

Simulasi CFD Performa Aerodinamika Rotor Turbin Angin *Counter-Rotating* melalui Variasi Rasio Kecepatan Tip Blade dengan Solidity Konstan

Verdy A Koehuan¹, dan Jani F. Mandala²

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknik Universitas Nusa Cendana

²Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknik Universitas Nusa Cendana

Jl. Adi Sucipto, Penfui-Kupang, NTT 85001, Tlp: (0380)881597

E-mail: verdy.koehuan@staf.undana.ac.id

ABSTRAK

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan studi secara numerik terhadap parameter-parameter aerodinamika rotor, yakni rasio kecepatan tip, fenomena stol, serta kerugian-kerugian aliran akibat vorteks di sepanjang blade rotor turbin. Analisis numerik melalui metode simulasi CFD atau *computational fluid dynamics* diterapkan pada turbin angin *counter-rotating* untuk dapat memprediksi dan menganalisis kinerja rotor secara aerodinamika melalui variasi rasio diameter, rasio jarak terhadap rasio kecepatan tip blade atau *tip speed ratio* pada solidity rotor yang konstan. Kinerja rotor turbin ini direpresentasikan sebagai daya output maupun koefisien daya dari setiap variabel penelitian untuk dapat diperoleh kinerja terbaik sekaligus desain rotor turbin sebagai output penelitian. Hasil prediksi CFD menunjukkan tren yang mendekati eksperimen, dimana nilai koefisien daya maksimum terjadi pada TSR = 6 dengan $C_{P,max} = 0.453$ dimana lebih rendah 3,09% dari hasil eksperimen. Hal ini menunjukkan bahwa model simulasi CFD tervalidasi pada hampir semua rentang TSR yang divariasikan, kecuali pada TSR tinggi cenderung menjauh dari eksperimen. Fluktuasi aliran setelah melewati rotor kedua diakibatkan oleh vorteks pada hub dan tip blade dari rotor depan maupun rotor belakang. Rotor dengan tip blade yang tidak sejajar ($D_1/D_2 < 1,0$ dan $D_1/D_2 > 1,0$) lebih fluktuatif dari pada rotor dengan tip sejajar ($D_1/D_2 = 1,0$).

ABSTRACT

The aim of this research is to numerically study the aerodynamic parameters of the rotor, namely the tip speed ratio, stall phenomenon, and flow losses due to the vortex along the turbine rotor blade. Numerical analysis through the CFD or computational fluid dynamics simulation method is applied to counter-rotating wind turbines to predict and analyze the aerodynamic performance of the rotor through variations in the diameter ratio, distance ratio to tip speed ratio on constant rotor solidity. The performance of this turbine rotor is represented as the output power and the power coefficient of each research variable to obtain the best performance as well as the turbine rotor design as the research output. CFD prediction results show a trend that is closer to the experiment, where the maximum power coefficient value occurs at TSR = 6 with $C_{P,max} = 0.453$ which is 3.09% lower than the experimental results. This shows that the CFD simulation model is validated in almost all of the varied TSR ranges, except at high TSR it tends to move away from the experiment. Flow fluctuation after passing through the second rotor is caused by the vortices in the hub and blade tips of the front and rear rotors. Rotors with misaligned blade tips ($D_1/D_2 < 1.0$ and $D_1/D_2 > 1.0$) are more volatile than rotors with aligned tip blade ($D_1/D_2 = 1.0$).

Keywords: counter-rotating wind turbine, tip speed ratio, aerodynamic performance, vortex flow, stall phenomenon

PENDAHULUAN

Turbin angin sumbu horisontal tipe propeler tiga blade rotor ganda kontra rotasi (*counter-rotation wind turbine*) yang disingkat CRWT merupakan turbin angin cerdas terdiri atas dua buah rotor yang ditempatkan pada satu

sumbu putar dengan arah putaran saling berlawanan dan saling mendukung dengan atau tanpa transmisi untuk menggerakkan poros generator listrik. Efisiensi konversi energi angin turbin dengan menggunakan turbin rotor ganda kontra rotasi secara teoritis lebih baik dari pada rotor tunggal. Efisiensi konversi energi ini biasa

disebut koefisien daya (C_p) dimana berdasarkan teori momentum Betz, koefisien daya maksimum rotor tunggal adalah $16/27$ (59,25%), sedangkan menurut teori aktuator disk, koefisien daya maksimum rotor ganda kontra rotasi (*double rotor counter-rotation*) adalah $16/25$ (64%), Newman, (1983). Chantharasenawong, (2008) menunjukkan model turbin angin rotor ganda kontra rotasi (*double rotor counter-rotation*) secara ideal mampu mengkonversi energi angin 68,1 % dengan asumsi rasio kecepatan aksial pada rotor pertama 0,2 dan rotor kedua 0,22 untuk diameter rotor yang sama. Artinya turbin angin rotor ganda ini secara ideal mampu mengkonversi energi angin 8,84 % lebih besar dari pada rotor tunggal.

Rotor berukuran besar ditempatkan di depan, sedangkan yang berukuran kecil di belakangnya, kecepatan rotasi dari kedua rotor ini bekerja secara sinkron dan saling mendukung untuk menggerakkan alternator. Peningkatan kecepatan angin membuat kecepatan rotasi kedua rotor meningkat, dan kecepatan rotasi dari rotor belakang menjadi lebih cepat dibandingkan dengan rotor depan karena ukurannya yang kecil. Bagian belakang rotor akan mencapai kecepatan rotasi maksimum pada kondisi kecepatan angin rancangan. Peningkatan kecepatan angin, membuat rotor belakang berkurang kecepatannya secara bertahap dan mulai berputar pada arah yang sama dari rotor depan sehingga bertepatan dengan torsi yang lebih besar diterima oleh alternator, Sutikno, dkk, (2012).

Performa aerodinamik turbin angin di atas dapat ditingkatkan, hanya jika interaksi aliran di antara rotor depan dan rotor belakang dipahami, hal ini karena rotor belakang beroperasi dalam gangguan aliran dari rotor depan. Kemampuan rotor blade turbin angin yang ini akan terus dikembangkan untuk mencapai daya output turbin yang maksimal, Koehuan, dkk. (2017; 2019).

Koefisien daya maksimum utilitas modern skala HAWT atau *horizontal axis wind turbine* dalam prakteknya sangat terbatas peningkatannya. Sebagian dari kekurangan ini disebabkan kerugian aerodinamis di wilayah

hub blade. Blade di wilayah hub dirancang untuk menahan momen lentur blade. Untuk integritas struktural, relatif tebal dan airfoil yang dipilih di daerah ini pasti secara aerodinamis tidak menguntungkan. Pemisahan aliran di wilayah hub penyebab aliran balik, yang memperburuk kinerja aerodinamis rotor blade. Desain turbin kontra rotating secara aerodinamik dibuat pada kondisi soliditi yang sama dengan turbin angin rotor tunggal agar dapat dibandingkan. Untuk itu diperlukan metode yang efektif dalam memprediksi aerodinamika turbin angin kontra rotating, khususnya interaksi aliran diantara rotor depan dan rotor belakang yang secara eksperimen masih sulit diprediksi dan hanya beberapa metode numerik yang telah mempelajari turbin kontra rotating ini, Lee, dkk, (2012).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan studi secara numerik terhadap parameter-parameter aerodinamika rotor, yakni rasio kecepatan tip, fenomena stol, serta kerugian-kerugian aliran akibat vorteks di sepanjang blade rotor turbin. Analisis numerik melalui metode simulasi CFD atau *computational fluid dynamics* diterapkan pada turbin angin *counter-rotating* untuk dapat memprediksi dan menganalisis kinerja rotor secara aerodinamika melalui variasi rasio diameter, rasio jarak terhadap rasio kecepatan tip blade atau *tip speed ratio* pada soliditi rotor yang konstan. Kinerja rotor turbin ini direpresentasikan sebagai daya output maupun koefisien daya dari setiap variabel penelitian untuk dapat diperoleh kinerja terbaik sekaligus desain rotor turbin sebagai output penelitian.

KAJIAN PUSTAKA

Kumar dkk., (2013; 2012) dengan menggunakan desain rotor yang sama dengan Jung dkk., (2005) melalui simulasi CFD dan eksperimen dengan penggunaan airfoil simetris pada rotor kedua menunjukkan performa aerodinamika *counter-rotating* lebih baik dari rotor tunggal. Kumar dkk., (2013; 2012) melakukan variasi jarak rotor depan dan rotor belakang (rasio diameter 1:2) untuk optimasi daya terkonversi, diperoleh pada jarak $0,65D_1$

(D_1 adalah diameter rotor depan) peningkatan daya maksimum 9,67 %, jarak $0,5D_1$ daya maksimum 8,9 % sedangkan pada jarak $0,75D_1$ daya maksimum 7,8 %. Bahkan dengan penggunaan airfoil simetris untuk rotor depan maupun rotor belakang menunjukkan performa *counter-rotating* lebih baik dari rotor tunggal (Lee dkk., 2012).

No dkk., (2009) melakukan pemodelan turbin *counter-rotating* dengan penggunaan airfoil yang sama pada rotor tunggal melalui metode *blade element momentum* (BEM) dan simulasi dengan penerapan sistem kontrol sudut *pitch* menggunakan WINSIM (simulink pada matlab), menunjukkan bahwa performa CRWT lebih baik dari rotor tunggal. Mitulet dkk., (2015) juga secara eksperimen dengan menerapkan airfoil rotor tunggal pada *counter-rotating* dapat meningkatkan performa CRWT.

Turbin *counter-rotating* dengan diameter rotor dan penggunaan airfoil yang sama baik pada rotor depan maupun rotor belakang, menunjukkan bahwa performa CRWT lebih baik dari rotor tunggal. Hal ini ditunjukkan oleh Shen dkk., (2007) menggunakan simulasi CFD dengan EllipSys3D untuk memprediksi performa CRWT menggunakan metode *blade element momentum* (BEM) yang dikombinasikan dengan teknik *actuator line*. Merchant dkk., (2009) dan Sutikno & Saepudin, (2011) juga menunjukkan hal yang sama masing-masing melalui eksperimen dengan variasi sudut *twist* dan simulasi CFD dengan analisis rasio *lift drag* pada kedua rotor. Selain itu, Lee dkk., (2010; 2013), Herzog dkk., (2010), dan Hoang & Yang, (2013) melalui hasil simulasi CFD juga menunjukkan peningkatan performa CRWT.

Performa aerodinamika turbin angin *counter-rotating* dengan diameter rotor depan lebih besar dari rotor belakang dan penggunaan generator sinkron yang terhubung langsung dengan poros turbin (tanpa stator konvensional), Kanemoto & Galal, (2006) menunjukkan hasil optimasi sudut *blade* dan *blade chamber* pada rotor depan dan rotor belakang serta variasi *chord* maupun *chamber* akan meningkatkan performa aerodinamiknya. Hal yang sama juga dilakukan oleh Kubo dan Kanemoto, (2008)

namun digunakan *blade* dengan profil airfoil MEL002 juga dapat meningkatkan koefisien daya melalui optimasi profil airfoil dan sudut *blade* pada rotor depan dan rotor belakang. Performa turbin angin *counter-rotating* selain dipengaruhi oleh kecepatan angin, dan sudut *blade*, tapi juga dipengaruhi oleh pembebanan pada alternatornya, performa maksimum dicapai pada kondisi sudut *blade* 20° baik rotor depan maupun rotor belakang, Kubo, dkk. (2010). Usui dkk., (2012) dengan kondisi tandem rotor melalui perbaikan profil *blade* dan optimasi sudut *blade* diperoleh efisiensi yang meningkat. Selain itu, diperoleh temuan yang menarik bahwa profil airfoil *blade* dengan rasio antara *lift* dan *drag* yang tinggi, sudut *blade* rotor belakang lebih kecil, sedangkan jika rasio antara *lift* dan *drag* rendah, sudutnya meningkat.

Rosenberg dkk., (2014) memperkenalkan sebuah konsep turbin angin baru rotor ganda (*double rotor wind turbine* atau DRWT), rotor sekunder lebih kecil, secara aksial sejajar dengan rotor utama, dan dirancang dengan airfoil rasio koefisien *lift* dan *drag* tinggi. Asumsi aliran uniform dan kondisi turbulen dengan menggunakan RANS-OpenFOAM (*Open source Field Operation and Manipulation*) dan LES-SOWFA (*Simulator for Wind Farm Applications*). Parametrik sapuan rotor menggunakan simulasi RANS-Openfoam atau *Reynolds-averaged Navier Stokes*, menunjukkan bahwa ukuran turbin rotor sekunder harus 25% jari-jari rotor utama dan secara aksial dipisahkan dari rotor utama dengan jarak 0,2 kali radius rotor utama. Simulasi arus eddy dengan LES atau *large eddy simulations* untuk DRWT secara optimal beroperasi di aliran seragam menunjukkan kenaikan bersih pembangkitan daya listrik sekitar 4,6%. Sedangkan perbandingan *wake* mengkonfirmasi ekstraksi energi yang efisien di wilayah *root* dengan DRWT tersebut.

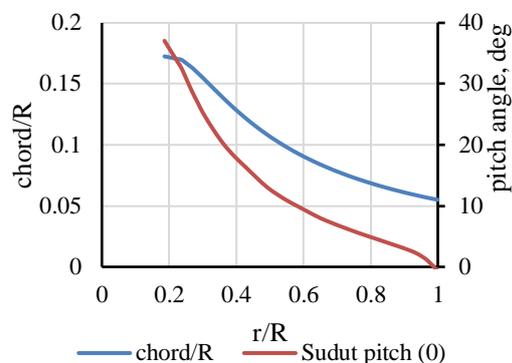
Moghadassian dkk., (2016) melanjutkan penelitian Rosenberg dkk., (2014) untuk kondisi aliran masuk yang berbeda. Performa aerodinamis DRWT untuk dua kondisi simulasi ABL (*atmospheric boundary layer*) menunjukkan peningkatan konversi energi dalam tabung alir pada daerah hub turbin.

Peningkatan konversi energy 4,6% lebih besar dari rotor tunggal, 5,2% dan 10,8% masing-masing untuk kondisi aliran masuk *uniform*, *stable*, dan *neutral*. DRWT meningkatkan gelombang aliran dan momentum aksial ketika kondisi atmosfer aliran masuk (*background*) turbulensi cukup tinggi (seperti dalam kasus *neutral*). Peningkatan gelombang aliran dikaitkan dengan intensitas turbulensi yang meningkat. Hal ini berpotensi memiliki konsekuensi berlawanan terhadap beban fatik pada rotor turbin yang berada di belakang. Analisa spektral beban aerodinamis menunjukkan terjadi sedikit pengurangan level momen lentur pada daerah hub untuk rotor utama (rotor belakang) dalam DRWT.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode numerik melalui simulasi *computational fluid dynamics* (CFD). Model numerik dibuat sesuai dengan kondisi lapangan atau kondisi sebenarnya, dengan model blade yang telah diaplikasikan pada turbin rotor tunggal. Model blade untuk turbin angin rotor tunggal ini menggunakan airfoil seri S826 yang dikeluarkan oleh NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), geometri blade pada Gambar 1 dengan diameter rotor 0,944 m, dengan koefisien daya maksimum 0,456 pada putaran 728 rpm (TSR = 6), (Krogstad, dkk. 2013). Model blade rotor tunggal ini akan digunakan sebagai sampel uji karakteristik

aerodinamika (model blade standar) agar hasilnya dapat dibandingkan dengan rotor ganda kontra rotasi.



Gambar 1. Geometri blade.

Variabel Penelitian

Variable penelitian terdiri atas :

- Variabel bebas adalah rasio kecepatan tip atau *tip speed ratio*, rasio jarak aksial antara dua rotor (Z) terhadap diameter rotor depan (D_1) atau ($Z/D_1=0,2$ hingga $Z/D_1=0,5$), dan rasio diameter (D_1/D_2), lihat 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 solidity, sudut pitch, dan jumlah sudu tiga buah untuk rotor depan dan rotor belakang.

Table 1. Data parameter penelitian dual rotor.

D_1 (m)	D_2 (m)	D_1/D_2	R_{hub} (m)	R_{tip} (m)	soliditi
0.944	3.776	0.25	0.260	1.888	0.091778
0.944	1.888	0.50	0.130	0.944	0.091778
0.944	1.259	0.75	0.087	0.629	0.091778
0.944	0.944	1.00	0.065	0.472	0.091778
0.944	0.755	1.25	0.052	0.378	0.091778
0.944	0.629	1.50	0.043	0.315	0.091778
0.944	0.539	1.75	0.037	0.270	0.091778
0.944	0.472	2.00	0.033	0.236	0.091778

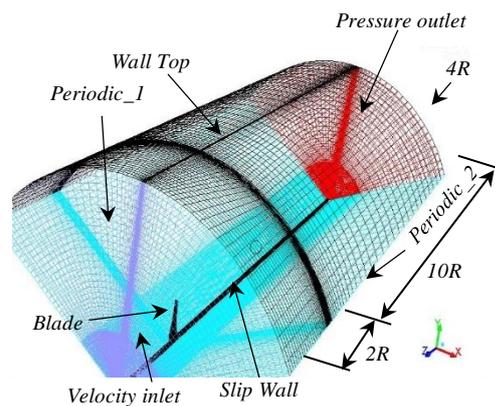
Model Numerik

Metode *computational fluid dynamic* (CFD) memungkinkan kita untuk meniru keseluruhan aliran sekitar rotor turbin angin yang mencakup menara dan bodinya. Di tahun 1999 Duque melakukan perhitungan aerodinamika rotor turbin angin menggunakan model RANS (*Reynolds-averaged Navier Stokes*) dan penerapan grid untuk memudahkan simulasi aliran dengan konfigurasi yang kompleks. Meskipun demikian kemampuan CFD tetap tergantung pada kemampuan komputer dan keabsahan model Navier-Stokes yang dibuat, CFD mempunyai keuntungan yang potensial dalam pemahaman aerodinamika HAWT secara terperinci. Pada penelitian ini, terapkan model numerik RANS dengan model turbulen $k - \epsilon$ *realizable* untuk memperhitungkan pengaruh atau efek lapis batas pada permukaan blade serta efek vorteks di tip blade. Model turbulen ini lebih ekonomis karena tidak membutuhkan memori dan waktu komputasi yang besar, sementara tingkat akurasi cukup baik, Koehuan, dkk. (2017; 2019).

Mesh (jumlah *node*) merupakan kunci tingkat akurasi dan lamanya proses perhitungan selain model turbulen yang digunakan, karena semakin banyak jumlah *node mesh* tentu hasil numeriknya makin baik tapi tentu waktu iterasinya semakin lama. Pembuatan *mesh* digunakan *software Gambit*, dengan melakukan dekomposisi pada model *blade* dan domain komputasi agar dapat di *mapping* dengan elemen *mesh* tipe *hexahedral* (Gambar 2). Pada tahapan processor, *solver* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *pressure-based* dengan formulasi kecepatan *absolute*, 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 skema QUICK, dimana sesuai dengan tipe *mesh* yang digunakan yakni *hexahedral* sehingga akurasi perhitungan akan lebih baik.

Persamaan volume atur adalah persamaan kontinuitas dan persamaan Navier-Stokes ditulis dalam bentuk rotasional, dimana hal ini

memiliki keuntungan membuat simulasi tidak membutuhkan *mesh* bergerak dalam memperhitungkan rotasi *blade* dengan *moving referensi frames* (MRF). Model numerik yang digunakan adalah model dengan hanya 1/3 dari domain (Gambar 2) menggunakan asumsi periodisitas pada penampang antarmukanya dengan mendefinisikan sebagai *linked face* untuk periodik yang selanjutnya model numerik tersebut diputar 120° untuk solusi 1/3 domain dengan kondisi batas.



Gambar 2. Domain Komputasi, jari-jari rotor $R = 0,472$ m.

Tahapan pelaksanaan penelitian terdiri atas pembuatan geometri *blade*, domain komputasi, kondisi batas, pembuatan *mesh*, parameter komputasi dan model turbulen, serta analisis hasil simulasi. Pembuatan *mesh* merupakan kunci utama dalam tingkatan akurasi hasil simulasi, sehingga untuk proses verifikasi dan validasi dilakukan perbaikan terhadap kualitas *mesh* tersebut. Beberapa variasi jumlah *node mesh* dan rasio jarak pada permukaan dinding blade dilakukan untuk mendapatkan hasil simulasi terbaik. Validasi terhadap model numerik dilakukan dengan menghitung *error* pada parameter koefisien daya turbin terhadap hasil eksperimen BT4, (Krogstad, dkk. 2013).

Performansi rotor *blade* ditampilkan dalam parameter koefisien daya dan koefisien *thrust*. Dengan menggunakan pendekatan teori momentum, dapat dihitung koefisien daya turbin (C_p) yang merupakan hasil pembagian

antara daya mekanik yang dihasilkan rotor (P_{out}) dan daya total dalam aliran angin (P_{in}) untuk luas sapuan rotor yang diberikan, sementara torsi rotor, Q diperoleh dari hasil simulasi. Koefisien *thrust* merupakan pembagian antara gaya aksial pada rotor dengan gaya dinamik. Analisis ini dirumuskan sebagai berikut:

$$C_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{Q \cdot \omega}{\frac{1}{2} \rho V_0^3 A} \quad (1)$$

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho V_0^2 A} \quad (2)$$

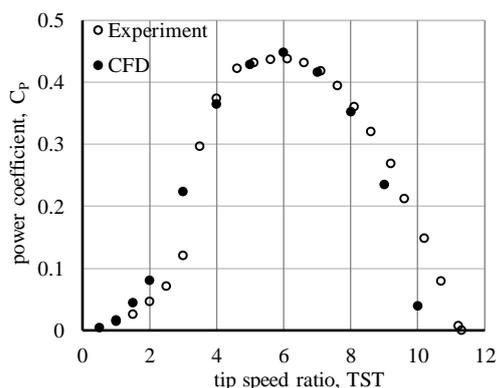
Proses simulasi pada penelitian ini dijalankan secara paralel menggunakan Fluent Ansys 15.0.7 dan terpisah pada dua unit komputer dengan spesifikasi masing-masing adalah *processor Intel Core i3 4130* CPU, memori 16GB, VGA NVidia GeForce GT 730 2GB dan *processor Intel Core i7 3770* CPU, memori 24GB, VGA AMD Radeon HD 5700 2GB.

PEMBAHASAN

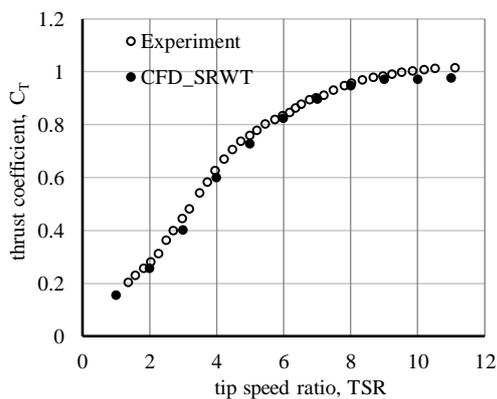
Validasi model numerik

Hasil simulasi CFD turbin rotor tunggal digunakan untuk validasi model numerik dengan menggunakan model turbulen $k - \epsilon$ *realizable*. Gambar 3 dan Gambar 4 masing-masing menunjukkan hubungan koefisien daya dan koefisien thrust terhadap *tip speed ratio* dari hasil prediksi CFD dan eksperimen (Krogstad, dkk. 2013). Hasil prediksi CFD menunjukkan tren yang mendekati eksperimen, dimana nilai koefisien daya maksimum terjadi pada $TSR = 6$ dengan $C_{p,max} = 0.453$ dimana lebih rendah 3,09% dari hasil eksperimen. Hal ini menunjukkan bahwa model simulasi CFD tervalidasi pada hampir semua rentang TSR yang divariasikan, kecuali pada TSR tinggi cenderung menjauh dari eksperimen.

Hasil validasi model numerik rotor tunggal ini kemudian diterapkan pada CRWT dengan mempertahankan struktur mesh yang telah dibangun pada SRWT. Walaupun relatif sulit dalam aplikasi meshing tersebut, namun dalam penelitian ini dapat diasumsikan bahwa struktur mesh pada SRWT dan CRWT sama.



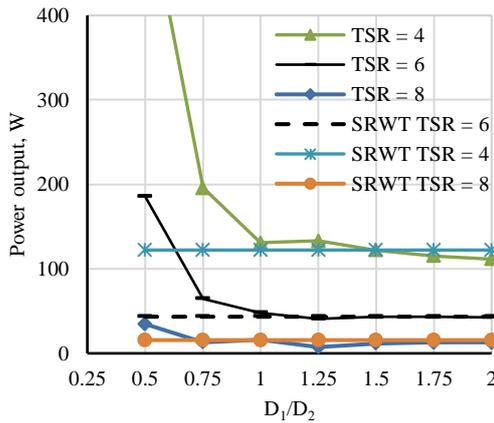
Gambar 3. Hubungan koefisien daya dan tip speed ratio turbin rotor tunggal.



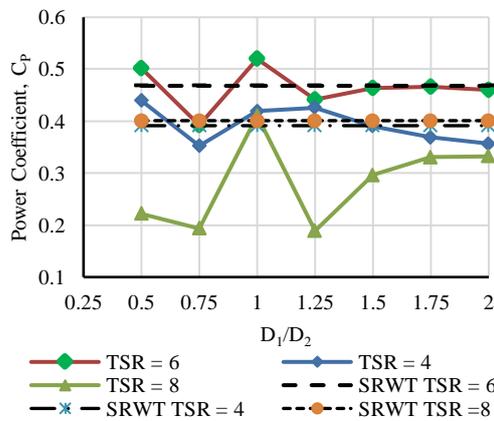
Gambar 4. Hubungan koefisien thrust dan tip speed ratio turbin rotor tunggal.

Pengaruh variasi diameter rotor terhadap TSR

Analisis numerik melalui metode CFD diterapkan pada turbin angin dual rotor kontra rotasi untuk dapat memprediksi dan menganalisis kinerja rotor secara aerodinamika. Prediksi melalui variasi *tip speed ratio* dan rasio diameter rotor dengan jarak rotor dipertahankan pada $Z/D_1 = 0.25$, putaran rotor $n_1/n_2=0.6$ pada *solidity* yang sama. Kinerja rotor turbin ini direpresentasikan sebagai daya output maupun koefisien daya dari setiap variabel penelitian (Gambar 5 dan Gambar 6).



Gambar 5. Hubungan daya output CRWT terhadap variasi rasio diameter rotor pada rasio putaran $n_2/n_1 = 0,6$ untuk beberapa TSR dengan metode CFD



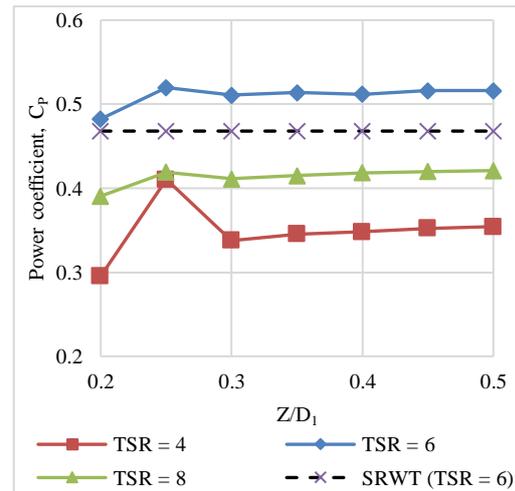
Gambar 6. Hubungan koefisien daya CRWT terhadap variasi rasio diameter rotor pada rasio putaran $n_2/n_1 = 0,6$ untuk beberapa TSR dengan metode CFD.

Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan hubungan daya output dan koefisien daya CRWT terhadap variasi rasio diameter rotor pada rasio putaran $n_2/n_1 = 0,6$ untuk beberapa TSR dengan metode CFD. Hasil prediksi CFD ini menunjukkan peningkatan daya output terhadap penurunan rasio diameter, sementara koefisien daya maksimum terjadi pada $D_1/D_2=0,5$ dan $D_1/D_2=1,0$. Variasi TSR juga sangat berpengaruh terhadap koefisien daya CRWT, walaupun pada TSR rendah daya output

lebih tinggi namun koefisien daya maksimum terjadi pada TSR=6. Sebaliknya pada TSR tinggi performa CRWT mengalami penurunan, hal yang sama juga terjadi pada SRWT. Hasil prediksi CFD menunjukkan untuk rasio diameter yang mendekati 1 ($1 < D_1/D_2 < 1$), performa CFD mengalami penurunan yang cukup tajam. Fenomena ini akan dijelaskan pada visualisasi aliran.

Pengaruh variasi jarak rotor terhadap TSR

Prediksi CFD melalui variasi *tip speed ratio* dan rasio jarak rotor dengan rasio diameter dipertahankan pada $D_1/D_2=1,0$ putaran rotor $n_1/n_2=0,6$ pada *solidity* yang sama. Kinerja rotor turbin ini direpresentasikan sebagai daya output maupun koefisien daya dari setiap variabel penelitian. Gambar 7 menunjukkan hubungan koefisien daya CRWT terhadap variasi rasio jarak rotor pada rasio putaran $n_2/n_1 = 0,6$ untuk beberapa TSR dengan metode CFD. Hasil prediksi CFD ini menunjukkan peningkatan daya output terhadap penambahan rasio jarak rotor, sementara koefisien daya maksimum terjadi pada $Z/D_1=0,25$. Variasi TSR sangat berpengaruh terhadap koefisien daya CRWT, pada TSR rendah maupun tinggi koefisien daya lebih rendah dari SRWT, namun koefisien daya tertinggi terjadi pada TSR=6.



Gambar 7. Hubungan koefisien daya terhadap variasi jarak rotor pada TSR = 4, TSR = 6, dan TSR = 8 untuk melalui metode CFD.

Visualisasi aliran pada CRWT hasil simulasi

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 dan *vorticity* di daerah wake. Gambar 8 hingga Gambar 13 menunjukkan kontur kecepatan aliran dan kontur *vorticity* dalam arah aksial menuju ke *downstream* pada CRWT terhadap rasio diameter dan rasio jarak rotor berdasarkan hasil simulasi CFD pada kondisi *peak performance* ($TSR_1 = 6$). 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.

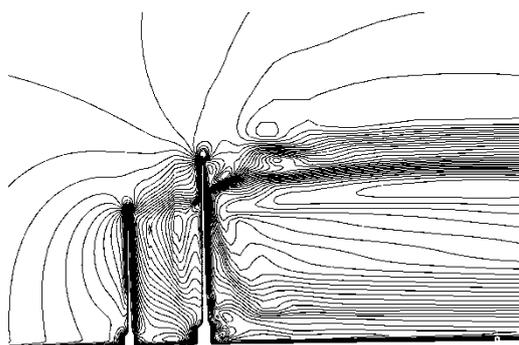
Karakteristik aliran pada CRWT ini berbeda-beda untuk setiap variasi diameter maupun jarak aksial rotor belakang terhadap rotor depan. Kontur kecepatan aksial untuk CRWT dengan variasi rasio diameter $D_1/D_2 < 1,0$ menunjukkan pola yang sangat berbeda dengan $D_1/D_2 \geq 1,0$ terutama jika dilihat dari pertumbuhan vorteks di *downstream*. Fluktuasi aliran setelah melewati rotor kedua diakibatkan oleh vorteks pada hub dan tip blade dari rotor depan maupun rotor belakang. Rotor dengan tip blade yang tidak sejajar ($D_1/D_2 < 1,0$ dan $D_1/D_2 > 1,0$) lebih fluktuatif dari pada rotor dengan tip sejajar ($D_1/D_2 = 1,0$). Aliran masuk rotor belakang juga menunjukkan penurunan yang lebih curam pada penambahan rasio diameter rotor dan hampir pada seluruh penampang blade.

Kontur kecepatan aksial dalam iso garis kecepatan seperti pada Gambar 8 dan Gambar 10 memperlihatkan adanya fluktuasi aliran terhadap variasi rasio diameter CRWT dengan pertumbuhan vorteks di tip maupun hub. Pertumbuhan vorteks akibat interaksi rotor depan dan rotor belakang ini memberikan karakteristik aliran pada rasio diameter rotor $D_1/D_2 < 1,0$ dengan tip vorteks dari rotor depan tambahan vorteks di rotor belakang menjadi tiga tempat. Hal ini mempercepat pemulihan

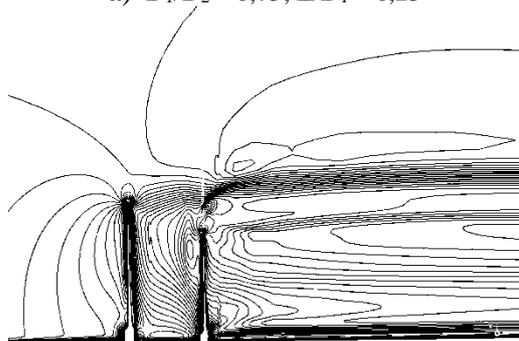
kecepatan aliran di belakang rotor kedua terutama di sekitar daerah hub yang mana dapat menurunkan performa rotor belakangnya. Sedangkan untuk rasio diameter $D_1/D_2 \geq 1,0$ terjadi pertumbuhan vorteks yang cenderung menguat ke arah tip blade dengan penambahan rasio diameter rotor. Pertumbuhan vorteks yang kuat ini akibat dari menguatnya aliran radial ke arah tip blade dengan disertai separasi yang meningkat di *suction surface* dari daerah hub.

Gambar 8 dan Gambar 10 menunjukkan penurunan kecepatan yang lebih tinggi ke arah *downstream* pada rasio diameter $D_1/D_2 \geq 1$ baik setelah rotor depan maupun rotor belakang dengan penambahan rasio diameter. Aliran masuk rotor belakang dengan kecepatan yang rendah karena terjadi penurunan kecepatan yang cukup tinggi setelah melewati rotor depan sehingga memperburuk performa rotor belakang, walaupun terdapat peningkatan performa rotor depan. 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 penambahan TSR.

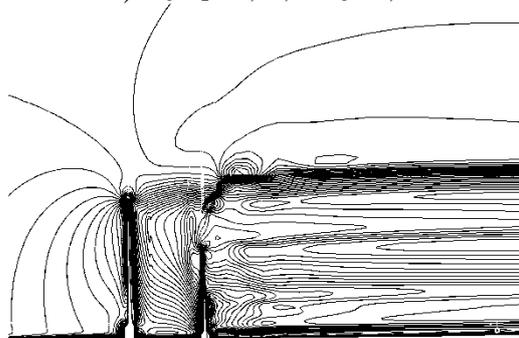
Distribusi kecepatan aliran berhubungan dengan vortisitas seperti pada Gambar 9 dan Gambar 11 terlihat bahwa daerah berwarna merah yang mengandung vortisitas positif sedangkan aliran balik mengandung vortisitas negatif yang ditandai dengan kontur vortisitas berwarna biru. Hal ini menunjukkan karakteristik aliran pada CRWT dengan rasio diameter rotor $D_1/D_2 < 1,0$ memberikan tip vorteks rotor depan tambahan vorteks menjadi dua tempat di *blade* rotor belakang. Pada $TSR_1=6$, akibat interaksi rotor depan dan rotor belakang melalui penambahan jarak rotor menunjukkan terjadi percepatan pemulihan kecepatan aliran setelah melewati rotor depan dan penurunan kecepatan cenderung meningkat setelah melewati rotor belakang. Hal ini dapat dilihat dari kontur kecepatan aksial aliran setelah melewati rotor depan pada rasio jarak, $L/D_1=0,25$ yang lebih curam dan setelah rotor belakang yang lebih renggang ke arah *downstream* pada rasio jarak, $L/D_1=0,5$ dan $L/D_1=0,75$.



a) $D_1/D_2 = 0,75; Z/D_1 = 0,25$

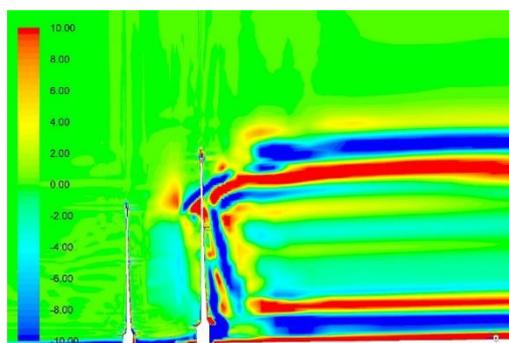


b) $D_1/D_2 = 1,25; Z/D_1 = 0,25$

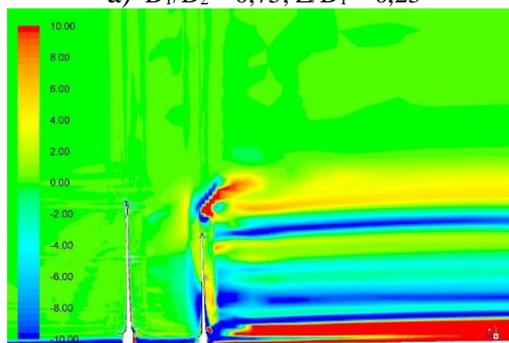


c) $D_1/D_2 = 1,5; Z/D_1 = 0,25$

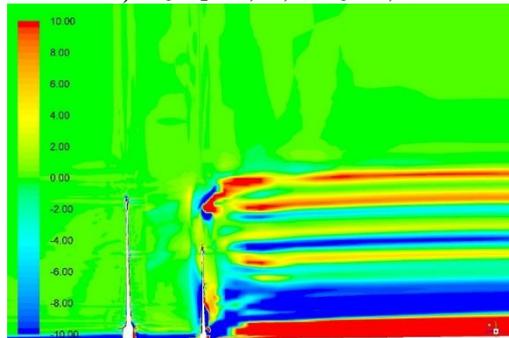
Gambar 8. Kontur kecepatan aksial dalam iso garis kecepatan pada CRWT terhadap rasio diameter dengan rasio jarak, $Z/D_1 = 0,25$ ($TSR_1 = 6$).



a) $D_1/D_2 = 0,75; Z/D_1 = 0,25$

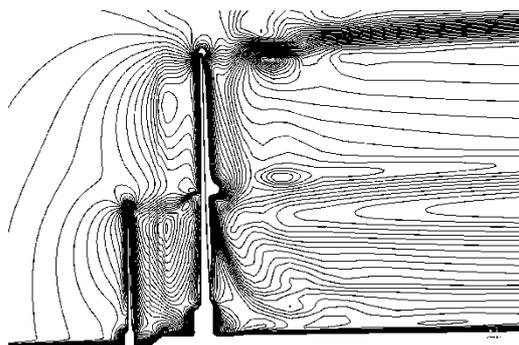


b) $D_1/D_2 = 1,25; Z/D_1 = 0,25$

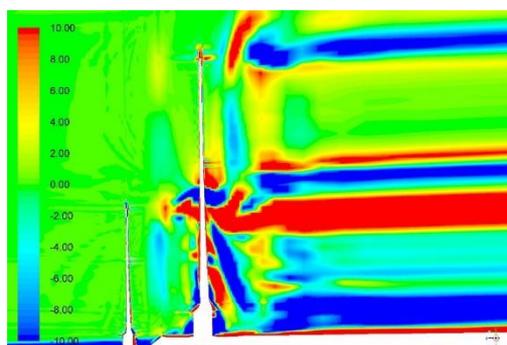


c) $D_1/D_2 = 1,5; Z/D_1 = 0,25$

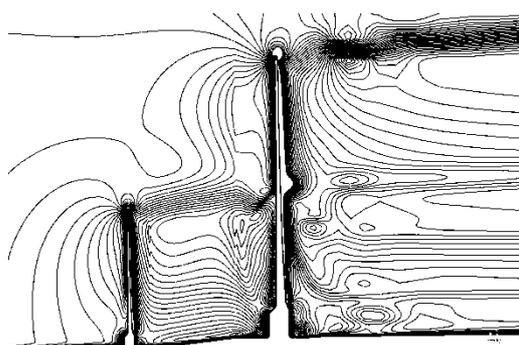
Gambar 9. Kontur vorticity dalam aran aksial pada CRWT terhadap rasio diameter dengan rasio jarak, $Z/D_1 = 0,25$ ($TSR_1 = 6$).



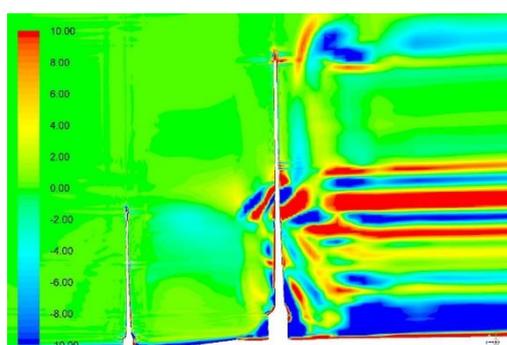
a) $D_1/D_2 = 0,5; Z/D_1 = 0,25$



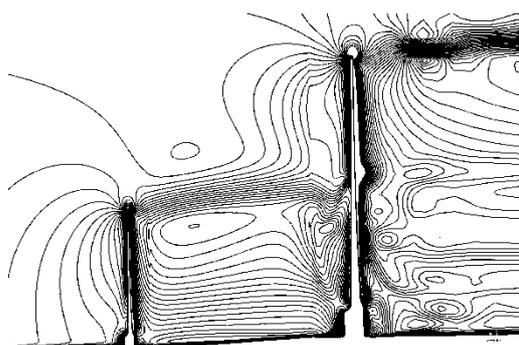
a) $D_1/D_2 = 0,5; Z/D_1 = 0,25$



b) $D_1/D_2 = 0,5; Z/D_1 = 0,5$



b) $D_1/D_2 = 0,5; Z/D_1 = 0,5$



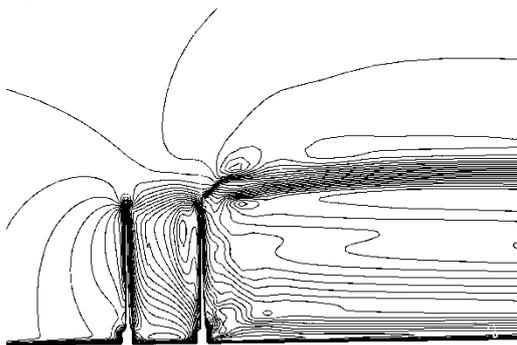
c) $D_1/D_2 = 0,5; Z/D_1 = 0,75$



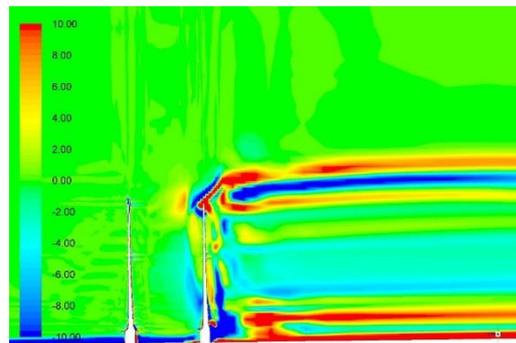
c) $D_1/D_2 = 0,5; Z/D_1 = 0,75$

Gambar 10. Kontur kecepatan aksial dalam iso garis kecepatan pada CRWT terhadap rasio jarak dengan rasio diameter, $D_1/D_2=0,5$ ($TSR_1 = 6$).

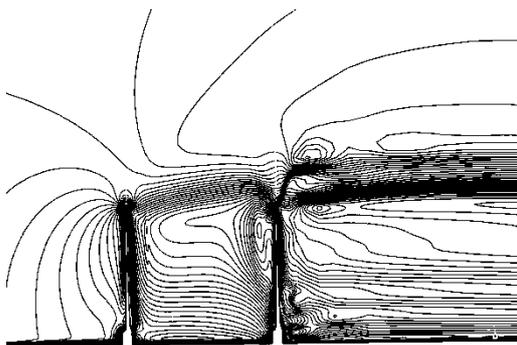
Gambar 11. Kontur *vorticity* dalam aran aksial pada CRWT terhadap rasio jarak dengan rasio diameter, $D_1/D_2=0,5$ ($TSR_1 = 6$).



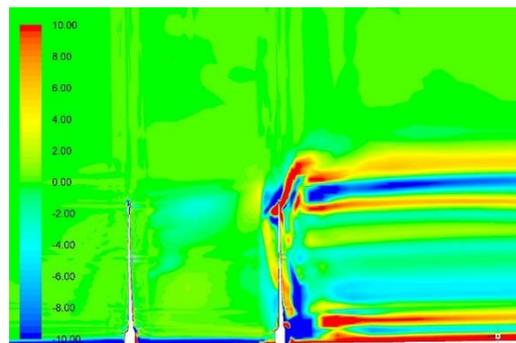
d) $D_1/D_2 = 1,0$ dan $Z/D_1 = 0,25$



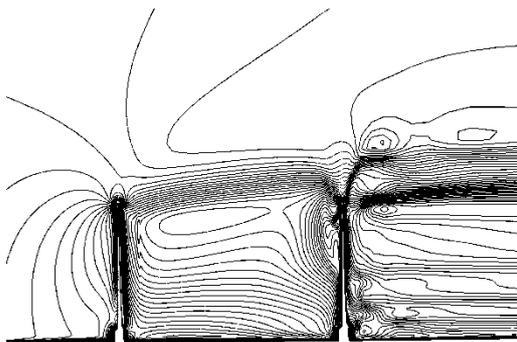
a) $D_1/D_2 = 1,0$ dan $Z/D_1 = 0,25$



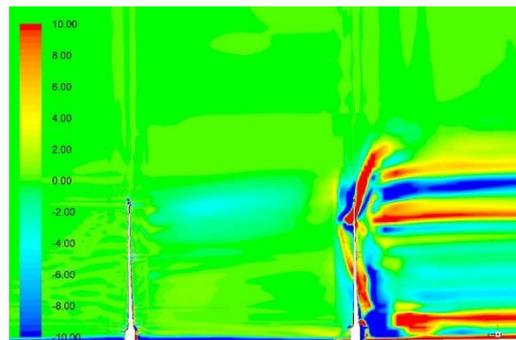
e) $D_1/D_2 = 1,0$ dan $Z/D_1 = 0,5$



b) $D_1/D_2 = 1,0$ dan $Z/D_1 = 0,5$



f) $D_1/D_2 = 1,0$ dan $Z/D_1 = 0,75$



c) $D_1/D_2 = 1,0$ dan $Z/D_1 = 0,75$

Gambar 12. Kontur kecepatan aksial dalam iso garis kecepatan pada CRWT terhadap rasio jarak dengan rasio diameter, $D_1/D_2=1,0$ ($TSR_1 = 6$).

Gambar 13. Kontur *vorticity* dalam aran aksial pada CRWT terhadap rasio jarak dengan rasio diameter, $D_1/D_2=1,0$ ($TSR_1 = 6$).

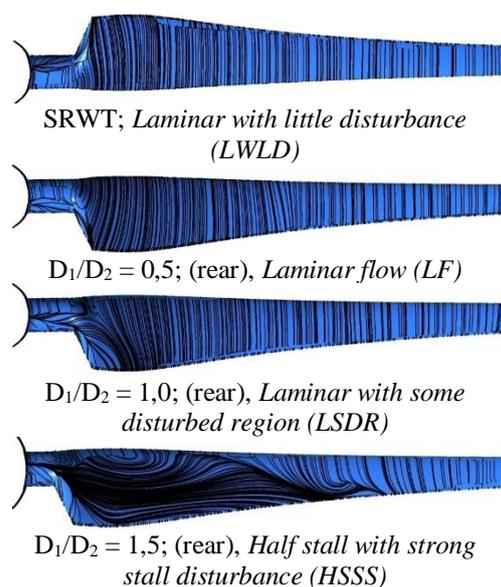
Gambar 12 dan Gambar 13 masing-masing menunjukkan kontur kecepatan aksial dalam iso garis kecepatan dan vortisiti pada CRWT terhadap rasio jarak dengan rasio diameter, $D_1/D_2=1,0$ ($TSR_1 = 6$). Kontur kecepatan aksial aliran ini menjadi lebih curam dan lebih renggang masing-masing setelah melewati rotor depan dan rotor belakang dengan bertambahnya rasio jarak, dari $L/D_1=0,5$ dan $L/D_1=0,75$. Kontur kecepatan aksial yang curam atau rapat ke arah dinding *blade* menuju daerah *wake* menunjukkan adanya penurunan kecepatan yang cukup tinggi. Sebaliknya kontur yang landai dan renggang ke arah dinding *blade* menuju daerah *wake* menunjukkan adanya percepatan pemulihan kecepatan angin. Penurunan kecepatan aliran setelah melewati rotor depan tentu dapat meningkatkan performa rotor depan tapi sebaliknya menurunkan performa rotor belakang. Sementara percepatan pemulihan kecepatan aliran setelah melewati rotor depan dapat memperbaiki performa rotor belakang karena kecepatan aliran sebelum masuk rotor belakang mengalami percepatan akibat gerak kontra-rotasi dari CRWT.

Separasi yang besar pada permukaan *blade* meningkatkan gaya hambat dan menurunkan gaya angkat yang tentu saja dapat merugikan pembangkitan torsi pada rotor sehingga performa rotor semakin menurun. Efek dari penambahan rotor kedua pada CRWT yang berada di daerah *wake* rotor depan memberikan gangguan aliran pada rotor belakang dengan pembentukan separasi di *suction surface* dari *trailing edge* hingga *leading edge* yang dimulai dari daerah *hub* ke *tip*. Karakteristik aliran pada permukaan *blade* seperti yang ditunjukkan oleh Wu dan Porté-Agel, (2011) dan dimodifikasi oleh Sutrisno dkk, (2016); (2017) digunakan untuk katakterisasi aliran pada CRWT terhadap variasi rasio diameter dan rasio jarak rotor. Parameter aliran tersebut adalah *laminar flow (LF)*, *weak stall with little disturbance (WSLD)*, *half stall with strong stall disturbance (HSSS)*, dan *full stall with strong accelerated (FSSA)*.

Tipe-tipe aliran pada *suction surface* *blade* turbin angin melalui *limiting streamlines* seperti yang ditunjukkan oleh Wu dan Porté-Agel, (2011) dan dimodifikasi oleh Sutrisno dkk, (2016); (2017) diterangkan untuk menjelaskan

fenomena separasi dan *stall* yang terjadi pada CRWT dengan variasi diameter rotor. Gambar 14 menunjukkan tipe aliran pada *suction surface* rotor belakang CRWT dengan variasi rasio diameter pada rasio jarak $Z/D_1 = 0,25$ untuk kondisi *peak performance*, $TSR_1 = 6$. Aliran laminar terbentuk pada *peak performance* di *suction surface* rotor SRWT dan CRWT dengan rasio diameter, $D_1/D_2 = 0,5$.

Efek dari penambahan rasio diameter rotor CRWT memberikan gangguan aliran pada rotor belakang dengan pembentukan separasi di *suction surface* dari daerah *hub* hingga terjadi *stall* pada sebagian *blade* (*Half stall with strong stall disturbance (HSSS)*) CRWT dengan $D_1/D_2 = 1,5$. Separasi yang besar pada permukaan *blade* meningkatkan gaya hambat dan menurunkan gaya angkat yang tentu saja dapat menurunkan pembangkitan torsi pada rotor sehingga performa rotor belakang semakin menurun.



Gambar 14. Pola aliran pada permukaan *suction blade* melalui *streamline shear* SRWT dan rotor belakang CRWT untuk kondisi *peak performance*, $TSR_1 = 6$ dengan rasio diameter, $D_1/D_2 = 0,5$; $1,0$; dan $1,5$; pada rasio jarak $Z/D_1 = 0,25$.

SIMPULAN

- Hasil prediksi CFD menunjukkan tren yang mendekati eksperimen, dimana nilai koefisien daya maksimum terjadi pada TSR = 6 dengan $C_{p,maks} = 0.453$ dimana lebih rendah 3,09% dari hasil eksperimen. Hal ini menunjukkan bahwa model simulasi CFD tervalidasi pada hampir semua rentang TSR yang divariasikan, kecuali pada TSR tinggi cenderung menjauh dari eksperimen. Fluktuasi aliran setelah melewati rotor kedua diakibatkan oleh vorteks pada hub dan tip blade dari rotor depan maupun rotor belakang. Rotor dengan tip blade yang tidak sejajar ($D_1/D_2 < 1,0$ dan $D_1/D_2 > 1,0$) lebih fluktuatif dari pada rotor dengan tip sejajar ($D_1/D_2 = 1,0$).
- Daerah di belakang rotor dengan penurunan kecepatan yang tinggi tidak secara langsung berkontribusi positif pada kenaikan daya turbin seperti pada kasus SRWT, 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 dengan rasio diameter, $D_1/D_2 > 0,5$ cenderung menurunkan performa rotornya.
- Interaksi rotor depan dan rotor belakang melalui penambahan jarak rotor menunjukkan terjadi percepatan pemulihan kecepatan aliran setelah melewati rotor depan dan penurunan kecepatan cenderung meningkat setelah melewati rotor belakang. Hal ini dapat dilihat dari kontur kecepatan aksial aliran setelah melewati rotor depan pada rasio jarak, $L/D_1=0,25$ yang lebih curam dan setelah rotor belakang yang lebih renggang ke arah *downstream* pada rasio jarak, $L/D_1=0,5$ dan $L/D_1=0,75$.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. G. Newman, "Multiple actuator-disc theory for wind turbines," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 24, no. 3, pp. 215–225, 1986.
- [2] C. Chantharasenawong, "Axial momentum theory for turbines with coaxial counter rotating rotors," 2008.
- [3] P. Sutikno and D. B. Saepudin, "Design and blade optimization of contra rotation double rotor wind turbine," *Int. J. Mech. Mechatronics Eng. IJMME*, Vol., no. 1, 2011.
- [4] V. Koehuan, S. K.-I. C. S. Materials, and undefined 2017, "Investigation of Counter-Rotating Wind Turbine Performance using Computational Fluid Dynamics Simulation," *iopscience.iop.org*, Accessed: Jun. 10, 2018. [Online]. Available: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/267/1/012034/meta>.
- [5] V. A. Koehuan, Sugiyono, and S. Kamal, "Numerical Analysis on Aerodynamic Performance of Counter-rotating Wind Turbine through Rear Rotor Configuration," *Math. Model. Methods Appl. Sci.*, vol. 13, p. 240, 2019.
- [6] S. Lee, H. Kim, E. Son, and S. Lee, "Effects of design parameters on aerodynamic performance of a counter-rotating wind turbine," *Renew. Energy*, vol. 42, pp. 140–144, 2012.
- [7] P. S. Kumar, R. J. Bensingh, and A. Abraham, "Computational analysis of 30 Kw contra rotor wind turbine," *ISRN Renew. Energy*, vol. 2012, 2012.
- [8] P. S. Kumar, A. Abraham, R. J. Bensingh, and S. Ilangovan, "Computational and experimental analysis of a counter-rotating wind turbine system," 2013.
- [9] S. N. Jung, T.-S. No, and K.-W. Ryu, "Aerodynamic performance prediction of a 30 kW counter-rotating wind turbine system," *Renew. Energy*, vol. 30, no. 5, pp. 631–644, 2005.
- [10] T.-S. No, J. E. Kim, J. H. Moon, and S. J. Kim, "Modeling, control, and simulation of dual rotor wind turbine generator system," *Renew. Energy*, vol. 34, no. 10, pp. 2124–2132, 2009, doi: 10.1016/j.renene.2009.01.019.
- [11] L.-A. Mituleț, G. Oprina, R.-A. Chihaiia, S. Nicolaie, A. Nedelcu, and M. Popescu, "Wind tunnel testing for a new

- experimental model of counter-rotating wind turbine,” *Procedia Eng.*, vol. 100, pp. 1141–1149, 2015.
- [12] W. Z. Shen, V. A. K. Zakkam, J. N. Sørensen, and K. Appa, “Analysis of counter-rotating wind turbines,” in *Journal of Physics: Conference Series*, 2007, vol. 75, no. 1, p. 12003.
- [13] S. Merchant, J. Gregg, I. Gravagne, and K. Van Treuren, “Wind Tunnel Analysis Of A Counter-Rotating Wind Turbine,” 2009.
- [14] S. Lee, H. Kim, and S. Lee, “Analysis of aerodynamic characteristics on a counter-rotating wind turbine,” *Curr. Appl. Phys.*, vol. 10, no. 2, pp. S339–S342, 2010.
- [15] S. Lee, E. Son, and S. Lee, “Velocity interference in the rear rotor of a counter-rotating wind turbine,” *Renew. energy*, vol. 54, pp. 235–240, 2013.
- [16] R. Herzog, A. P. Schaffarczyk, A. Wacinski, and O. Zürcher, “Performance and stability of a counter-rotating windmill using a planetary gearing: Measurements and Simulation,” 2010.
- [17] A. D. Hoang and C. J. Yang, “An evaluation of the performance of 10kw counter-rotating wind turbine using CFD simulation,” *EWEA 2013*, 2013.
- [18] T. Kanemoto and A. M. Galal, “Development of intelligent wind turbine generator with tandem wind rotors and double rotational armatures,” *JSME Int. J. Ser. B Fluids Therm. Eng.*, vol. 49, no. 2, pp. 450–457, 2006.
- [19] K. Kubo and T. Kanemoto, “Development of Intelligent Wind Turbine Unit with Tandem Wind Rotors and Double Rotational Armatures,” *J. Fluid Sci. Technol.*, vol. 3, no. 3, pp. 370–378, 2008.
- [20] K. Kubo, Y. Hano, H. Mitarai, K. Hirano, T. Kanemoto, and A. M. Galal, “Intelligent wind turbine unit with tandem rotors (discussion of prototype performances in field tests),” *Curr. Appl. Phys.*, vol. 10, no. 2, pp. S326–S331, 2010.
- [21] Y. Usui, K. Kubo, and T. Kanemoto, “Intelligent wind power unit with tandem wind rotors and armatures (Optimization of front blade profile),” *J. Energy Power Eng.*, vol. 6, no. 11, p. 1791, 2012.
- [22] A. Rosenberg, S. Selvaraj, and A. Sharma, “A novel dual-rotor turbine for increased wind energy capture,” in *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 524, no. 1, p. 12078.
- [23] B. Moghadassian, A. Rosenberg, and A. Sharma, “Numerical investigation of aerodynamic performance and loads of a novel dual rotor wind turbine,” *Energies*, vol. 9, no. 7, p. 571, 2016.
- [24] P.-Å. Krogstad and P. E. Eriksen, “‘Blind test’ calculations of the performance and wake development for a model wind turbine,” *Renew. energy*, vol. 50, pp. 325–333, 2013.
- [25] J. Bartl, F. Pierella, and L. Sætran, “Wake measurements behind an array of two model wind turbines,” *Energy Procedia*, vol. 24, no. 1876, pp. 305–312, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2012.06.113.