

Analisis Variasi Arah Putar dan Jarak *Pattern Farm* Turbin Angin terhadap *Performance Wind Turbine Type H-Darrieus*

M Dady Ma'mun¹, Lies Banowati², Wahyu Atmaja³

Program Studi Teknik Penerbangan, Universitas Nurtanio, Bandung

wahyuatmaja120201@gmail.com

Abstrak. Turbin angin sumbu horizontal (HAWT) telah di gunakan secara luas di wilayah darat dan pesisir pantai untuk menghasilkan listrik. Untuk memperbesar keluaran daya turbin angin (HAWT) khususnya ke level megawatt, ukuran turbin angin cenderung meningkat. Namun, turbin angin ini harus di tempatkan berjauhan untuk menghindari gangguan wake yang dapat menyebabkan penurunan performance pada turbin angin di sebabkan oleh interaksi wake dari turbin yang berdekatan. Hal inilah yang mendasari penelitian ini untuk mempelajari pengaruh wake terhadap turbin angin (VAWT). Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah studi numerik dua dimensi dengan menggunakan software Ansys 2022 R2. Model 2D yang digunakan adalah turbin angin H-darrieus dengan 3 blade. Bentuk blade yang dipakai mengikuti bentuk airfoil simetris NACA 0021. Turbulence modelling yang digunakan adalah k-epsilon, realizable, standart dan kecepatan angin yang di gunakan sebesar 9 m/s. Arah putar dan jarak antar turbin yang di variasikan adalah arah putar inside, outside, clockwise, dan counter-clockwise adapun jarak antar turbin yang di variasikan yaitu nilai 1,2, 3 dan 4 space per diameter. hasil studi ini menunjukkan bahwa arah putar inside dengan jarak turbin 1.03 m menunjukkan peningkatan nilai C_p sebesar 6% dibandingkan arah putar dan jarak antar turbin yang lainnya.
Kata Kunci : Turbin angin, Arah Putar, Performance Wind, space per diameter

Abstract. Horizontal axis wind turbines (HAWT) have been widely used in land and coastal areas to generate electricity. To increase the power output of wind turbines (HAWT), especially to the megawatt level, the size of wind turbines tends to increase. However, these wind turbines must be placed far apart to avoid wake disturbances which can cause a decrease in the performance of the wind turbine due to the interaction of wakes from adjacent turbines. This is the basis for this research to study the influence of wakes on wind turbines (VAWT). The method used in this research is a two-dimensional numerical study using Ansys 2022 R2 software. The 2D model used is an H-darrieus wind turbine with 3 blades. The blade shape used follows the NACA 0021 symmetrical airfoil shape. The turbulence modeling used is k-epsilon, realizable, standard and the wind speed used is 9 m/s. The rotating direction and distance between turbines that are varied are inside, outside, clockwise and counter-clockwise, while the distance between turbines is varied, namely the values 1.2, 3 and 4 spaces per diameter. The results of this study show that the inside rotation direction with a turbine distance of 1.03 m shows an increase in the C_p value of 6% compared to other rotation directions and distances between turbines.
Keywords : Wind turbine, Rotation Direction, Wind Performance, space per diameter

1. Pendahuluan

Pengembangan energi terbarukan dianggap sebagai salah satu penanggulangan yang paling efektif untuk mengurangi masalah yang berasal dari pembakaran massal bahan bakar fosil yang menyebabkan berkurangnya sumber daya bahan bakar fosil, memburuknya polusi udara dan pemanasan global [1].

Sumber energi terbarukan meliputi biomassa, panas bumi, angin, kelautan, matahari, dan energi hidroliktik. Di antara sumber daya tersebut, angin merupakan sumber energi alternatif yang lebih murah. Bahkan tenaga angin merupakan sumber energi yang tumbuh paling cepat di dunia saat ini [2].

Berdasarkan pemeriksaan Lembaga Antariksa dan Penerbangan Nasional (Lapan) di dua puluh daerah di Indonesia, menyatakan bahwa kecepatan angin pada umumnya di Indonesia per tahunnya sekitar 2 - 6 m/s [3]. Namun karena kondisi geografis Indonesia yang beragam, menjadikan kecepatan angin tidak stabil dan arahnya tidak menentu. Hal ini menjadi masalah utama dalam pembangunan pembangkit listrik tenaga angin di Indonesia [4].

Turbin angin terutama dibagi menjadi dua jenis: turbin angin sumbu horizontal (HAWT) dan turbin angin sumbu vertikal (VAWT) [4].

Turbin angin sumbu horizontal (HAWT) telah di gunakan secara luas di wilayah darat dan pesisir pantai untuk menghasilkan listrik. Untuk memperbesar keluaran daya turbin angin (HAWT) khususnya ke level megawatt, ukuran turbin cenderung meningkat [5]. Namun, turbin angin ini harus di tempatkan berjauhan untuk menghindari gangguan *wake* yang di sebabkan oleh interaksi dengan turbin yang berdekatan [6]. Hal ini menyebabkan sejumlah kerugian pada turbin angin sumbu horizontal (HAWT) yang di tempatkan didarat seperti mengharuskan pemasangan turbin angin di tempat yang jauh dari penduduk di karenakan polusi *noise* yang di hasilkan dan membutuhkan lahan yang luas. Berbeda dengan turbin angin sumbu vertikal (VAWT) , turbin angin sumbu vertikal dicirikan oleh skla kecil, biaya rendah,

Nomenclature

VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
C_p	Coefficient Power
TSR	Tip Speed Ratio
Tb1	Turbin 1
Tb2	Turbin 2
S/d	Space per diameter
CCW	Counter-Clockwise
CW	Clockwise
A	Swept area Turbin (m ²)
τ	Torsi (N.m)
AR	Aspek ratio
d	Diameter turbin (m)
π	pi
n	Kecepatan putaran (rpm)
ω	Rotational speed turbine
(rad/s)	
v	Free strem wind speed (m/s)
H	Tinggi turbine (m)
N	Jumlah blade

Kebisingan lebih kecil, menerima angin dari segala sudut (bahkan dari arah atas ke bawah), perawatan lebih mudah, dan menggunakan lebih sedikit lahan namun masih sangat jarang di aplikasikan untuk menghasilkan listrik ke level megawatt ataupun digunakan untuk *wind farm* [7].

Turbin angin sumbu horizontal (HAWT) sudah banyak di lakukan penelitian mengenai jarak antar turbin pada turbin angin (HAWT). Menurut penelitian tersebut, semakin besar jarak antar turbin, *performance* turbin angin akan semakin optimal dan jarak minimal antar turbin yaitu $5-7d$ (d = diameter rotor). Namun, berbeda dengan turbin angin (VAWT) dimana interaksi *wake* yang terjadi pada turbin angin tidak terlalu berpengaruh terhadap *performance* turbin, sehingga jarak antar turbin saling berdekatan [8]. Dari penelitian yang di lakukan oleh [9] mengatakan bahwa turbin angin (VAWT) akan lebih optimal di gunakan pada *wind farm* di karenakan jarak antar turbin angin tidak saling berjauhan seperti pada turbin angin (HAWT). Jarak yang tidak saling berjauhan ini lah, yang menjadi kelebihan dari turbin angin (VAWT) karena penggunaan luas lahan yang lebih optimal ketika menggunakan turbin angin (VAWT).

Pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja turbin angin *type* H-darriues terhadap pengaruh interaksi *wake* dari turbin lainnya. dan menganalisis pengaruh arah putar dan jarak antar turbin angin (S/d) terhadap kinerja masing-masing dari kedua turbin angin dalam *pattern parallel wind farm*.

Kemudian pada penelitian turbin angin *type* H-darriues dengan *double* turbin akan menggunakan simulasi numerik untuk menganalisis pengaruh *wake* pada turbin angin (VAWT) dengan melakukan simulasi pada rasio kecepatan ujung bilah (TSR) yang berbeda untuk mengetahui peningkatan koefisien daya turbin (C_p) yang akan di bandingkan dengan turbin angin H-darriues *single* turbin untuk melihat kinerja turbin angin yang paling optimal.

2. Geometri

Pada penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara numerik untuk mengetahui karakteristik aerodinamik dan pengaruh *wake* pada turbin angin H-darriues dengan 3 blade yang akan di simulasikan pada rasio kecepatan ujung bilah (TSR) yang berbeda-beda pada kecepatan angin konstan 9 m/s. Yang dapat di lihat pada Tabel 1 menunjukkan kan ukuran geometri turbin angin H-darriues.

Tabel 1. Geometri turbin H-darriues

Parameter	
d (mm)	1030 mm
H_{rotor}	(2D simulation)
N	3
Blade profile	Naca 0021
Chord (mm)	85.8
Spoke-blade connection	0.25

3. Simulasi CFD

Peneliti dan industri berupaya meningkatkan kinerja turbin angin sumbu vertikal (VAWT) dengan mengoptimalkan desain rotor. Namun, studi numerik yang ada, seperti Metode Vortex atau Model Multiple Streamtube, memiliki keterbatasan karena mengandalkan 10 persamaan yang disederhanakan dan memerlukan data eksperimen untuk koefisien aerodinamis airfoill [10]. Dalam penelitian ini, menggunakan *software* ANSYS Fluent Student Version R2 2022 yang merupakan CFD komersial untuk membuat model desain CFD dalam bentuk 2D dan 3D dan melakukan post-process terhadap hasilnya. simulasi ini, , menggunakan aliran Unsteady dengan dengan sliding mesh model (SMM). Dengan 10

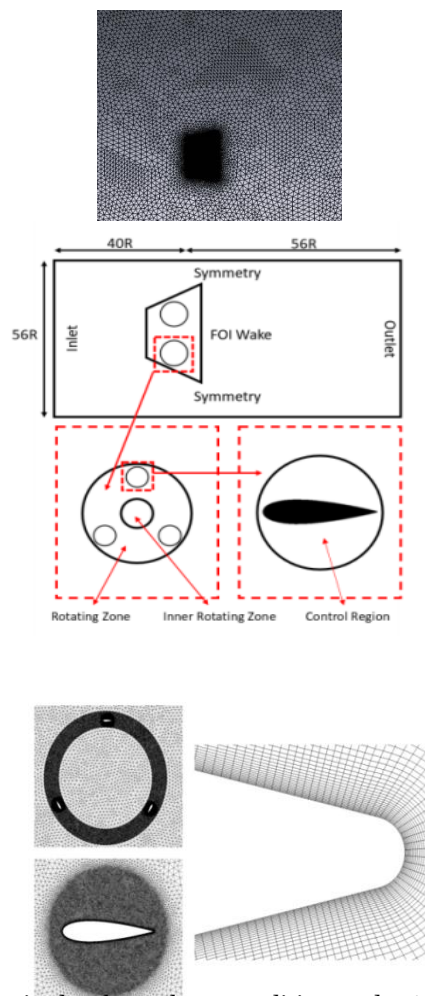
kali putaran turbin angin untuk memperoleh satu output, yang dapat di peroleh dengan menghitung times-step dari ratio kecepatan ujung bilah (TSR).

Persamaan yang terbentuk dari hasil pengembangan beberapa persamaan fisika dengan menerapkan asumsi tertentu. Semua *fluid* dinamik berdasarkan 3 prinsip dasar fisika yaitu *mass conservation*, *momentum conservation* dan *energy conservation*. Dari ketiga persamaan ini lah yang kemudian diturunkan menjadi persamaan *Navier-Stokes* yang digunakan sebagai dasar perhitungan pada CFD.

3.1. Grid Domain Indepedensi

Proses indepedensi ini adalah proses terpenting dalam melakukan simulasi fluent karena domain berfungsi sebagai wind tunnel untuk object yang akan disimulasikan. Pada simulasi ini, turbin angin di rekayasa seperti beroperasi di lapangan terbuka tanpa adanya hambatan dan uji indepedensi domain di lakukan untuk konfigurasi 2 turbin angin.

Adapun boundary condition dari grid domain yaitu terdiri dari inlet, walls simetri, interface rotating, dan outlet. Yang di tunjukkan pada Gambar 1 menampilkan skema grid domain dan boundary condition pada simulasi aliran udara turbin VAWT



Gambar 1. skema *grid domain* dan *boundary condition* pada simulasi aliran udara turbin VAWT dengan kecepatan angin 9 m/s

Pada Gambar 1 menunjukkan mesh yang di gunakan pada simulasi ini yaitu unstructure mesh. Ukuran grid dalam objek mempengaruhi akurasi simulasi dan waktu komputasi analisis CFD. Semakin halus mesh-nya, semakin baik hasilnya. Hasilnya akan lebih akurat, tetapi membutuhkan waktu pemrosesan yang lebih besar juga.

3.2. Mesh Indepedensi

Pada proses *mesh indepedensi* di lakukan perbandingan jumlah element mesh yang bertujuan untuk memperoleh jumlah element mesh yang paling akurat untuk di gunakan pada simulasi CFD. Jumlah element mesh yang disimulasikan mulai dari rentang 107294-272266 *cell zone*. Kemudian di peroleh element mesh yang paling akurat adalah 272266 dengan jenis *unstructure mesh*.

3.3. Turbulen Model Validasi

Validasi model turbulen dapat di lihat pada Gambar 2. Hasil dari perbandingan ini menunjukkan validasi data yang di peroleh eksperimen dan CFD dengan nilai C_p tertinggi pada TSR 2.6 dengan menggunakan $k-\varepsilon$, *Realizeable, standard wall function*.

Model $k-\varepsilon$, *Realizeable* biasanya di gunakan untuk melakukan simulasi pada benda yang berputar. Model $k-\varepsilon$ biasanya memperoleh hasil yang lebih baik untuk aliran berputar jika di bandingkan dengan standar $k-\varepsilon$ model lainnya.

3.4. Boundary Condition

Ada berbagai tipe batas yang biasa di gunakan pada simulasi FLUENT seperti saluran masuk tekanan, saluran masuk kecepatan, aliran massa, saluran masuk, saluran keluar tekanan, dan dinding stasioner. Dalam penelitian ini, kondisi batas diterapkan untuk mengatur putaran airfoil. Kondisi batas yang digunakan pada simulasi ini dapat di lihat pada Gambar 1.

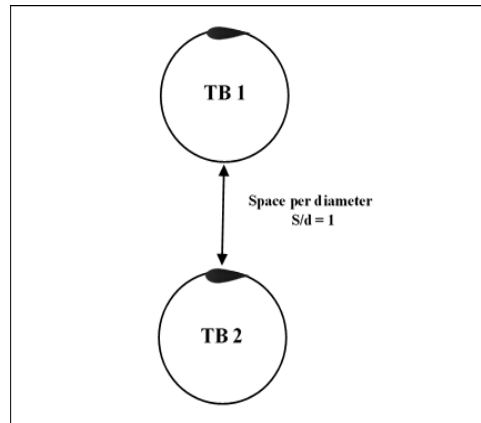
Pada penelitian ini digunakan tipe batas velocity inlet dan pressure outlet. Batas pressure outlet biasanya cocok di gunakan untuk simulasi terkait airfoil. Airfoil dianggap tidak slip wall mengacu pada zona fluida yang bergerak. Bagian depan domain digunakan kondisi batas Velocity Inlet, yang memungkinkan besarnya aliran masuk dan besaran turbulen dapat ditentukan. Pada simulasi inlet menggunakan *magnitude of inlet flow* dengan nilai turbulent intensity sebesar 0.1% dan length scale sebesar 0.005 m diterapkan untuk memperhitungkan aliran masuk turbulensi di terowongan angin.

3.5. Setup

Simulasi ini menggunakan *SIMPLE scheme* diantara beberapa skema khusus yang tersedia pada simulasi FLUENT. Kemudian kriteria *convergen* yang di gunakan untuk mendapatkan sebuah solusi sebesar 0.00005. Simulasi ini menggunakan kecepatan 9 m/s dengan simulasi *unsteady* yang berkaitan dengan waktu. Time-step dapat di hitung dengan kecepatan ujung rotor. Pada simulasi ini iterasi maksimum yang di gunakan yaitu 100 iteration. Pengaruh time-step per sudut rotor terhadap keluaran keofisien daya pada TSR 2.6. Pada dasar nya semakin kecil time-step per sudut yang digunakan maka hasil simulasi akan semakin akurat.

4. Validasi Data

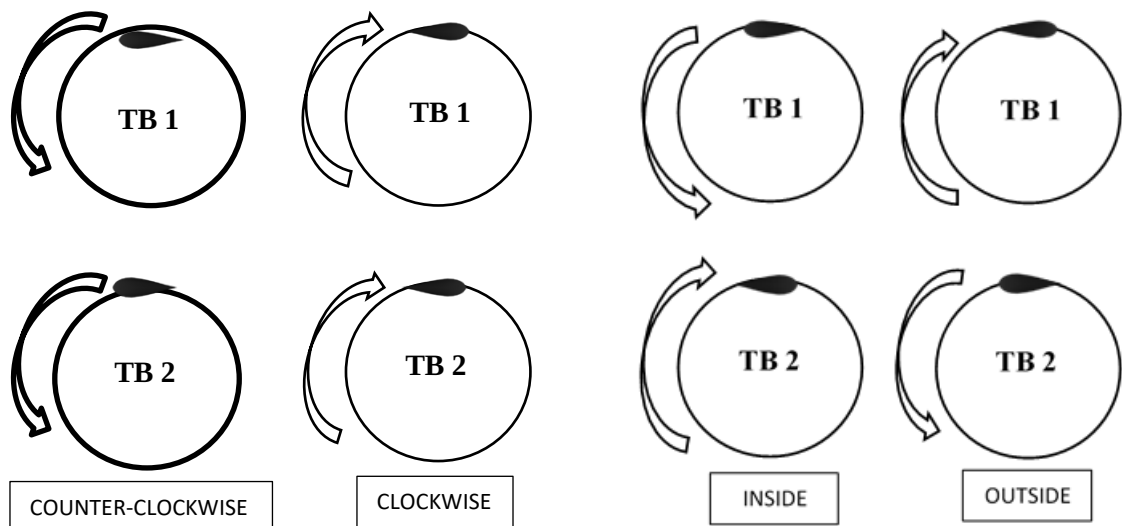
Model turbulensi numerik telah di validasi dengan membandingkan hasil eksperimental dan CFD untuk turbin H-darriues rotor. Hasil model turbulensi dapat di lihat pada Gambar 2 menunjukkan perbandingan yang baik antara eksperimental dan CFD yang dapat di lihat pada C_p tertinggi pada TSR 2.6 memperoleh nilai C_p yang sama antara nilai C_p eksperimental dan CFD.



Gambar 2. Hasil perbandingan nilai C_p antara eksperimental dan CFD

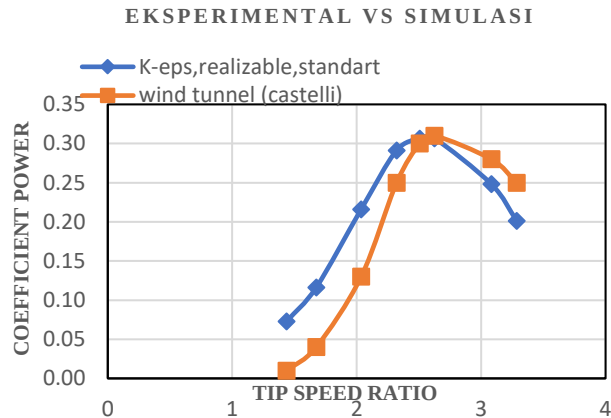
5. Design Turbin dengan Parallel Wind Farm

Design turbin angin, di design dengan variasi jarak antar turbin sebesar $S/d = 1, 2, 3$, dan 4 . Yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh jarak turbin angin (VAWT) terhadap performance dari turbin angin, dan pada proses design kedua di lakukan pendesignan turbin angin dengan variasi arah putar turbin angin yaitu ccw, cw, Inside, dan outside untuk mengetahui arah putar turbin angin yang paling optimal yang di tunjukkan pada Gambar 4 yang menunjukkan arah putar turbin angin.



Gambar 3. Menampilkan skema simulasi 2 turbin dengan variasi jarak

Note : $S/d = 1$ adalah ukuran jarak antar turbin sebesar 1 diameter turbin angin



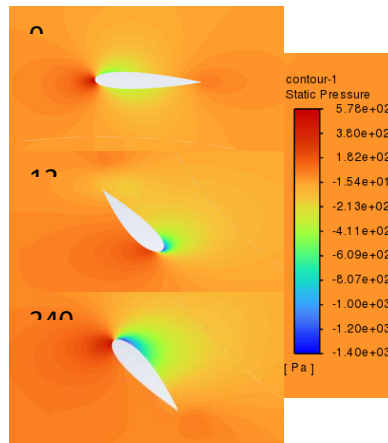
Gambar 4. Design variasi arah putar turbin angin

6. Hasil dan Pembahasan

Hasil dari analisis ini, berupa nilai *coefficient power* (C_p) yang diperoleh dari simulasi *software* CFD yaitu ANSYS Fluent, dapat dilihat pada Gambar 2 yang menampilkan nilai validasi antara eksperimental dan CFD, dimana nilai C_p tertinggi berada pada TSR 2.6. Sehingga pada simulasi ini hanya dilakukan simulasi pada TSR 2.6. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh jarak antar turbin dan arah putar turbin, terhadap *performance* atau nilai C_p dari turbin angin. Kemudian data yang diperoleh dari hasil simulasi dibuat menjadi tabel dan grafik agar memudahkan untuk menganalisis hasil dari simulasi.

6.1. Contour dan legend

Contour dideskripsikan dengan warna untuk membaca pola berdasarkan variable yang ditentukan. Setelah menentukan area yang akan ditampilkan dan pola aliran berdasarkan warna. Dimana pressure tertinggi diwarnakan dengan warna merah sedangkan pressure terendah diwarnakan dengan warna biru tua dan nilai pressure nol atau normal di warnakan dengan warna kuning. kemudian dari hasil simulasi dengan *plane* dan *contour*, tahap selanjutnya adalah menentukan dimensi untuk membaca pola warna dengan menggunakan *legend*. Tiap *contour* dibuatkan *legend* tersendiri untuk mendapatkan dimensi yang lebih spesifik dan akurat. Dapat di lihat pada Gambar di bawah ini menampilkan *contour pressure* dan *contour velocity* pada tiap kondisi bilah turbin angin dengan arah putar turbin angin *clockwise* dan *counter-clockwise*.

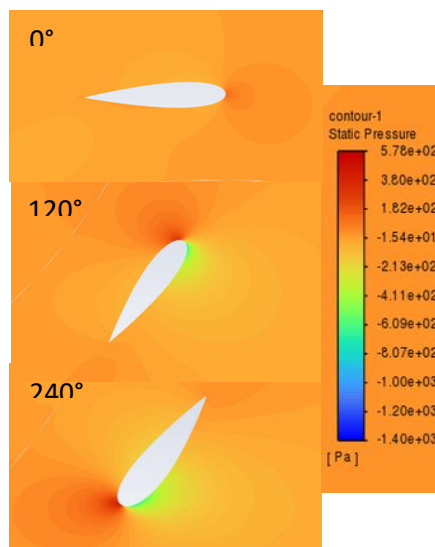


Note : Posisi sudut blade pada 0 deg, 120 deg, dan 240 deg pada arah putar turbin CCW

Gambar 5. Contour pressure pada sudut blade 0 deg, 120 deg, dan 240 deg

Pada Gambar 5 menampilkan kondisi *blade* pada arah putar ccw yang menyebabkan tidak adanya gaya *lift* yang terjadi pada *blade*, dikarenakan tidak adanya perbedaan tekanan antara permukaan *upper* dan *lower blade*, hal ini juga terjadi karena *angle of attack* pada saat sudut putar 0° bernilai 0. Seiring bertambahnya sudut putar, semakin terlihat perkembangan kontur tekanan pada *upper surface blade* yang terkena langsung oleh aliran udara, yang mengakibatkan terjadinya gaya *lift* sesuai dengan besarnya *angle of attack* yang terbentuk. Gaya lift dan nilai torsi terbesar terjadi pada sudut putar 0° hingga mencapai sudut putar 90° karena *blade* berada pada kondisi *upstream*.

Pada sudut putar 120° *blade* terlihat memiliki perbedaan tekanan pada *upper* dan *lower blade*, ketika *blade* mencapai sudut putar 240° hingga 360°, *pressure* yang terjadi di kondisi ini tidak terlalu tinggi, karena aliran yang berada pada kondisi ini adalah aliran *downstream* atau aliran lemah yang hampir kehilangan kecepatan dan tekanannya.

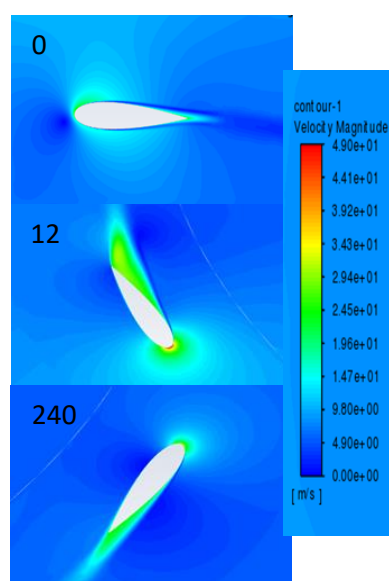


Note : Posisi sudut blade pada 0 deg, 120 deg, dan 240 deg pada arah putar turbin CW

Gambar 6. Contour pressure pada sudut blade 0 deg, 120 deg, dan 240 deg

Pada blade dengan arah putar cw, blade berada pada kondisi *downstream* terhadap aliran *freestream* yang mengakibatkan tekanan dari sudut putar 0° hingga mencapai sudut putar 90° memperoleh tekanan yang rendah karena *blade* berada pada kondisi *downstream*.

Pada sudut putar 120° *blade* 1 turbin 2 terlihat mulai memiliki perbedaan tekanan pada *upper* dan *lower blade* karena pada kondisi ini *blade* mulai memasuki kondisi *upstream*, sehingga ketika *blade* 1 telah memasuki sudut putar 180° hingga sudut putar 270°, itu adalah kondisi sudut putar *blade* yang memperoleh pressure paling besar di bandingkan sudut putar yang lainnya. Karena kondisi *blade* berada pada kondisi *upstream*, akan tetapi ketika *blade* 1 mencapai sudut putar 330° hingga sudut putar 360° *pressure* yang terjadi pada kondisi ini tidak terlalu besar karena *blade* berada pada kondisi *downstream*.



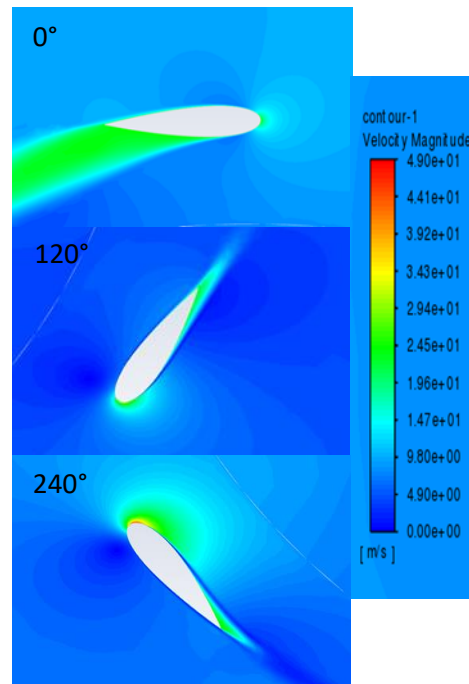
Note : Posisi sudut blade pada 0 deg, 120 deg, dan 240 deg pada arah putar turbin CCW

Gambar 7. Contour velocity pada sudut blade 0 deg, 120 deg, dan 240 deg

Pada *blade* dengan arah putar ccw yang berada pada kondisi *upstream* terhadap *freestream*. Pada *blade* saat sudut putar 0° terlihat *blade* tidak memiliki *angle of attack* yang menyebabkan tidak adanya gaya *lift* yang terjadi, dan torsi yang terbentuk pun bernilai nol. Kecepatan tertinggi turbin angin terjadi pada saat kondisi *blade* berada pada sudut putar 0° hingga sudut putar 90°, di karenakan kondisi dari sudut putar 0° hingga mencapai sudut putar 90° adalah kondisi *blade* berada pada kondisi *upstream* dengan *angle of attack* yang terbentuk dari rentang sudut putar 0° hingga sudut putar 90°. Pertambahan sudut putar akan merubah nilai *angle of attack* dan mempengaruhi besaran gaya *lift* yang di peroleh. Sehingga ketika turbin angin mencapai sudut putar 90°, gaya *lift* yang terbentuk lebih besar daripada posisi sudut putar sebelumnya dikarenakan perbedaan tekanan antara *upper* dan *lower blade* yang tegak lurus terhadap aliran *freestream*, yang menyebabkan gaya *lift* di peroleh lebih besar daripada blade lainnya.

Sehingga memicu angin mengalir dari tekanan tinggi menuju tekanan rendah yang mengakibatkan turbin berputar dengan lebih baik. Semakin besar gaya *lift* maka semakin besar pula torsi yang akan dihasilkannya. Namun pada sudut putar 90° mulai muncul *vortex* yang menyebabkan penurunan gaya *lift* pada *blade* sehingga kecepatannya pun menurun. *blade* turbin angin yang telah melewati sudut putar 90° akan mengalami penurunan kecepatan hingga mencapai sudut putar 360°. Dikarenakan adanya

pengaruh dari *vortex* yang terbentuk dan kondisi kecepatan angin yang mengalir pada daerah *downstream* tidak secepat pada daerah *upstream*.



Note : Posisi sudut blade pada 0 deg, 120 deg, dan 240 deg pada arah putar turbin CW

Gambar 8. Contour velocity pada sudut blade 0 deg, 120 deg, dan 240 deg

Pada *blade* dengan arah putar cw sebenarnya memiliki kemiripan fenomena yang sama dengan *blade* dengan arah putar ccw, namun pada *blade* dengan arah putar cw berada pada kondisi *downstream* terhadap *freestream* yang menyebabkan kondisi sudut putar 0° hingga sudut putar 90° mendapatkan gaya *lift* yang lebih kecil di bandingkan *blade* dengan arah putar ccw yang mendapatkan gaya *lift* lebih besar di saat *blade* berada pada rentang sudut putar 0° hingga sudut putar 90°. Namun ketika *blade* mencapai sudut putar 180° hingga 270°, *blade* akan memperoleh gaya *lift* yang sama besarnya dengan gaya *lift* yang di peroleh oleh *blade* dengan arah putar ccw pada kondisi putar 0° hingga 90° karena kondisi *blade* telah berada pada kondisi *upstream*. Namun ketika *blade* telah melewati sudut putar 270° turbin akan mengalami penurunan kecepatan hingga mencapai sudut putar 360° dikarenakan adanya pengaruh dari *vortex* yang terbentuk dan kondisi kecepatan angin yang mengalir pada daerah *downstream* tidak secepat pada daerah *upstream*.

6.2. Hasil simulasi

Untuk hasil simulasi langkah ketiga adalah melakukan simulasi dengan dua turbin angin dengan dengan empat variasi arah putar yaitu arah putar *inside*, *outside*, *clockwise*, dan *counter-clockwise*. Kemudian hasil dari data simulasi yang akan diambil berupa nilai C_p dari variasi keempat arah putar turbin angin yang di tunjukkan pada Tabel 2 menampilkan hasil simulasi turbin angin dengan variasi arah putar.

Tabel 2. Hasil nilai C_p terhadap perbedaan arah putar

Arah Putar	TSR	Tb1	Tb2
		Cp	Cp
Outside	2.6	0,31	0,31
Inside	2.6	0,33	0,33
Clockwise	2.6	0,33	0,31
Counter Clockwise	2.6	0,31	0,33

Pada Tabel 2 menampilkan perbedaan arah putar pada turbin angin H-darriues menghasilkan nilai Cp yang berbeda-beda pada masing-masing arah putar, dapat dilihat pada arah putar *inside* menghasilkan nilai Cp terbesar dan stabil antar kedua turbin angin di dibandingkan dengan arah putar turbin lainnya. Dapat dilihat pada arah putar turbin *outside* yang tidak mengalami perubahan *performance* sehingga nilai Cp yang di peroleh hanya sebesar 0.31. Sedangkan untuk arah putar Clockwise memiliki nilai Cp yang tidak stabil antar kedua turbinnya, dimana pada turbin 1 memiliki nilai Cp sebesar 0.33 sedangkan pada turbin 2 memiliki nilai Cp sebesar 0.31. Nilai Cp yang diperoleh berbanding terbalik pada arah putar counter-clockwise dimana nilai Cp terbesar di hasilkan pada turbin 2 , dan nilai Cp terkecil di hasilkan pada turbin 1.

6.3. Hasil simulasi jarak antar turbin

Untuk hasil simulasi langkah keempat yaitu melakukan penambahan variabel jarak antar turbin yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh jarak antar turbin terhadap nilai Cp yang di hasilkan oleh turbin angin dari keempat perbandingan jarak antar turbin. yang dapat dilihat pada Tabel 3, Tabel 4, Tabel 5, dan Tabel 6 menampilkan hasil nilai Cp dari keempat variasi jarak antar turbin dan arah putar turbin angin.

Tabel 3. Space per diameter 1 ($S/d=1$)

Arah Putar	TSR	Tb1	Tb2
		Cp	Cp
Outside	2.6	0,31	0,31
Inside	2.6	0,32	0,32
Clockwise	2.6	0,32	0,31
Counter Clockwise	2.6	0,31	0,32

Pada Tabel 3 menampilkan nilai Cp pada space per diameter 1, menunjukkan peningkatan *performance* turbin angin pada arah putar *inside* lebih baik dari arah putar yang lainnya. Dimana dapat di lihat dari nilai Cp yang di peroleh pada arah putar *inside* pada kedua turbin memperoleh nilai Cp yang sama yaitu sebesar 0.33 meningkat 6% dari nilai Cp yang sebelumnya.

Tabel 4. Space per diameter 2 ($S/d=2$)

Arah Putar	TSR	Tb1	Tb2
		Cp	Cp
Outside	2.6	0,31	0,31
Inside	2.6	0,33	0,33
Clockwise	2.6	0,33	0,31
Counter Clockwise	2.6	0,31	0,33

Pada Tabel 4 menampilkan nilai Cp pada *space per diameter* 2, menunjukkan penurunan *performance* yang menyebabkan nilai Cp pada arah putar *inside* mengalami penurunan sebesar 3% seiring

bertambahnya jarak antar turbin. Kemudian pada arah putar *clockwise* juga mengalami penurunan nilai C_p yang sama sebesar 3% pada turbin 1, hal yang sama juga terjadi pada arah putar *counter-clockwise* yang mengalami penurunan nilai C_p pada turbin 2. sedangkan pada arah putar *outside* tidak mengalami perubahan.

Tabel 5. Space per diameter 3 ($S/d=3$)

Arah Putar	TSR	Tb1	Tb2
		C_p	C_p
Outside	2.6	0,31	0,30
Inside	2.6	0,31	0,31
Clockwise	2.6	0,31	0,31
Counter Clockwise	2.6	0,31	0,31

Pada Tabel 5 Menampilkan nilai C_p pada *space per diameter* 3 , menunjukkan penurunan *performance* turbin yang menyebabkan nilai C_p semakin mengalami penurunan, seiring bertambahnya jarak antar turbin angin. Dapat di lihat pada arah putar *inside* nilai C_p yang di peroleh tidak mengalami peningkatan nilai C_p , hal yang sama pun terjadi pada arah putar *clockwise* dan *counter-clockwise* , namun pada arah putar *outside* nilai C_p pada turbin 2 mengalami penurunan, berbeda dengan nilai C_p yang di peroleh pada *space per diameter* 1 dan 2 dimana nilai C_p pada arah putar *outside* memiliki nilai C_p yang stabil antar kedua turbinnya.

Tabel 6. Space per diameter 4 ($S/d=4$)

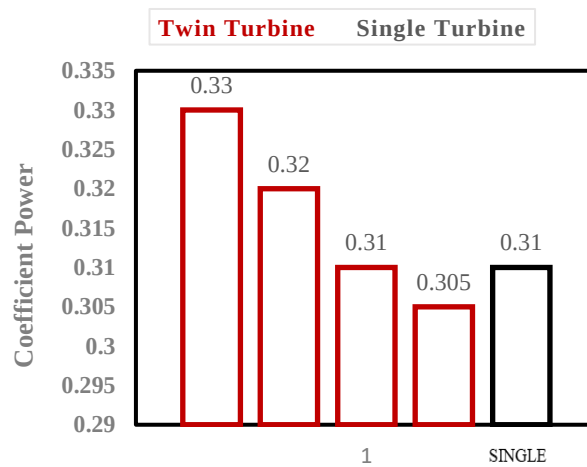
Arah Putar	TSR	Tb1	Tb2
		C_p	C_p
Outside	2.6	0,31	0,30
Inside	2.6	0,31	0,31
Clockwise	2.6	0,31	0,31
Counter Clockwise	2.6	0,31	0,31

Pada Tabel 6 menampilkan nilai C_p pada *space per diameter* 4, menunjukkan penurunan *performance* turbin yang menyebabkan penurunan nilai C_p di kedua turbin angin pada semua arah putar, dan menyebabkan nilai C_p pada arah putar *inside* dan *counter-clockwise* memperoleh nilai C_p yang tidak stabil. Sedangkan pada arah putar *outside* mengalami penurunan *performance* turbin yang menyebabkan nilai C_p yang di peroleh turbin mengalami penurunan sebesar -3% di bandingkan nilai C_p pada arah putar *outside* dengan *space per diameter* 1 dan 2 . Namun pada arah putar *clockwise* tidak menyebabkan penurunan *performance* dan peningkatan *performance* yang menyebabkan nilai C_p yang diperoleh sama seperti pada variasi jarak sebelumnya.

Tabel 7. Hasil nilai C_p terhadap jarak antar turbin

Arah putar	TSR	Twin Turbine	Single Turbine	Increase efficiency
		Cp	Cp	
Inside 1d	2.6	0.33	0.31	6%
Inside 2d	2.6	0.32	0.31	3%
Inside 3d	2.6	0.31	0.31	0%
Inside 4d	2.6	0.305	0.31	-2%

Note : 1d adalah jarak antar turbin sebesar 1 diameter turbin angin ($S/d = 1$)



Gambar 9. Perbandingan Cp twin turbine vs single turbine

Pada **Gambar 5.40** menampilkan nilai Cp pada *twin turbine* pada arah putar *inside* dengan *space per diameter* (S/d) 1, 2, 3, dan 4. Dapat dilihat bahwa semakin besar jarak antar turbin angin yang terbentuk dapat mempengaruhi *performance* turbin angin sehingga menurunnya kemampuan turbin angin untuk mengonversi energi angin menjadi energi listrik. Yang di tunjukkan dengan penurunan nilai Cp pada *twin turbine* seiring dengan semakin besar jarak yang terbentuk antar turbin sehingga pada *space per diameter* 4, menunjukkan nilai Cp *single turbine* lebih baik di bandingkan nilai Cp pada *twin turbine* karena tidak adanya pengaruh *vortex* terhadap turbin angin 1 dan lainnya. Namun, ketika jarak antar *twin turbine* semakin dekat *performance* turbin angin mengalami peningkatan signifikan, yang dapat dilihat pada arah putar *inside* dengan *space per diameter* 1 ($S/d=1$) yang mengalami kenaikan nilai Cp atau efisiensi turbin sebesar 6% yang di sebabkan oleh pengaruh *vortex* yang mempengaruhi turbin 1 dan lainnya.

7. Kesimpulan

Perbandingan hasil *coefficient power* dari keempat variasi arah putar dan jarak antar turbin, menunjukkan bahwa semakin besar jarak yang terbentuk antar turbin menyebabkan hasil *coefficient power* yang di peroleh semakin menurun, namun berbeda ketika jarak turbin angin semakin kecil, nilai *coefficient power* yang di peroleh semakin meningkat. Dapat dilihat pada arah putar *inside* dengan *space per diameter* 1 ($S/d=1$) yang memperoleh nilai Cp yang stabil antar kedua turbin-nya dengan memperoleh nilai Cp sebesar 0.33 yang lebih baik dibandingkan dengan nilai Cp yang di peroleh pada arah putar yang lainnya dan *single turbine*. Kemudian Efisiensi turbin yang di peroleh dari keempat variasi arah putar dan jarak, menghasilkan peningkatan efisiensi turbin sebesar 0.33 atau 33% dari

efisiensi turbin yang di peroleh pada *single* turbin sebesar 0.31 atau 31%, dimana peningkatan efisiensi yang paling optimal terjadi pada arah putar *inside* dengan *space per diameter* 1.

8. Daftar Pustaka

- [1] C. WH, “state-of -the -art review of biomass torrefaction densification and aplication,” *renew Sustain energy*, 2015.
- [2] B. MMA, “Vertical axis wind turbine- a review of various configuration and design techniques,” *renew Sustain energy*, 2011.
- [3] R. Taufiqurrahman, “Penelitian Numerik Turbin Angin Darrieus dengan Variasi Jumlah Sudu dan Kecepatan Angin,” *J. Tek. ITS*, vol. 6 no., 2017.
- [4] M. Saputra, “Rancang Bangun Turbin Angin Skala Kecil Untuk Kawasan Kampus Univ. Teuku Umar,” *J. Tek. elektro ITP*, vol. 5, No, 2019, doi: doi: 10.35308/jmkn.v5i1.1577.
- [5] M. Islam, “progress and recent trends of wind energy technology,” *Renew Sustain Energy*, 2013.
- [6] J. Dabiri, “Potential orde-of-magnitude enhancement of wind farm power density via Counter- rotating vertical axis wind turbine array,” *Renew Sustain Energy*, 2011.
- [7] M. Castelli R, “The darriues wind turbine: proposal for a new performance prediction model based on cfd,” 2011.
- [8] T. Abu-El-Yazied G, “Investigation of the Aerodynamic Performance of Darrieus Vertical Axis Wind Turbine,” *IOSR J. Eng.*, vol. Vol. 1, no. 2250–3021, pp. 2278–8719, 2014, [Online]. Available: www.iosrjen.org.
- [9] S. Sahebzadeh, “Vertical-axis wind-turbine farm design: Impact of rotor setting and relative arrangement on aerodynamic performance of double rotor arrays,” *Energy Reports*, 2022, [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/egyr.
- [10] S. Giorgetti, “CFD investigation on the aerodynamic interferences between medium-solidity Darrieus Vertical Axis Wind Turbines,” 2014, [Online]. Available: www.sciencedirect.com.