

Studi Numerik Turbin Angin Darrieus Dengan Desain Penampang Airfoil NACA-0021

Muhajirin¹, Eka Yawara^{2,*}, Harianto³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta
Jalan Babarsari, Caturtunggal Depok Sleman Daerah Istimewa Yogyakarta, 55281

*Corresponding author: eka.ywara@itny.ac.id

Abstract

Indonesia has a large wind power potential that can be used to generate electricity. Wind is an alternative source of energy that can be converted. Wind turbines are devices that can convert kinetic energy in the wind into electrical energy. The efficiency and performance of the wind turbine depends on the design and shape of the wind turbine blades themselves. This research was conducted by numerical simulation to determine the performance of the Vertical Axis Wind Turbine and the performance of the Darius wind turbine with the NACA 0021 Airfoil type using Computational Fluid Dynamics (CFD) Wind Speeds 4,8, 6, 7, 8, 9, and 10 m/s. After the Numerical Simulation has been carried out, it can be seen that the torque and power coefficient have increased along with the increasing tip speed ratio. The resulting torque will increase as the wind speed increases. The maximum torque that can be produced by a wind turbine occurs at a speed of 7 m/s and The maximum power coefficient generated by the turbine occurs at a speed of 10 m/s.

Keywords: Darrieus Wind Turbine, Computational Fluid Dynamics (CFD), NANA 0021.

Abstrak

Indonesia memiliki potensi tenaga angin yang cukup besar yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik, Angin menjadi salah satu alternatif sumber energi yang dapat dikonversi. Turbin angin adalah alat yang dapat mengkonversikan energi kinetik pada angin menjadi energi listrik. Efisiensi dan kinerja turbin angin tergantung pada desain dan bentuk sudu turbin angin itu sendiri. Penelitian ini dilakukan dengan cara simulasi numerik untuk mengetahui kinerja Turbin Angin Sumbu Vertikal dan performa dari turbin angin Darrieus dengan tipe Airfoil NACA 0021 dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Penelitian dilakukan dengan variasi kecepatan angin 4,8, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s. Setelah Simulasi Numerik dilakukan, maka dapat dilihat bahwa torsi dan koefisien daya mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan tip speed ratio. Torsi yang dihasilkan akan meningkat seiring bertambahnya kecepatan angin. Torsi maksimum yang mampu dihasilkan oleh turbin angin terjadi pada kecepatan 7 m/s dan Koefisien daya maksimum yang dihasilkan oleh Turbin terjadi pada kecepatan 10 m/s.

Kata kunci: Turbin Angin Darrieus, Computational Fluid Dynamics (CFD), NANA 0021.

PENDAHULUAN

Ketersediaan bahan bakar fosil di Indonesia belakangan ini semakin menipis karena pengaruh penggunaan bahan bakar fosil yang terlalu banyak. Selain itu, bahan bakar fosil juga

menghasilkan kandungan-kandungan gas yang kurang baik bagi lingkungan sekitar. Oleh karena itu dibutuhkan sumber energi alternatif yang bersifat terbarukan, mudah didapat, mudah diolah dan diharapkan nantinya dapat menggeser ketergantungan terhadap minyak bumi. Salah satu sumber energi alternatif yang sudah banyak digunakan adalah energi angin. Tidak seperti energi matahari, penggunaan dan pemanfaatan energi angin tidak terlalu dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan iklim. Energi angin telah digunakan dan dimanfaatkan sejak dahulu oleh manusia sebagai penunjang kebutuhan hidup untuk berbagai hal seperti penggilingan padi, keperluan irigasi, dll. Kini energi angin banyak dimanfaatkan untuk mengakomodasi kebutuhan listrik masyarakat. Walaupun sampai saat ini penggunaan energi angin masih belum dapat menyaingi pembangkit listrik yang tidak terbarukan (contoh: PLTD, PLTU, dll).

Alat yang digunakan untuk mengekstraksi energi angin ini adalah turbin angin. Hal inilah yang mendasari Simulasi numerik ini agar didapatkan desain turbin angin yang mampu mengekstraksi tenaga angin seoptimal mungkin. Turbin angin pembangkit listrik terdiri dari berbagai komponen dasar seperti rotor, generator, rantai penggerak, sistem kontrol, dll. Rotor yang tersambung dengan sudu turbin digerakan oleh angin dengan kecepatan tertentu dan mengakibatkan generator yang telah terhubung dengan putaran dari rotor dapat menghasilkan energi listrik dalam batas pengaturan sistem kontrol untuk kelistrikan itu sendiri.

Tipe turbin angin yang dijadikan sebagai bahan penelitian pada tugas akhir ini adalah turbin angin tipe sumbu vertikal atau *Vertical-Axis Wind Turbine* (VAWT). Memodifikasi rotor pengeksrak energi merupakan salah satu cara untuk mengoptimalkan penggunaan VAWT. Turbin dengan rotor jenis Darrieus, mempunyai hubungan yang erat dengan *aspect ratio* turbin terkait dengan performa yang mampu dihasilkan instalasi turbin. *Aspect ratio* adalah perbandingan antara tinggi dari rotor terhadap jarak dari pusat rotor hingga sudu. Menurut penelitian yang telah dilakukan S. Brusca, Dkk. (2014), semakin kecil *aspect ratio* maka akan semakin besar *Reynolds Number* yang dihasilkan, sementara semakin besar *aspect ratio* akan berdampak pada semakin besarnya kecepatan putar. Kedua, sifat ini merupakan sifat penting yang sangat berpengaruh terhadap performa dari instalasi turbin Darrieus. Pada dasarnya tipe turbin Darrieus, memiliki kemungkinan sangat kecil untuk dapat bergerak sendiri. Hal ini dikarenakan torsi awal yang dihasilkan oleh turbin Darrieus sangat kecil. Tipe Darrieus turbin berdasarkan penelitian M. Bhutta, Dkk (2011), yang *me-review* berbagai jenis VAWT merupakan tipe rotor turbin yang memiliki efisiensi paling tinggi diantara jenis VAWT yang ada. Hal ini dikarenakan, ukuran turbin sangat besar perbandingannya dengan energi yang dihasilkan. Kombinasi turbin Darrieus dengan penambahan rotor Savonius merupakan pilihan untuk meningkatkan performa dari turbin tipe Darrieus. Dengan mengkombinasikan kedua jenis turbin ini, maka dapat terbentuk suatu instalasi turbin baru dimana rotor Savonius dapat berfungsi sebagai penggerak utama dan rotor Darrieus sebagai penggerak tambahan.

Gorle Dkk (2016) telah melakukan penelitian untuk mengetahui performa dan evaluasi aliran pada turbin angin- aliran rendah tipe Darrieus. Metode yang dipakai pada penelitian ini adalah metode komputasi (2D CFD) menggunakan software komersial Star CCM+ dalam pemodelan, meshing dan simulasi numeriknya, dan metode eksperimen dengan menggunakan PIV (Particle image velocimetry, sebuah metode yang digunakan untuk mengukur kecepatan pada suatu fluida). Pada metode komputasi, model geometri yang digunakan pada vertical axis turbine ini adalah sistem turbin 4 sudu. Kemudian dipilih sudu tipe NACA 0015 karena memiliki bentuk yang mudah dibuat, agar mudah pula dalam fabrikasi prototype turbin angin ini yang akan digunakan dalam metode selanjutnya (eksperimen), dengan kepadatan model turbin yang digunakan sebesar 0,533. Domain dari komputasi ini berbentuk persegi panjang, dimana panjangnya 15D dengan jarak ke daerah upstream turbin sebesar 5D (D = rotor diameter). Kemudian lebar domainnya sebesar 1.5 meter sesuai dengan lebar towing tank yang dipakai untuk eksperimen nantinya.

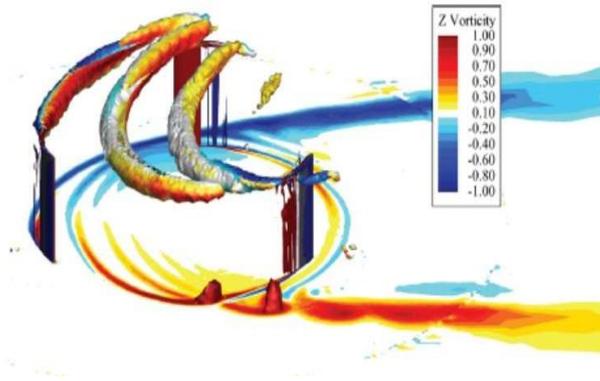
Ukuran domain yang besar ini dibuat untuk memastikan aliran yang melaluinya mengalir dengan baik tanpa adanya aliran balik selama simulasi berlangsung. Untuk semua simulasi, putaran turbin di set berlawanan arah jarum jam, dengan kondisi aliran masuk yang diset sebagai constant velocity dan kondisi keluaran alirannya diset sebagai pressure outlet, serta no-slip wall boundaries yang diterapkan pada semua sudu yang digunakan. Mesh yang digunakan pada studi numerik ini adalah model Chimera technique. Teknik ini merupakan bagian dari metode dekomposisi Schwartz dengan menggunakan interpolasi Chimera untuk menyederhanakan simulasi agar mampu menangani gerak relatif yang mengalir melalui geometri yang kompleks dengan gerakan yang dinamis. Total cell pada tiap daerah sudu nya adalah 29.657 dan pada daerah domainnya sejumlah 320.985. visualisasi mesh yang digunakan pada simulasi ini dapat dilihat pada gambar 1.1. Untuk instalasi metode eksperimen, dibuatlah model turbin dengan 4 sudu dengan panjang penampang melintang setiap sudunya 0,4 m menggunakan model NACA 0015. Diameter rotor nya sebesar 0,6 m dengan chord sudu sepanjang 8 cm. Flange bagian atas dibuat menggunakan bahan stainless steel dan flange bagian bawah menggunakan bahan Polymethylmethacrylate (PMMA), yang memungkinkan kamera untuk menangkap pergerakan aliran disekitar sudu. Gambar 2.2a menunjukkan model turbin yang digunakan pada eksperimen ini. Kemudian model turbin ini diletakkan pada towing tank dengan panjang 20 m, lebar 1,5 m dan kedalaman 1,3 m seperti pada gambar 2.2b. Towing tank ini memiliki sisi yang transparan dan dinding bagian bawah yang memungkinkan sinar laser dan alat PIV menangkap fenomena yang terjadi dengan baik. Eksperimen ini dilakukan pada kisaran nilai TSR 0.5 - 5 dan kecepatan aliran freestream sebesar 0,5 m/s hingga 1.5 m/s.

Penelitian yang dilakukan oleh Gosselin, Dkk. (2016) adalah penelitian parametrik yang dilakukan secara numerik untuk meneliti tentang efek penambahan aspek- aspek tertentu pada sebuah turbin Darrieus jenis rotor H. Pada penelitian 3 dimensi yang dilakukan, Gosselin, Dkk. (2016) dalam penelitiannya melakukan simulasi 3 dimensi tentang efek perbedaan *aspect ratio* sudu dari turbin dan efek dari *end plate* pada sudu Darrieus. Simulasi 3 dimensi dilakukan dengan menggunakan *single blade* berjenis NACA0015 dengan variasi *aspect ratio* $AR = \text{tinggi sudu} / \text{Radius} = 7$ dan $AR = 15$. Kemudian simulasi dilakukan pada *solidity* $\sigma = 0.2857$ dan pada $\lambda = 4.25$ dan $Re = 2.5 \times 10^5$. Selain itu dilakukan juga simulasi dengan 3 sudu dengan $AR = 7$, dan $\sigma = 0.5486$, pada $TSR \lambda = 3.4$ (efisiensi puncak). Hasil dari efek *aspect ratio* pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. pengaruh *aspect ratio* terhadap hasil 2D (Gosselin,Dkk. 2016)

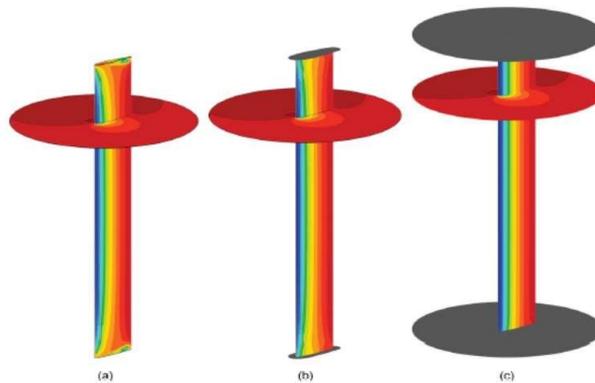
| Turbine | Number of Blade | Cp | 3D/2D performance Ratio (%) |
|----------------|------------------------|-----------|------------------------------------|
| 2D | 1 | 0,38 | |
| AR = 7 | 1 | 0,16 | 41,8 |
| AR = 15 | 1 | 0,26 | 69,0 |
| 2D | 3 | 0,35 | |
| AR =7 | 3 | 0,19 | 53,7 |

Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan antara hasil penelitian yang dilakukan secara 2 dimensi dan 3 dimensi terkait dengan koefisien daya rata-rata yang dihasilkan oleh sudu. Hal ini menunjukkan bahwa performa dari suatu turbin angin Darrieus sangat ditentukan oleh *aspect ratio* dari instalasi turbin. Pada gambar 1.1 dapat dilihat bagaimana *vorticity* aliran udara pada ujung sudu berbeda dengan aliran yang terdapat pada bagian tengah turbin. Atas dasar alasan inilah mengapa performa turbin dapat turun pada simulasi 3 dimensi.



Gambar 1. *Isosurface* dari turbin angin 3 D (Gosselin, Dkk. 2016)

Untuk menganalisa terjadinya efek dari penambahan *end-plate*, penelitian dilakukan pada suatu *single blade* dengan 3 macam variasi yaitu tanpa *end-plate*, dengan *end-plate* NACA yaitu sebuah plat berbentuk mirip sudunya dengan pertambahan tebal sebesar 1.15 kali panjang *chord*, dan sebuah plat berbentuk lingkaran dengan diameter lingkaran sebesar 4 kali panjang *chord* airfoil.



Gambar 2. Kontur tekanan yang ada disekitar permukaan sudu (Gosselin, Dkk. 2011)

Pada tabel 2.3 dapat dilihat bagaimana hasil dari studi numerik yang telah dilakukan terkait kontur tekanan yang dimiliki masing- masing sudu dengan tambahan *end-plate* tersebut. Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa hasil dari penambahan plat jenis NACA adalah tambahan yang paling optimal dengan penambahan performa sebesar 10% dibandingkan dengan yang tanpa *end-plate*. Hal ini menunjukkan bahwa adanya *end-plate* dapat meningkatkan performa dari suatu turbin angin sumbu vertikal dimana *aspect ratio* terbatas. Tetapi desain dan ukuran dari *end-plate* sangatlah penting, apabila terlalu besar (*oversized*) *end-plate* malah membuang terlalu banyak energi daripada yang dibutuhkan.

Tabel 2 Perbandingan numerik performa dari turbin 3D dengan penambahan *end-plate* dengan hasil 2D (Gosselin, Dkk.2016)

| Turbine | End-Plate | Total Cp | 3D/2D performance Ratio (%) | End-Plate Cp cost |
|---------|-----------|----------|-----------------------------|-------------------|
| 2D | | 0,378 | | |
| AR = 7 | None | 0,158 | 41,8 | |
| AR = 7 | Circular | -0,105 | | 0,409 |
| AR = 7 | NACA | 0,188 | 49,7 | 0,017 |

Pada penelitiannya Gosselin, Dkk. (2016) menyebutkan kesulitannya memvalidasi hasil yang ditemukan melalui simulasi numerik dengan eksperimen pada TSR rendah. Pada TSR yang tinggi (TSR = 4–6), sudu Darrieus tidak lagi mengalami efek stall yang seringkali ditemukan

pada TSR rendah ($TSR = 1-3$). Pada TSR rendah, simulasi numerik memiliki keterbatasan tertentu untuk membaca efek *stall* yang terjadi disekitar sudu Darrieus. Hal ini dikarenakan, *angle of attack* yang ditemukan pada turbin yang berputar berubah hampir secara instan dan kecepatan relatif disekitar sudu yang bervariasi. Atas dasar kedua hal ini, Gosselin, Dkk. merekomendasikan untuk turbin yang beroperasi pada TSR rendah, maka turbin sebaiknya didesain menggunakan nilai *solidity* yang tinggi ($\sigma = 0.5$). Nilai ini dapat dicapai baik dengan penambahan jumlah sudu maupun dengan pengurangan panjang rotor Darrieus

METODE PENELITIAN

Model yang dibuat pada penelitian ini berupa geometri tiga dimensi dari turbin angin bersumbu vertikal jenis Darrieus. Parameter yang ditentukan untuk dilakukan variasi adalah Mengetahui torsi dan koefisien daya Turbin Angin Sumbu Vertikal Tipe Darrieus. Data yang digunakan untuk putaran turbin diadaptasikan dari eksperimen yang telah dilakukan oleh Gosselin, Dkk. (2016) Dwiyantoro Dkk (2015) dengan mengasumsikan putaran yang sama pada kecepatan 9 m/s. Kemudian data ini diekstrapolasi untuk mendapatkan data kecepatan sudut turbin pada kecepatan angin yang sesuai. Variasi simulasi ini dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Variasi jumlah sudu dan kecepatan angin

| Parameter | Nilai |
|-----------------|--------------------|
| Jumlah Sudu | 3 sudu |
| Kecepatan Angin | 4,8 sampai 10 m/s. |

Terdapat beberapa tahap dasar dalam melakukan proses simulasi pada perangkat lunak yang digunakan (Prasetyo 2019; Prasetyo dkk. 2020; Prasetyo, Angger Bagus. 2019.

“Manutech : Jurnal Teknologi Manufaktur Analisis Numerik Perpindahan Panas Pada Saluran Pendingin Plastik Injeksi Molding Menggunakan Polyhedral Mesh.” *Teknologi manufaktur* 11(02): 70–79.

Prasetyo, Angger Bagus, Azhim Asyratul Azmi, Didit Setyo Pamuji, dan Rizqi Yaqin. 2019.

“Pengaruh Perbedaan Mesh Terstruktur dan Mesh Tidak Terstruktur Pada Simulasi Sistem Pendinginan Mold Injeksi Produk Plastik.” *Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi XIV Tahun 2019 (ReTII) 2019*(November): 400–406.

Prasetyo, Angger Bagus, dan Fauzun Fauzun. 2018. “Numerical study of effect of cooling channel configuration and size on the product cooling effectiveness in the plastic injection molding.” *MATEC Web of Conferences* 197: 8–11.

Prasetyo, Angger Bagus, Fauzun Fauzun, Azhim Azyratul Azmi, dan Sigiet Haryo Yaqin, Rizqi Ilmal, Pranoto. 2020. “ANALISIS KESERAGAMAN PENDINGINAN PRODUK PLASTIK INJEKSI MOLDING DENGAN VARIASI SISTEM PENDINGIN.” *Jurnal Penelitian Saintek* 25(2): 173–83.

<https://journal.uny.ac.id/index.php/saintek/article/view/34574>.

Prasetyo, Angger Bagus, Fauzun Fauzun, Azhim Azyratul Azmi, dan Rizqi Ilmal Yaqin. 2021. “Studi Numerik Kontur Pola Aliran Fluida Pendinginan Pada Mold Injeksi Molding.” *Infotekmesin* 12(1): 104–9.

Prasetyo, Angger Bagus, Kartinasari Ayuhikmatin Sekarjati, dan Sigiet Haryo. 2022.

“Design And Analysis of The Effect of Variation Ofcompression Force on Allen Key Using Finite Element Analysis Method.” *SJME Kinematika* 7(1): 39–52.

Prasetyo dkk, 2019). Berikut merupakan alur penelitian dari simulasi:

Problem Identification

- Mengidentifikasi *output* dari model yang diinginkan.
- Mengidentifikasi *domain* dari model turbin angin (identifikasi *computational domain*, *boundary condition*, dan *physical models*).

Pre-processing

- Membuat gambar teknik model sudu turbin angin, atau *import* jika gambar sudah tersedia.
- Membuat volume kontrol pada model sudu turbin angin.
- Menyusun *grid* dan *mesh* untuk model sudu turbin dan volume kontrol yang telah dibuat.
- Mengevaluasi *grid* dan *mesh*.
- Menentukan *Boundary Condition* untuk model.

Solver Execution

- Menyusun model numerik.
- Memroses perhitungan solusi penyelesaian.
- Memonitor proses penyelesaian.

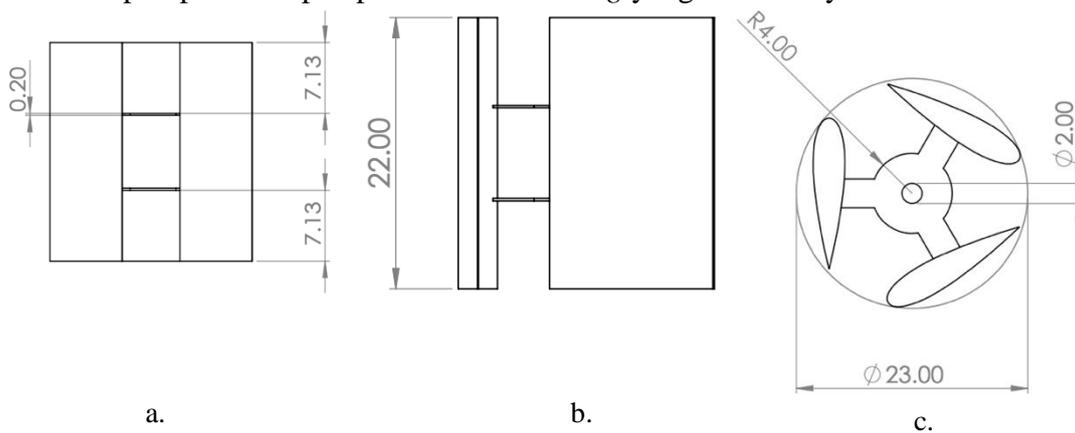
Post-Processing

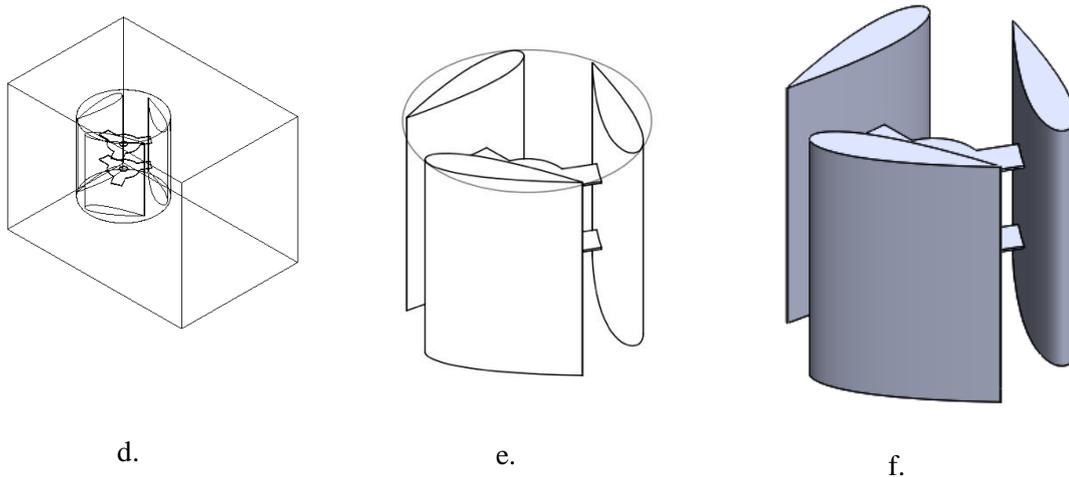
- Mengecek hasil simulasi perangkat lunak *ANSYS Fluent Release 17.0*.
 - Memberikan masukan untuk perbaikan atau peningkatan berkelanjutan terhadap model.
- Tahap 1 memegang peranan penting yang harus dilakukan sebelum melakukan analisa numerik (analisa CFD). Pertimbangan yang hati-hati diperlukan pada tahap ini sebab akan berkontribusi secara signifikan terhadap hasil-hasil dari analisa CFD (Prasetyo dan Fauzun, 2018).

Tahap 2 memerlukan perangkat lunak untuk memodelkan geometri dan pengembangan *mesh* (Prasetyo dkk, 2022). Untuk tujuan tersebut, digunakan suatu proses yang terdapat pada perangkat lunak *ANSYS Fluent Release 17.0*.

Tahap 3 masih dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *ANSYS Fluent Release 17.0* dengan sub-proses solusi numerik (Prasetyo dkk, 2021). Berbagai pekerjaan didalam tahap ini dieksekusi dengan memanfaatkan menu-menu yang tersedia. Hal ini memerlukan perhatian lebih khususnya dalam penyusunan model numerik.

Tahap 4 dimaksudkan untuk menampilkan dan menguji berbagai hasil simulasi yang dihasilkan oleh perangkat lunak CFD *ANSYS Fluent Release 17.0* dengan menggunakan menu-menu grafik dan numerik. Jika hasilnya kurang memuaskan, maka perbaikan-perbaikan terhadap model perludilakukan. Perbaikan-perbaikan dapat dilakukan pada proses tahap ke empat ini ataupun pada tahapan permodelan *meshing* yang sebelumnya telah dilakukan.





Gambar 3. (a) Ukuran Airfoil Turbin yang di gunakan yang digunakan pada turbin (b) Ketinggian Turbin yang digunakan (c) Dimensi Turbin yang digunakan (d) gambar isometris Turbin darius (e) Tiga dimensi Turbin darius (f) Geometri Fluida Turbin

HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah proses Iterasi dilakukan, hasil dari simulasi secara umum berupa path-line dari kecepatan, dan kontur tekanan dapat di peroleh. Nilai torsi dan daya hasil simulasi yang telah diperoleh dapat divalidasi dengan nilai torsi dan daya pada data hasil simulasi, Data yang digunakan dalam simulasi ini diadaptasi dari eksperimen Dwiyantoro, Dkk. (2015) dengan mengasumsikan putaran yang sama pada kecepatan 9 m/s dan mengekstrapolasi untuk kecepatan angin yang disajikan pada Tabel 4. Sedangkan Perhitungan time step dilakukan untuk mengetahui berapa besarnya time step dalam satu putaran penuh. Pada contoh ini diambil kecepatan angin 9 m/s dengan putaran turbin 80 rpm (140,90 rad/s) serta jumlah frame yang diambil adalah tiap 5° dengan *inner iteration* 1000 per *time step*. *Time step* tiap kecepatan angin disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Data yang digunakan dalam simulasi

| Kecepatan Angin | Putaran Turbin | <i>Tip Speed Ratio</i> |
|-----------------|----------------|------------------------|
| 4,8 | 20 | 5,01 |
| 8 | 33 | 5,05 |
| 6 | 15 | 3,06 |
| 7 | 12 | 2,03 |
| 7 | 24 | 4,05 |
| 9 | 240 | 32,09 |
| 9 | 80 | 10,69 |
| 9 | 50 | 6,68 |
| 10 | 240 | 28,88 |
| 10 | 80 | 9,62 |

$$\omega = \frac{\theta - \theta_0}{\text{waktu per putaran}}$$

$$140,90 \text{ rad/s} = \frac{2\pi - 0}{\text{waktu per putaran}}$$

$$\text{Waktu per putaran} = \frac{2\pi - 0}{140,90 \text{ rad/s}} = 0,04459 \text{ s}$$

$$\text{time step} = \frac{\text{waktu per putaran}}{\text{jumlah frame}} = \frac{0,04459 \text{ s}}{72} = 0,00062 \text{ s}$$

di mana:

Θ = sudut satu putaran

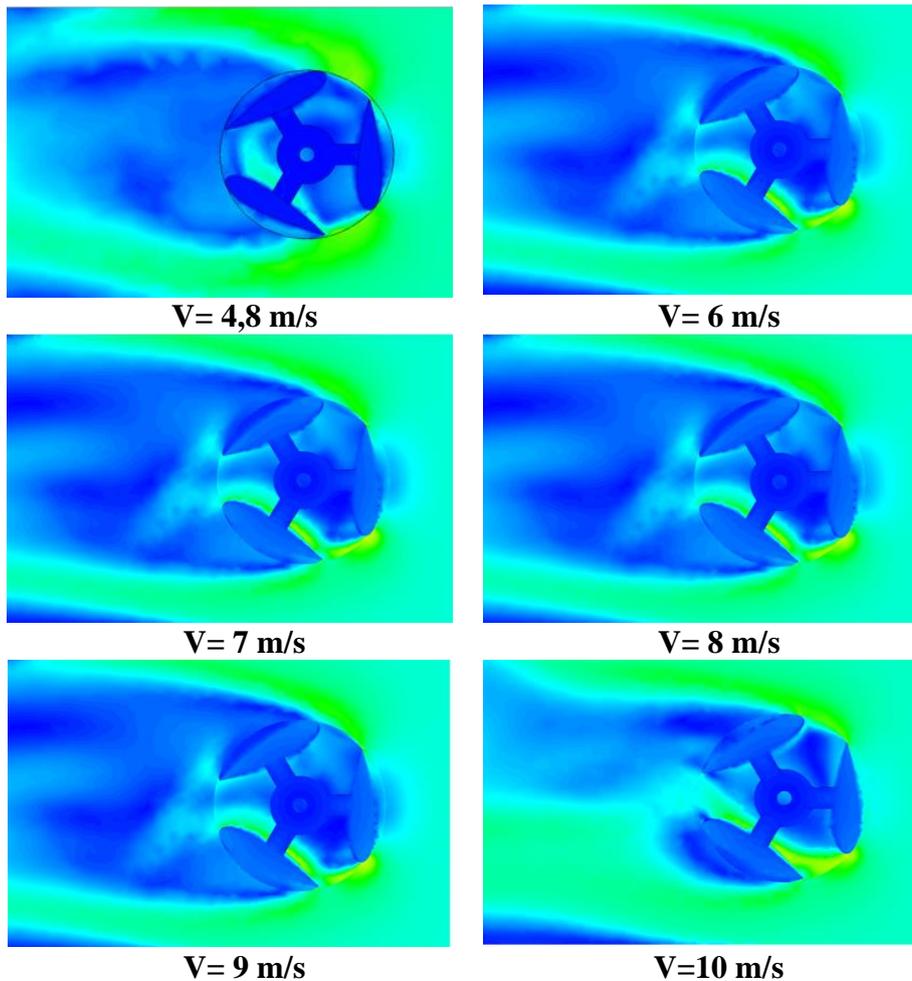
Θ_0 = sudut nol

Tabel 5. *Time step* kecepatan angin putara

| V (m/s) | TSR | (ω) Rpm | (N) Force | (N.m) Torsi | (Knot) P Angin | (kW) P Turbin | Cp | (kg m ²) Cm |
|------------|-----|---------------------|--------------|----------------|-------------------|---------------------|----------|----------------------------|
| 6 | 3 | 15 | 1,51692 | 0,03587 | 30,40416 | 0,056315 | 0,001852 | 0,000617 |
| 7 | 2 | 12 | 2,0628 | 0,050034 | 48,28068 | 0,062843 | 0,001302 | 0,000651 |
| 8 | 5 | 33 | 2,70314 | 0,067335 | 72,06912 | 0,232575 | 0,003227 | 0,000645 |
| 7 | 4 | 23 | 2,06938 | 0,050523 | 48,28068 | 0,121626 | 0,002519 | 0,00063 |
| 4,8 | 5 | 20 | 0,978388 | 0,021972 | 15,56693 | 0,045994 | 0,002955 | 0,000591 |
| 9 | 6,6 | 50 | 3,49224 | 0,086828 | 102,614 | 0,4544 | 0,004428 | 0,000671 |
| 9 | 11 | 80 | 3,48724 | 0,080692 | 102,614 | 0,675659 | 0,006584 | 0,000599 |
| 10 | 9 | 80 | 4,14056 | 0,102224 | 140,76 | 0,855956 | 0,006081 | 0,000676 |
| 9 | 32 | 240 | 3,58902 | 0,115892 | 102,614 | 2,911207 | 0,02837 | 0,000887 |
| 10 | 39 | 240 | 3,88995 | 0,168072 | 140,76 | 4,221969 | 0,029994 | 0,001034 |

Analisis Kontur Kecepatan

Gambar 3.1 menunjukkan kontur kecepatan turbin angin Darrieus pada berbagai sudut putar dengan kecepatan angin 4,8-10 m/s. Pada gambar kontur kecepatan tersebut, sudu 1 pada sudut putar 0° tidak memiliki angle of *attack* yang mengakibatkan tidak adanya gaya lift yang terjadi dan torsi yang terbentuk pun bernilai minus dikarenakan gaya *drag* pada kondisi ini tidak bernilai nol. Hal ini sesuai dengan hasil dari penelitian Gorle, dkk. (2016). Pertambahan sudut putar akan menambah nilai angle of *attack* dan mempengaruhi gaya lift yang terjadi. gaya lift yang terbentuk lebih besar daripada posisi sudut putar sebelumnya sehingga mengakibatkan kecepatan pada sudu 1 meningkat dan mampu memutar turbin lebih baik. Semakin besar gaya lift maka semakin besar pula torsi yang dihasilkannya.

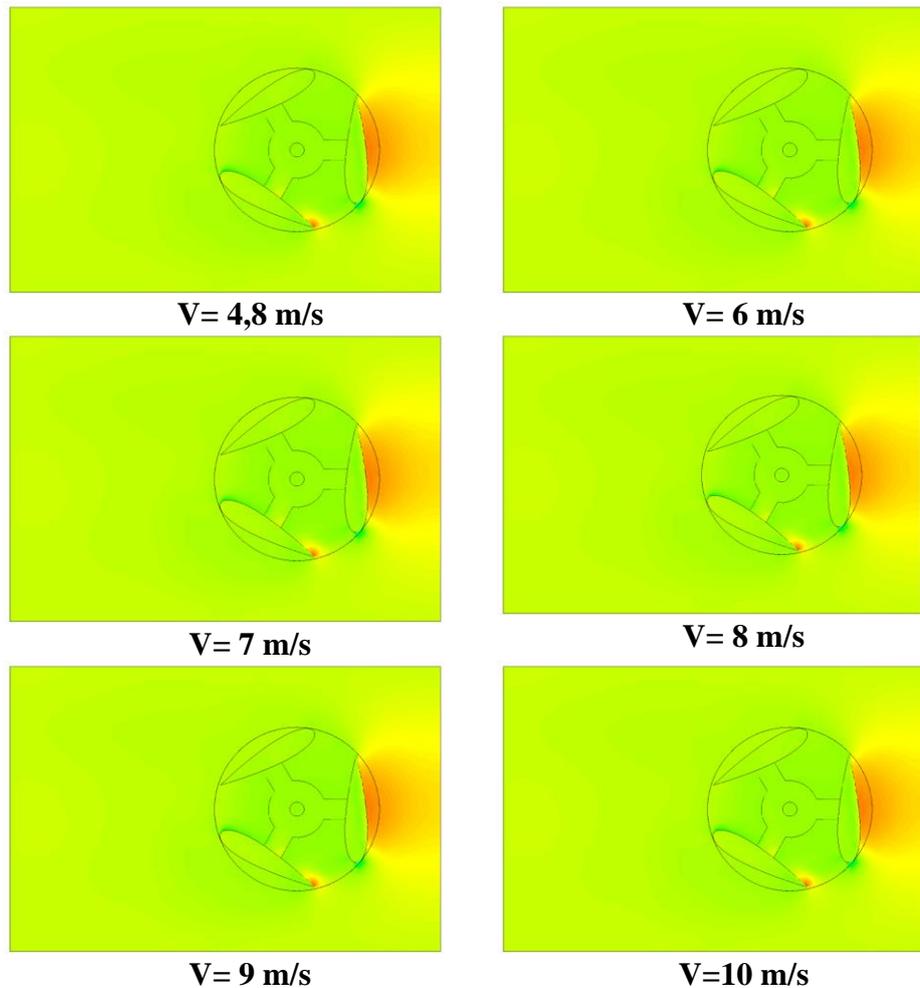


Gambar 4. Kontur Kecepatan pada berbagai variasi kecepatan angin

Gambar 4. Kontur kecepatan turbin angin Darrieus dengan variasi kecepatan *freestream* 4,8, 6, 7, 8, 9 dan 10 m/s. Pada gambar tersebut, ada penambahan kontur *wake* yang jelas dan peningkatan kecepatan angin pada daerah *leading edge* sudu 1 seiring dengan peningkatan kecepatan aliran *freestream*, akan tetapi perubahan yang terjadi pada kontur aliran pada kecepatan aliran 3 m/s dan 8 m/s relatif kecil. Mengembangnya kontur *wake* ini menandakan adanya pertambahan kecepatan total pada turbin angin dan peningkatan nilai torsi yang dihasilkannya. Terlepas dari perubahan kontur aliran dengan meningkatnya kecepatan *freestream*, tidak ada perbedaan yang berarti pada kondisi aliran dengan variasi kecepatan *freestream* tersebut.

Analisis Kontur Tekanan

Pada kontur tekanan tersebut terlihat bahwa tekanan tertinggi pada sudu 1 pada sudut terletak pada tungan sudu atau *leading edge*. Hal ini menyebabkan tidak adanya gaya *lift* yang terjadi dikarenakan tidak ada perbedaan tekanan yang signifikan antara permukaan terluar sudu dengan permukaan terdalamnya. Fenomena ini terjadi karena *angle of attack* pada saat sudut putar 0° bernilai 0 dan sudu yang digunakan adalah jenis sudu simetris (NACA 0021). perkembangan kontur tekanan pada sisi terluar sudu yang berhubungan langsung dengan aliran *freestream*, misalnya saja kontur tekanan pada sisi terluar sudu 1 yang semakin berkembang dan semakin terlihat jelas perbedaannya dengan sisi terdalam sudu 1, yang berakibat pada terjadinya gaya *lift* yang semakin besar yang mengarah kedalam turbin dan membentuk sudut tertentu dengan jari-jari turbin sesuai dengan besar *angle of attack* yang terbentuk.

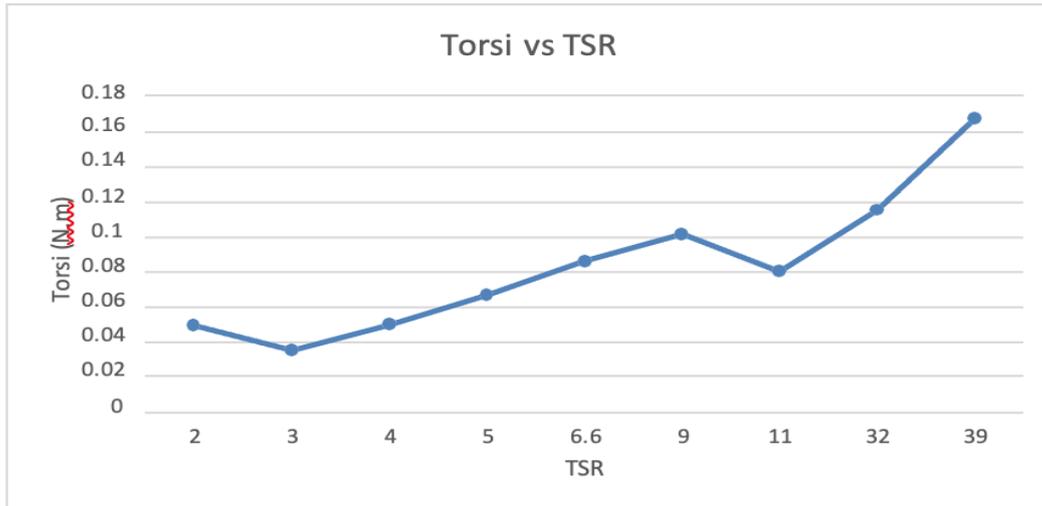


Gambar 5. Kontur Tekanan pada berbagai variasi kecepatan angin

Gambar 5 di atas menunjukkan kontur tekanan turbin angin pada sudut satu dengan kecepatan angin 4,8, 6, 7, 8, 9, dan 10 m/s. Pada gambar tersebut, tidak ada perubahan kontur yang signifikan, kecuali pada sudu 1. Pada sudu 1 terlihat kontur tekanan yang semakin membesar seiring dengan bertambahnya kecepatan angin *freestream*. Kemudian terlihat juga perbedaan tekanan yang terjadi antara sisi terluar dan terdalam sudu 1 yang semakin meningkat bersamaan dengan bertambahnya kecepatan angin *freestream*. Sedangkan sudu-sudu pada daerah *downstream* hanya menerima aliran yang telah mengenai sudu-sudu pada daerah *upstream* sehingga aliran ini tidak sekuat aliran *freestream*, dan berdampak pada gaya *lift* dan torsi yang dihasilkan oleh sudu-sudu daerah *downstream* tersebut.

Analisis Torsi Terhadap TSR

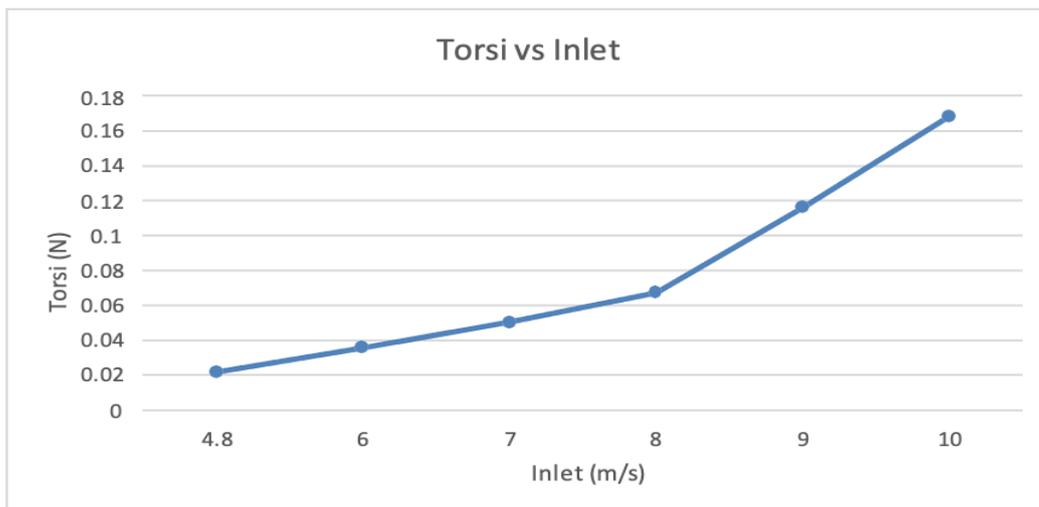
Setelah mencapai titik maksimumnya, nilai torsi terus turun hingga mencapai torsi 0,0358697 karena dipengaruhi Kecepatan angin *freestream* yang turun. Mulai dari Kecepatan angin *freestream* 8 ini nilai torsi mulai maksimal. Setelah memasuki daerah *downstream*, sudu 1 ini memiliki nilai torsi yang cukup rendah dikarenakan aliran yang mengenai sudu pada daerah ini tidak sekuat aliran pada daerah *upstream*. Dari kesemua fenomena gaya *lift* yang terjadi pada setiap sudu, dapat diketahui bahwa faktor yang paling mempengaruhi gaya *lift* ini adalah besarnya aliran angin yang mengenai sudu dan besarnya *angle of attack*. Kombinasi kecepatan angin *freestream* dan *angle of attack* yang sesuai akan menghasilkan gaya *lift* yang optimal. Dan nilai resultan gaya *lift* dengan gaya *drag* inilah yang akan menentukan besarnya nilai torsi yang diproduksi.



Gambar 6. Grafik torsi terhadap Tip Speed Ratio

Analisis Torsi Rata-rata Pada Tiap Kecepatan Angin

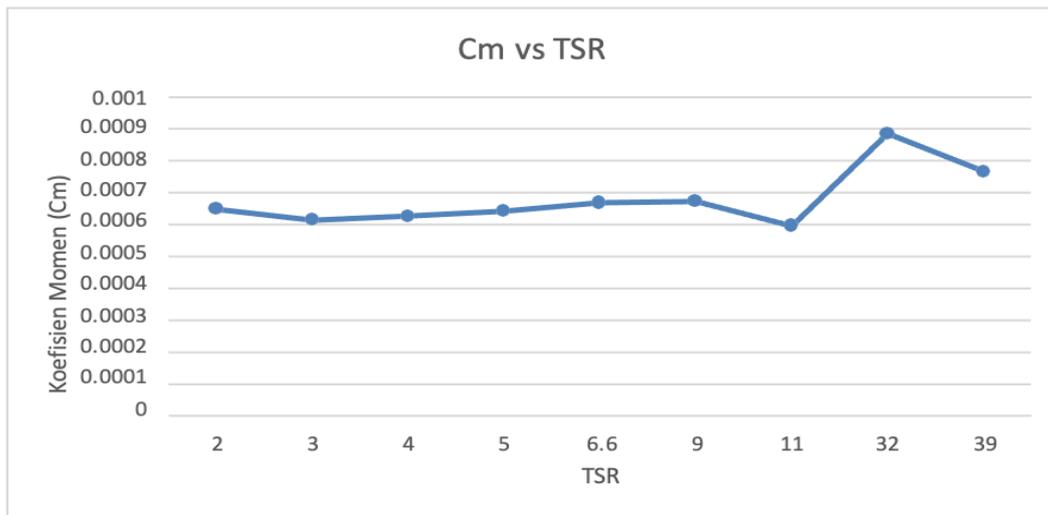
Pada grafik hubungan kecepatan angin terhadap Torsi di atas diketahui bahwa rasio 1 memiliki nilai Torsi tertinggi yaitu 0,16 pada kecepatan angin 10 m/s, rasio 2 sebesar 0,11 pada kecepatan angin 9 m/s dan rasio 5 sebesar 0,03 pada kecepatan angin 6 m/s.



Gambar 7. Grafik torsi terhadap kecepatan angin

Analisis Data Analisis Cofisien Momen Terhadap Tsr

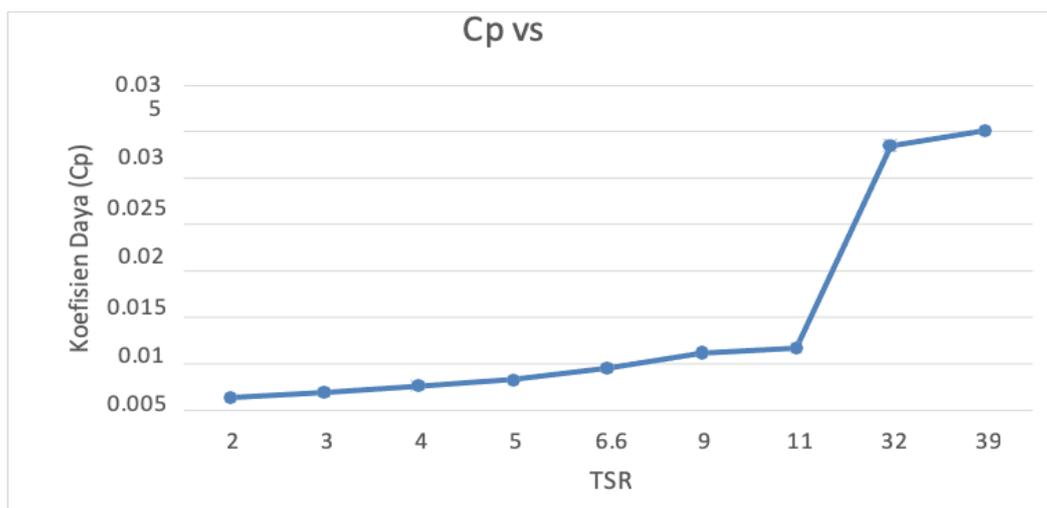
Grafik dibawah ini menunjukkan nilai TSR tertinggi didapat pada kondisi kecepatan angin 10 m/s dengan nilai Cofisien Moment 0,00103. Dan nilai TSR terendah didapat pada kondisi kecepatan angin 7 m/s dengan nilai *Cofisien Moment* 0,00062. Hasil simulasi turbin menunjukkan bahwa semakin luas penampang yang di terpa oleh angin maka akan memberi dorongan tenaga yang lebih, hal ini tak dipengaruhi oleh losses yang besar. Sehingga turbin akan semakin banyak angin yang terjebak di dalam turbin, hal ini dikarenakan momen aliran yang terjadi secara terus menerus sehingga angin yang telah masuk ke dalam turbin akan keluar dengan lancar.



Gambar 8. Grafik koefisien daya terhadap TSR

Analisis Cofisien Daya Terhadap TSR

Pada rentang TSR 11 - 32 turbin memiliki nilai koefisien daya yang lebih tinggi. Hal ini dikarenakan semakin besarnya Rpm yang di gunakan yaitu mencapai 240 yang digunakan pada turbin angin, maka semakin tinggi pula nilai TSR dan nilai Cp yang di dapat. Koefisien daya maksimal pada turbin angin Darrieus tiga sudu bernilai lebih tinggi sekitar 15,94% Pada penelitian kali ini terlihat adanya penurunan koefisien daya pada nilai TSR tertentu dikarenakan rentang nilai TSR yang didapat pada penelitian ini relatif kecil yaitu 2 – 5 sehingga kurang mampu menangkap fenomena penurunan koefisien daya yang terjadi pada turbin angin dengan karakteristik tertentu. Sedangkan Hassan et al (2015) mampu untuk mendapatkan rentang nilai TSR yang lebih besar, terlihat pada gambar 2.10 dengan rentang nilai TSR sekitar 1,5 - 4,5 sehingga dengan rentang TSR tersebut mampu menangkap fenomena kenaikan dan penurunan nilai koefisien daya turbin angin pada nilai TSR tertentu. Perbedaan rentang TSR ini terjadi karena pada penelitian Hassan Dkk (2015) variabel yang berpengaruh pada nilai TSR nya adalah nilai ω (putaran turbin) saja dengan nilai kecepatan *freestream* dan jari-jari turbin konstan pada setiap simulasi, sedangkan pada penelitian ini variabel yang berpengaruh pada nilai TSR adalah kecepatan *freestream* dan ω yang bervariasi dengan nilai jari-jari turbin tetap dijaga konstan



Gambar 9. Grafik Koefisien Daya Terhadap TSR

KESIMPULAN

Pada simulasi turbin angin Darrieus dengan variasi kecepatan angin 4,8 - 10 m/s dapat diambil kesimpulan bahwa: *Tip Speed Ratio* tertinggi terjadi pada kecepatan angin 10 m/s dengan nilai sebesar 32 dan Nilai CP rata-rata yang diperoleh berdasarkan hasil simulasi adalah 0,442. Sehingga efisiensi rata-rata yang diperoleh adalah sebesar 69,81%. Torsi yang dihasilkan oleh sudu-sudu pada daerah *upstream* lebih tinggi daripada torsi yang dihasilkan pada daerah *downstream*. Hal ini disebabkan karena sudu-sudu di daerah *upstream* berhadapan langsung dengan aliran *freestream* dengan kecepatan maksimumnya saat melalui inlet, yang berakibat pada tingginya perbedaan tekanan yang terjadi pada sudu-sudu tersebut sehingga torsi yang dihasilkan pun tinggi. Sedangkan aliran *freestream* pada daerah *downstream* telah kehilangan banyak kecepatannya akibat berhadapan dengan sudu-sudu di daerah *upstream*, sehingga perbedaan tekanan yang terjadi pun lebih kecil dan begitupula dengan torsi yang dihasilkan. Koefisien daya yang dihasilkan berbanding lurus dengan nilai torsi yang terjadi. Semakin tinggi nilai torsi maka koefisien daya yang dihasilkan pun akan semakin baik. Hal ini terbukti pada rentang TSR 4 – 8 nilai koefisien daya maksimal turbin angin Darrieus tinggi sekitar 15,94% (dengan nilai koefisien daya maksimal sebesar 0,4366) dan Kontur aliran dengan kontur tekanan serta nilai torsi dan koefisien daya yang dihasilkan oleh turbin angin dipengaruhi oleh jumlah *cell* dan tipe *mesh* yang digunakan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis Mengucapkan Terimakasih Untuk Mama dan Papa tercinta atas segala pengorbanan yang telah dilakukan baik moral maupun materi, dan telah melalui banyak perjuangan dan rasa sakit. Pencapaian ini adalah persembahan istimewa saya kepada kalian yang selalu memberikan kasih dan dukungan serta tak henti-hentinya mendoakan saya. Dan Bapak Ir. Eka Yawara, M.T selaku dosen Pembimbing dan Bapak Ir. Harianto M.T. yang sudah membantu saya selama ini, sudah diajari, dan tidak lupa juga atas kesabaran dari bapak ibu sudah membimbing saya di Tugas Akhir ini.

REFERENSI

- Kanyako, F., Janajreh, I., *Vertical Axis Wind Turbine Performance Prediction, High and Low Fidelity Analysis* Proceedings of the 2014 IAJC-ISAM International Conference. 2014
- Manwell, J.F., J.G. McGowan, dan A.L. Rogers. 2009. *Wind Energy Explained – Theory Design and Application* Second Edition. London: John Wiley & Sons Ltd.
- Airfoil tools, NACA 4412 airfoil, dari <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca4412-i> (29 Oktober 2016)
- ANSYS, Fluent Inc. 2015. ANSYS – Fluent Release 17.0 Theory Guide. SAS IP Inc.
- ANSYS, Fluent Inc. 2015. ANSYS – Fluent Release 17.0 User’s Guide. SAS IP Inc.
- Biswas, A., Bhuyan, S., *Investigations on Self-starting and Performance Characteristics of simple H and Hybrid H – Savonius Vertical Axis Wind Rotors*. Elsevier Ltd. ; 2014
- Clancy, L. J. (1978). *L. j. clancy*. 623–624.
- Gorle, J.M.R., L. Chatellier, F. Pons & M. Ba. 2016. “Flow and performance analysis of H-Darrieus hydro turbine in a confined flow: A computational and experimental study”. *Journal of Fluids and Structures* 66, 382 – 402.
- Tu, J., Yeoh, G.-H., & Liu, C. (2013). Computational Fluid Dynamics. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9).
- Hassan, Islam M., Ahmad M. Ali, Mahdi S. Al-Ajmi & Taher G. Abu El-Yazied. 2015. “Effect of Number of Blades and Blade Chord Length on the Performance of Darrieus Wind Turbine”. *American Journal of Mechanical Engineering and Automation* 2, 1:16 – 25.

- Dwiyantoro, B. A., Suphandani V., Rahman, Studi Eksperimental tentang Karakteristik Turbin Angin Sumbu Vertikal Jenis Darrieus – Savonius. Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV (SNTTMXIV) : 2015
- Ingram, Grant. 2011. Wind Turbine Blade Analysis using the Blade Element Momentum Method. Durham: Durham University.
- Cao, Han. 2011. Aerodynamics Analysis of Small Horizontal Axis Wind Turbine Blades by Using 2D and 3D CFD Modelling. England: University of Central Lancashire.
- Kumar, A., Nikhade, A., *Hybrid Kinetic Turbine Rotors: A Review*. International Journal of Engineering Science & Advanced Technology ; 2014
- Munson, Bruce R., dkk. 2009. Fundamental of Fluid Mechanics. London: John Wiley & Sons Ltd.
- Versteeg, H. K., Malalasekera, W., Orsi, G., Ferziger, J. H., Date, A. W., & Anderson, J. D. (1995). An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method. In *Fluid flow handbook. McGraw-Hill*
- Gosselin, R., Dumas, G., Boudreau, M., *Parametric Study of H- Darrieus Vertical-axis Turbines Using CFD Simulations*. AIP publishing ; 2016
- Martin O.L. Hansen. 2008. Chapter 2 2D Aerodynamics - Aerodynamics of Wind Turbine Second Edition. UK: Earthscan.
- Ionescu, R. D., Vlase, S., Ivanoiu M., *Rotor Design for Vertical Axis Wind Turbines, Suitable for Urban Seashore Environment or Naval Industry Implementation (Numerical Methods and Analytical Calculus)*. International Conference ISTM 2014 papers.; 2014.
- Prasetyo, Angger Bagus. 2019. “Manutech : Jurnal Teknologi Manufaktur Analisis Numerik Perpindahan Panas Pada Saluran Pendingin Plastik Injeksi Molding Menggunakan Polyhedral Mesh.” *Teknologi manufaktur* 11(02): 70–79.
- Prasetyo, Angger Bagus, Azhim Asyratul Azmi, Didit Setyo Pamuji, dan Rizqi Yaqin. 2019. “Pengaruh Perbedaan Mesh Terstruktur dan Mesh Tidak Terstruktur Pada Simulasi Sistem Pendinginan Mold Injeksi Produk Plastik.” *Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi XIV Tahun 2019 (ReTII) 2019*(November): 400–406.
- Prasetyo, Angger Bagus, dan Fauzun Fauzun. 2018. “Numerical study of effect of cooling channel configuration and size on the product cooling effectiveness in the plastic injection molding.” *MATEC Web of Conferences* 197: 8–11.
- Prasetyo, Angger Bagus, Fauzun Fauzun, Azhim Azyratul Azmi, dan Sigiet Haryo Yaqin, Rizqi Ilmal, Pranoto. 2020. “ANALISIS KESERAGAMAN PENDINGINAN PRODUK PLASTIK INJEKSI MOLDING DENGAN VARIASI SISTEM PENDINGIN.” *Jurnal Penelitian Saintek* 25(2): 173–83. <https://journal.uny.ac.id/index.php/saintek/article/view/34574>.
- Prasetyo, Angger Bagus, Fauzun Fauzun, Azhim Azyratul Azmi, dan Rizqi Ilmal Yaqin. 2021. “Studi Numerik Kontur Pola Aliran Fluida Pendinginan Pada Mold Injeksi Molding.” *Infotekmesin* 12(1): 104–9.
- Prasetyo, Angger Bagus, Kartinasari Ayuhikmatin Sekarjati, dan Sigiet Haryo. 2022. “Design And Analysis of The Effect of Variation Ofcompression Force on Allen Key Using Finite Element Analysis Method.” *SJME Kinematika* 7(1): 39–52.