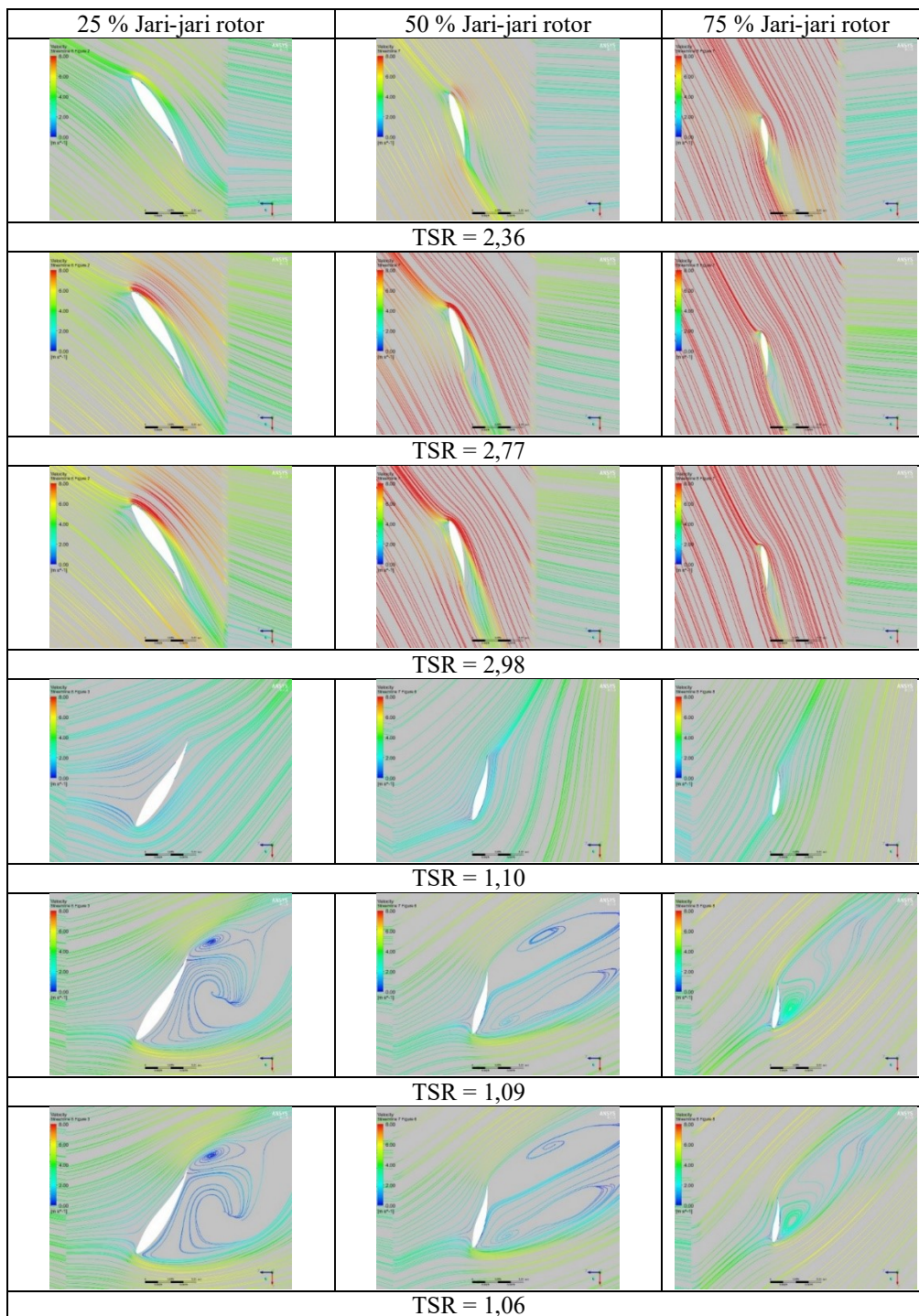
Gambar 12. Garis aliran pada *blade* rotor depan dan belakang Turbin DD0 (D=0,9440 m) pada TSR berbeda.



Gambar 14. Garis aliran pada *blade* rotor belakang Turbin DD1 ($D=0,2832$ m), TSR = 1,53; 1,31; dan 1,39.



Gambar 16. Garis aliran pada *blade* rotor belakang Turbin DD2 (D=0,250 m), TSR = 1,34; 1,13; dan 1,28.



Gambar 18. Garis aliran pada *blade* rotor belakang Turbin DD3 ($D=0,236$ m), TSR = 1,10; 1,09; dan 1,06.

Garis aliran pada bidang horizontal arah aksial CRWT mengkonfirmasi pengaruhnya terhadap performa CRWT. Garis aliran pada permukaan *blade* rotor depan dan rotor belakang pada turbin CRWT terhadap penurunan skala geometri (FC = 0,25 dan 0,26 serta 0,3), dimana turbin beroperasi di TSR rendah sangat berbeda dari CRWT pada skala penuh (FC=1,0). Karena CRWT dengan penurunan factor skala geometri rotor yang membuat turbin beroperasi pada TSR rendah ini menyebabkan terjadinya separasi dan *vortex* di sekitar permukaan *blade* sehingga terjadi peningkatan gaya hambat dan penurunan gaya angkat. Peningkatan gaya hambat pada *blade* dapat menyebabkan penurunan torsi yang dibangkitkan oleh rotor turbin yang akibatnya menurunkan daya turbin.

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.
- Garis aliran (*streamline*) pada bidang horizontal arah aksial CRWT mengkonfirmasi pengaruhnya terutama aliran di sekitar permukaan *blade* terhadap performa CRWT. Garis aliran pada permukaan *blade* rotor depan dan rotor belakang pada turbin CRWT terhadap penurunan skala geometri (FC = 0,25 dan 0,26 serta 0,3), dimana turbin beroperasi di TSR rendah sangat berbeda dari CRWT pada skala penuh (FC=1,0). Karena CRWT dengan penurunan factor skala geometri rotor yang membuat turbin beroperasi pada TSR rendah ini menyebabkan terjadinya separasi dan

vortex di sekitar permukaan *blade* yang sangat kuat sehingga terjadi peningkatan gaya hambat dan penurunan gaya angkat. Peningkatan gaya hambat pada *blade* dapat menyebabkan penurunan torsi yang dibangkitkan oleh rotor turbin yang akibatnya menurunkan daya turbin.

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. *ISRIN 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.