

Analisis Kinerja Turbin Angin Sumbu Vertikal Tipe H-Darrieus Dengan Sudu Naca 0015 Menggunakan Pendekatan *Computational Fluid Dynamic* (CFD)

Nicolas Yoga Pranasmarā

Program Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana, Indonesia

Article Info

Article history

Received July 29, 2022

Revised September 17, 2022

Accepted May 17, 2025

Keywords

Vertical Axis Wind Turbine;
H-Darrieus;
CFD;
Ansys

ABSTRACT

Wind energy as renewable energy has the potential to be developed. In Urban Area with the characteristics of unstable airflow patterns and relatively low environmental impact, the Vertical Axis Wind Turbine (TASV) becomes a potential power plant to convert wind kinetic energy into electrical energy. This study aims to the performance of the straight bladed H-Darrieus TASV with variation of blade configurations (2 and 3) and wind speed (1,3,5,8, and 10 m/s). The shape of the blade used the NACA 0015 airfoil. The method used in this research is a two-dimensional numerical study using Computational Fluid Dynamic (CFD) with the tip speed ratio at 1.31. The results showed that the maximum power coefficient (C_p) of 0.02 occurred at a wind speed of 8 m/s with a configuration of 2 (two) blades. At wind speeds of 1, 3, 5, and 10 m/s, the configuration of 3 (three) blades has a higher C_p value than the configuration of 2 (two) blades. But the configuration of 2 blades has higher C_p value than the 3 (three) blade configuration at a wind speed of 8 m/s

This is an open-access article under the [CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



*Corresponding Author

Nicolas Yoga Pranasmarā,
Jurusan Teknik Mesin,
Fakultas Teknik,
Universitas Mercu Buana,
Jl. Meruya Selatan No. 1, Kembangan, Jakarta Barat 11650, Indonesia
Email: yogacahae@gmail.com

1. PENDAHULUAN

Isu ancaman pemanasan global, emisi gas rumah kaca, kelangkaan sumber energi, ketersediaan bahan bakar fosil yang semakin menipis, menciptakan peluang untuk mengembangkan peran teknologi energi terbarukan yang ramah lingkungan dalam menjaga ketahanan dan kemandirian energi. Energi terbarukan yang memiliki potensi untuk dikembangkan adalah pemanfaatan turbin angin untuk menghasilkan energi listrik. Terdapat potensi sumber angin yang cukup besar di daerah perkotaan dengan potensi kekuatan yang signifikan. Dengan karakteristik angin di daerah perkotaan yang pola nya tidak stabil dan banyak turbulensi, pengembangan turbin angin yang efisien sangat penting untuk ditingkatkan dan dikembangkan. Turbin angin Sumbu Vertikal (TASV) menjadi alternatif untuk memanfaatkan sumber angin yang tidak stabil di daerah perkotaan. TASV

memiliki dampak lingkungan yang relatif rendah, tidak terbatasnya daerah pemasangan turbin angin karena ukurannya yang kecil, desain yang relatif sederhana dan karakteristik TASV yang dapat bergerak tanpa tergantung arah angin. Selain itu, turbin ini dapat menghasilkan energi listrik dengan kecepatan angin *cut-in* rendah dan tidak memerlukan *yaw mechanism* untuk menyesuaikan arah rotor ke arah angin yang berubah-ubah. Untuk turbin skala kecil, tipe TASV sangat cocok diaplikasikan di daerah yang karakteristik anginnya tidak stabil dan banyak turbulensi seperti di daerah perkotaan[1]. Tabel 1 menunjukkan potensi angin di Indonesia.

Tabel 1. Potensi Angin di Indonesia[2]

Kelas	Kec. Angin (m/s)	Daya Spesifik (W/m ²)	Jumlah Lokasi	Daerah/Wilayah
Kurang Potensial	<3,0	<45	66	Sumbar, Bengkulu, Jambi, Jateng, NTB, Kalses, NTT, Sultra, Sulut, Maluku
Potensi Rendah (skala kecil)	3,0-4,0	<75	34	Lampung, DIY, Bali, Jatim, Jateng, NTB, Kalsel, NTT, Sulut, Salteng, Sumut, Sulbar
Potensi Menengah (Skala Menengah)	4,1-5,0	75-150	34	Bengkulu, Banten, DKI, Jateng, Jatim, NTB, NTT, Sultra, Sulteng, Gorontalo, Sulsel
Potensi Tinggi (Skala Besar)	>5,0	>150	19	DIY, Jateng, Sulsel, NTB, NTT, Sulut

Dalam beberapa dekade terakhir, penelitian untuk TASV difokuskan pada aerodinamika turbin, material sudu dan pemodelan, yang disimulasikan menggunakan *computational fluid dynamic (CFD)*. Beberapa penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya antara lain oleh Kanyako dan Janajreh mempelajari secara numerik kinerja dua dimensi dari turbin Darrieus tiga bilah menggunakan empat sudu yang umum digunakan untuk mendapatkan detail kinerja torsi dan keluaran daya. Sudu DU-06-W-200, NACA 0015, NACA 0018 dan S1046 diselidiki dalam pekerjaan ini dan hasilnya menunjukkan bahwa NACA 0015 adalah sudu berkinerja terbaik untuk rentang *Tip Speed Ratio (TSR)* dari 1 sampai 4[3]. Selanjutnya, Campos mempelajari secara numerik dan pengujian terowongan angin kinerja TASV tipe *Darrieus dua bilah* dari penskalaan model turbin *Sandia National Laboratories (SNL)* 17 m yang beroperasi pada *Reynold Number (Re)* dan *Tip Speed Ratio (TSR)* rendah, dengan variasi bentuk *straight blade*, *troposkien blade* dan *helical*. Hasil pengujian terowongan angin untuk 3 model *straight blade* dengan bentuk airfoil NACA 0015 menunjukkan model *straight blade*-2 menghasilkan Nilai C_p paling tinggi yaitu 0.118 pada kecepatan angin 8 m/s dan TSR 1,31[4].

Mengacu dari penelitian-penelitian sebelumnya, pada penelitian tugas akhir ini, penulis melakukan analisis kinerja TASV H-Darrieus berbilah lurus menggunakan CFD, untuk mengetahui kinerja dari turbin dengan variasi kecepatan angin dan variasi jumlah sudu. Bentuk airfoil yang digunakan untuk sudu menggunakan NACA 0015 dan nilai TSR nya 1,31. Metode simulasi CFD dilakukan secara dua dimensi menggunakan ANSYS Fluent R.22 untuk mengetahui dan membandingkan nilai daya (P), nilai C_p dan efisiensi yang dihasilkan dari model TASV H- Darrieus dengan dua sudu dan tiga sudu.

1.1 Energi Angin

Energi angin sangat dipengaruhi oleh kecepatan angin. Kecepatan angin adalah satuan yang mengukur kecepatan aliran udara yang disebabkan oleh pergerakan angin dari tekanan tinggi ke tekanan rendah. Alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan angin adalah dengan menggunakan anemometer. Selain menggunakan alat pengukur, kecepatan angin dapat diklasifikasikan dengan menggunakan skala *Beaufort* yang didasarkan pada pengamatan pengaruh spesifik dari kecepatan angin tertentu.

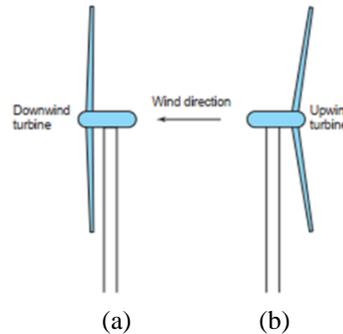
Berdasarkan jenis aliran fluida, aliran angin dapat diklasifikasikan sebagai aliran laminar ($Re < 2300$), aliran transisi ($2300 < Re < 4000$), serta aliran turbulen ($Re > 4000$). Aliran laminar adalah aliran fluida yang gerak partikelnya sejajar dengan garis-garis arusnya. Aliran laminar bersifat *steady* yang artinya aliran fluidanya bergerak tetap per satuan waktu. Aliran transisi adalah kondisi aliran fluida peralihan antara kondisi seragam menjadi kondisi acak. Aliran turbulen adalah aliran fluida yang bergerak acak antara satu dan yang lainnya. Sehingga pada aliran turbulen tidak adanya keteraturan dalam lintasan fluidanya[5].



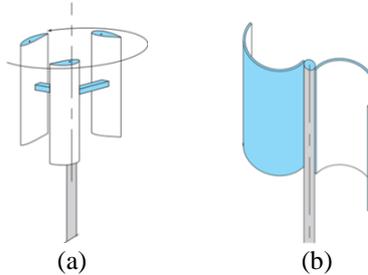
Gambar 1. Aliran Laminar (kiri), Aliran Turbulen (tengah), Aliran Transien (kanan)[5]

1.2 Turbin Angin

Turbin angin adalah jenis mesin turbo dengan poros tengah dan bilah yang mengubah aliran fluida menjadi rotasi mekanis, menghasilkan listrik melalui *gearbox* dan *generator*. [4] Berdasarkan sumbu rotasi, turbin angin diklasifikasikan menjadi 2 (dua) jenis, jenis pertama yaitu Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) untuk konfigurasi aliran aksial dengan sumbu rotor sejajar dengan tanah. Turbin ini biasanya dilengkapi dengan *self-starter system* dan *yaw mechanism* untuk memutar sudu ke arah angin. [1] Jenis kedua adalah Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV) untuk konfigurasi aliran radial dengan menggunakan rotor berbilah lurus atau melengkung, dengan sumbu putar tegak lurus terhadap aliran angin, yang mampu menangkap angin dari segala arah.

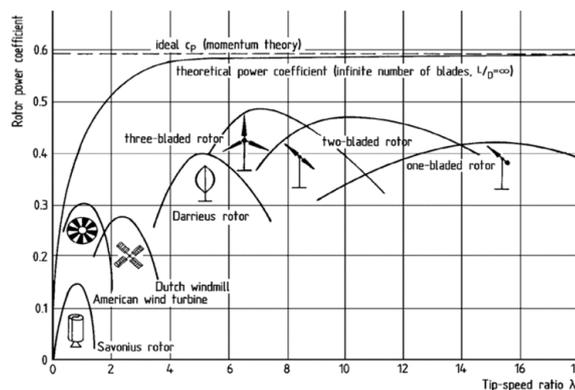


Gambar 2. Jenis turbin angin TASH, (a) downwind turbine, (b) upwind turbine [6]



Gambar 3. Jenis turbin angin TASV, (a) H-Darrieus, (b) Savonius [6]

Grafik pada Gambar 4 menunjukkan variasi nilai tip speed ratio dan koefisien daya untuk berbagai macam turbin angin. Pada grafik koefisien daya C_p mana yang terbaik dengan nilai kecepatan pada ujung sudu TSR



Gambar 4: Grafik Berbagai Macam Turbin Angin [7]

1.3 Perhitungan

a. Daya Angin

Daya Angin adalah daya yang dihasilkan dari udara yang bergerak, dimana daya ini berbanding lurus dengan pangkat tiga kecepatannya dan dirumuskan sebagai berikut: [8]

$$P_{angin} = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

Dimana:

- P_{angin} : daya yang tersedia pada angin (Watt)
- A : luas penampang sudu (m^2)
- ρ : masa jenis udara (kg/m^3)
- v : kecepatan angin (m/s)

b. Daya Turbin Angin

Daya Turbin Angin adalah daya yang dihasilkan oleh turbin angin sebagai akibat adanya angin yang menghantam sudu turbin sehingga sudu turbin bergerak berputar. Sehingga, daya yang dihasilkan oleh sudu turbin yang berputar adalah:

$$P_{turbin} = T \cdot \omega$$

Dimana:

P_{turbin} : daya yang dihasilkan turbin (Watt)

T : torsi (N.m)

ω : kecepatan sudut (rad/s)

c. Tip Speed Ratio (TSR)

TSR adalah perbandingan antara kecepatan di ujung sudu turbin angin dengan kecepatan angin, sehingga dapat dirumuskan:

$$TSR = \lambda = \frac{\omega \cdot R}{V_0}$$

Dimana:

λ : Tip Speed Ratio

ω : kecepatan sudut rotor turbin (rad/s)

R : jari-jari rotor (m)

v : kecepatan angin (m/s)

d. Koefisien daya (Cp)

Koefisien daya adalah hal penting dalam merancang turbin angin karena menunjukkan berapa besar energi angin yang dapat diekstraksi dari energi kinetik angin yang melalui penampang turbin. Koefisien daya sangat mempengaruhi kinerja turbin angin dan dipengaruhi konstruksi dan desain dari turbin angin.[9]

Perhitungan koefisien daya (Cp) pada turbin angin dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$Cp = \frac{T \cdot \omega}{\rho \cdot A \cdot r \cdot v^3}$$

Dimana:

T : torsi (N.m)

ω : kecepatan sudut (rad/s)

ρ : masa jenis udara (kg/m³)

A : luas penampang sudu (m²)

Terdapat hubungan antara koefisien daya dan koefisien momen, untuk mengetahui hubungan antara koefisien daya dan koefisien momen dapat ditulis sebagai persamaan berikut:

$$C_p = \lambda \cdot C_m$$

Dimana:

C_p : koefisien daya

λ : Tip Speed Ratio

C_m : koefisien momen

e. Efisiensi turbin angin

Secara keseluruhan, turbin angin tidak dapat menangkap semua energi kinetik, melainkan hanya sebagian saja. Secara teoritis maksimum energi angin yang dapat diekstrak menjadi energi kinetik hanya sebesar 59,3 %. Besaran tersebut sesuai dengan teori *Betz Limit*. [10] Efisiensi turbin angin dapat dihitung dengan menggunakan perbandingan rasio antara koefisien daya dengan Betz limit, Betz limit = $16/27 = 0,593$. Untuk memperoleh nilai efisiensi dari turbin angin dengan menggunakan metode Betz limit dapat dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\eta = \frac{C_p}{16/27} = \frac{C_p}{0.593}$$

Dimana:

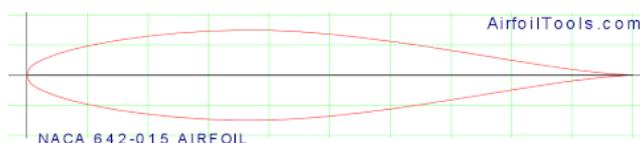
η : efisiensi turbin angin

C_p : koefisien daya

1.4 Airfoil

Airfoil adalah bentuk dari suatu penampang yang dapat menghasilkan gaya angkat atau efek aerodinamika ketika melewati suatu aliran udara. Salah satu jenis *airfoil* yaitu *airfoil NACA*. *Airfoil NACA 0015* merupakan

salah satu jenis Airfoil yang tergolong dalam NACA Seri 4 Digit. Airfoil ini tidak memiliki kelengkungan, dimana untuk airfoil yang tidak memiliki kelengkungan, dengan camber line dan chord berhimpit disebut airfoil simetris. Hal ini terlihat pada angka pada dua digit pertama yaitu angka “00” Sedangkan dua digit kedua yaitu angka 15 menunjukkan bahwa airfoil ini memiliki ketebalan maksimum 15% dari panjang *chord*.



Gambar 5: Airfoil NACA 0015

1.5 Computational Fluid Dynamics

Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah metode numerik yang menjelaskan permasalahan fluida dengan bentuk aljabar yang dipecahkan secara numerik. Dalam dinamika fluida, terdapat tiga persamaan utama yang mendasar yang harus ditentukan dalam analisa, diantaranya yaitu persamaan kekekalan massa, persamaan kekekalan momentum, dan persamaan kekekalan energi[11].

Ada ada 3 (tiga) langkah utama dalam pemodelan *CFD* yaitu *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*[12]. Pada tahap *pre-processing* meliputi pembuatan model geometri, penentuan *boundary condition*, pembuatan meshing, dan solver settings. Tahap *processing* adalah sebuah proses pengaturan simulasi numerik untuk mensimulasikan proses aliran angin yang terjadi pada turbin angin. Selanjutnya, tahap *processing* akan menghasilkan data-data hasil simulasi sesuai dengan parameter yang telah ditentukan. Tahap *Post-processing* digunakan untuk memeriksa hasil data simulasi yang telah diperoleh dari tahap *processing*, selanjutnya data akan diolah ke dalam bentuk grafik yaitu kurva data kuantitatif berupa grafik maupun tabel data.

Untuk mendiskritkan persamaan, terdapat 3 metode numerik yang digunakan yaitu *Finite Differential Method* (FDM), *Finite Element Methode* (FEM), dan *Finite Volume Method* (FVM). FVM telah banyak digunakan pada perangkat lunak *CFD*[12].

Dalam perangkat lunak *CFD*, turbin angin disimulasikan oleh fluida udara dengan aliran turbulen. Metode numerik simulasi turbulen dibagi menjadi dua yaitu, *Direct Numerical Simulation* (DNS) dan *Indirect Numerical Simulation* (INS). Pada *Indirect Numerical Method* (INS) terdapat tiga tipe metode simulasi yang berbeda diantaranya yaitu, *Large Eddy Simulation* (LES), *Reynold-average Navier-Stokes* (RANS), dan *Datached Eddy Simulation* (DES)[12].

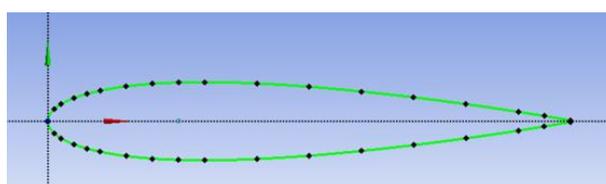
Untuk menyelesaikan persamaan dalam melihat fenomena yang terjadi pada simulasi *CFD* yang disebut juga metode solusi, maka digunakanlah beberapa model yaitu *Model Standard k-ε*, *Model RNG k-ε*, *Model Realizable k-ε*, *Model Standard k-ω*, *Model Shear-Stress Transport* (SST) *k-ω*, *Model Reynolds Stress*[12].

2. METODE DAN BAHAN

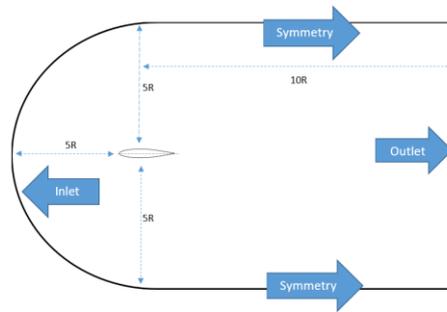
Proses simulasi pada penelitian ini dilakukan secara dua tahap. Tahap pertama melakukan simulasi dengan satu sudu, dengan tujuan untuk mengetahui karakteristik geometri airfoil yang dibuat sesuai dengan data eksperimen dan untuk mengetahui sudut serang airfoil yang optimum. Sedangkan untuk tahap kedua dilakukan untuk mengetahui kinerja turbin menggunakan dua sudu dan tiga sudu. Bentuk airfoil yang digunakan untuk kedua tahap ini menggunakan NACA 0015.

2.1 Metode Simulasi satu sudu

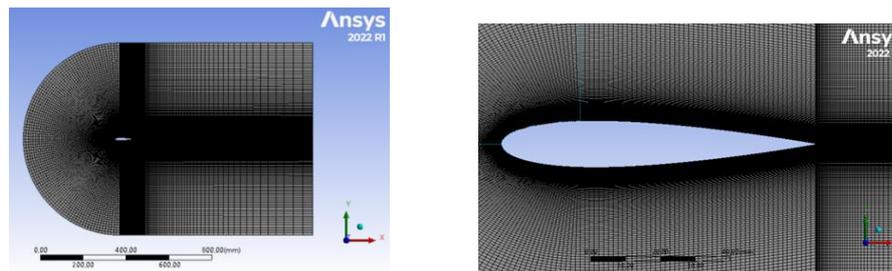
Langkah-langkah untuk simulasi satu sudu airfoil NACA 0015 adalah dengan pembuatan geometri seperti pada Gambar 53, penetapan *boundary condition* seperti pada Gambar 7 dan *mesh* yang digunakan pada simulasi airfoil ini adalah jenis *structured mesh*, menggunakan bentuk *tetrahedral* dengan jumlah *element mesh* 100.200 seperti pada Gambar 8.



Gambar 6: Geometri satu sudu



Gambar 7: *Boundary condition* satu sudu



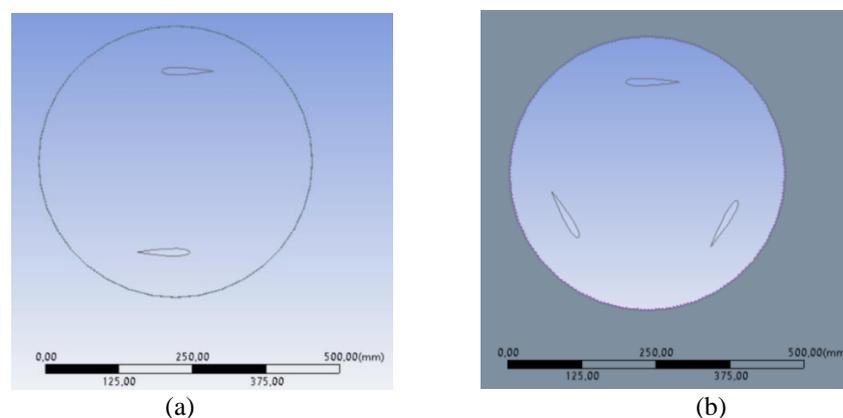
Gambar 8: *Structured mesh*

Skema simulasi satu sudu adalah menggunakan variasi *Angle of Attack (AoA)* dan *Reynold Number (Re)* rendah. Hasil yang didapatkan dari simulasi berupa nilai *Coefficient Lift (CL)* dari airfoil untuk selanjutnya divalidasi dengan data eksperimen yaitu menggunakan *NACA report No. 586*. [13]

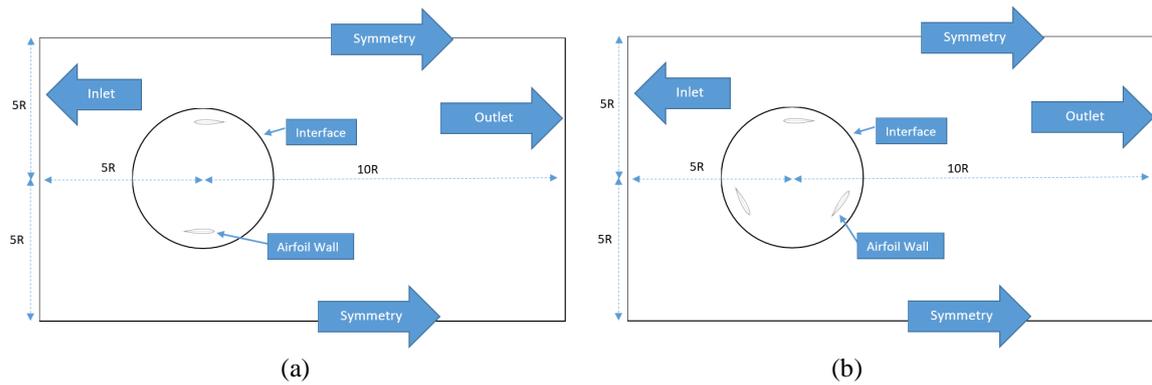
Pada simulasi ini, *solver* yang digunakan adalah *pressure-based* pada kondisi *steady*. *Viscous model* yang digunakan adalah model *Spalart-Allmaras*, material yang digunakan adalah udara (*air*). Pada pengaturan *velocity inlet*, *velocity magnitude (m/s)* adalah parameter kecepatan angin yang akan digunakan dalam simulasi. Untuk menentukan parameter *angle of attack* yang akan digunakan, dengan mengatur fungsi dari *X-component* dan *Y-component*, *X-component* merupakan fungsi *cosinus* dari *angle of attack* ($\cos \alpha$), sedangkan *Y-component* merupakan fungsi *sinus* dari *angle of attack* ($\sin \alpha$). [10] Pengaturan *boundary condition* pada *wall*, untuk *wall motion* dipilih *stationary wall*, *shear condition no slip*, dan *roughness models standard*.

2.2 Metode Simulasi 2 (dua) dan 3 (tiga) sudu turbin angin

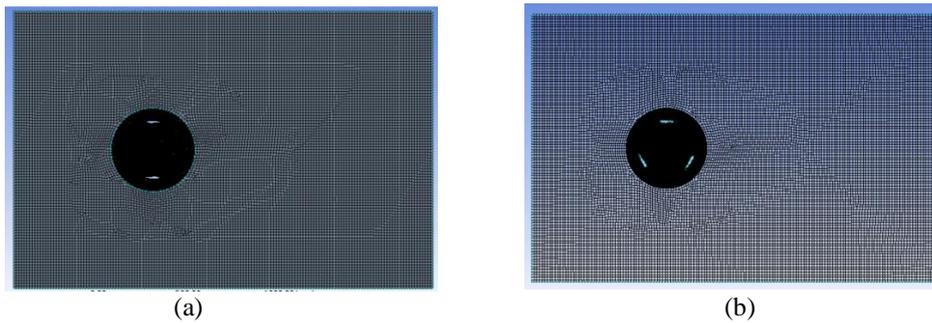
Metode yang digunakan untuk simulasi sudu turbin angin adalah dengan menggunakan simulasi dua dimensi. Sudu turbin angin yang telah dirancang menggunakan bentuk dasar airfoil NACA 0015. Langkah-langkah untuk simulasi satu sudu airfoil NACA 0015 adalah membuat geometri turbin dua dimensi sesuai ukuran yang direncanakan seperti pada gambar 9. Penetapan *boundary condition* yang terdiri dari domain *inlet*, *symmetry*, *outlet*, *interface*, *rotating*, *stationary* dan seperti pada Gambar 10. *Mesh* yang digunakan pada simulasi airfoil ini adalah tipe *unstructured mesh*, metode *meshing quadrilateral* dan *mesh* diatur agar area *rotating* lebih padat dan halus dari *stationary* seperti pada gambar 11 dan gambar 12.



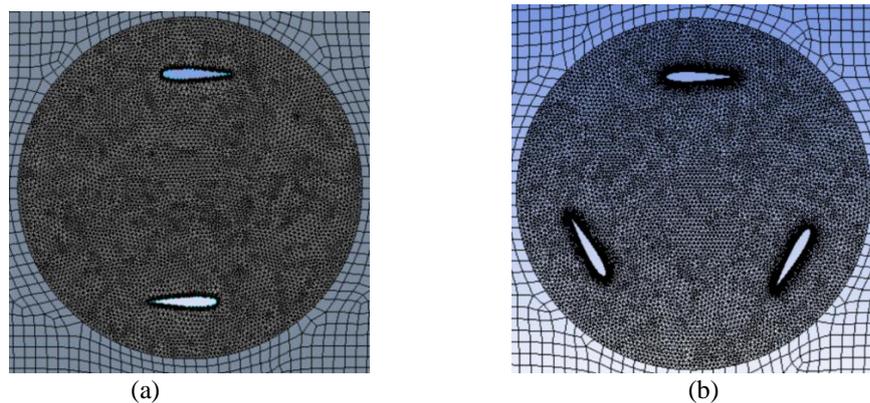
Gambar 9: Geometri (a) dua sudu dan (b) tiga sudu



Gambar 10. Boundary condition (a) dua sudu dan (b) tiga sudu



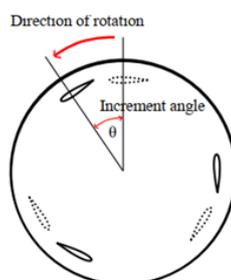
Gambar 11. Unstructured mesh (a) dua sudu dan (b) tiga sudu



Gambar 12. Rotating domain (a) dua sudu, (b) tiga sudu, (c)

Skema simulasi satu sudu adalah menggunakan variasi kecepatan angin dengan nilai TSR tetap. Pengaturan persamaan pada simulasi dilakukan idealisasi pada masalah-masalah fisik yang ada, diantaranya Fluida udara merupakan aliran *incompressible*, kondisi aliran adalah *transient*, perpindahan suhu diabaikan, kecepatan angin diasumsikan arahnya merata. Hasil yang didapatkan dari simulasi berupa nilai *Coefficient moment* (C_m) yang digunakan untuk menghitung nilai koefisien daya (C_p), daya (P) dan efisiensi turbin, Kemudian akan dibandingkan kinerja dari TASV dua sudu dengan tiga sudu.

Pada simulasi ini menggunakan teknik Sliding Mesh. Solver yang digunakan adalah *pressure-based* pada kondisi aliran *transient*. *Viscous model* yang digunakan adalah model *k-omega* (2 equation) SST, material yang digunakan adalah udara (air). Perhitungan komputasi akan dilakukan pada setiap posisi derajat putaran turbin. Jumlah iterasi yang telah ditentukan akan dihitung pada setiap posisi rotasi sampai selesai atau sampai mencapai kriteria konvergensi. *Time Step Size* (TSS) diwakili oleh *sudut increment* (θ) untuk setiap putaran langkah. Pada simulasi ini *time step* yang diinginkan adalah waktu untuk sudu/blade menempuh sudut 5° . *Number Time Step* (NTS) mewakili total putaran turbin atau berapa banyak putaran turbin yang akan disimulasikan[14]. Menimbang model dan *mesh* yang telah dibuat juga kriteria konvergensi yang telah ditentukan maka pada simulasi ini diberikan maksimum iterasi sebanyak 50, kalkulasi akan berhenti jika iterasi yang telah dilakukan mencapai angka 50, lalu secara otomatis akan dilanjutkan kalkulasi pada *time step* berikutnya



Gambar 13. Time step size untuk satu rotasi penuh[14]

TSS dihitung dengan persamaan berikut:

$$TSS = \frac{N}{\omega \cdot 0.15915 \times NTS}$$

NTS dihitung dengan persamaan berikut:

$$NTS = N \frac{N360}{\theta}$$

dimana N adalah jumlah rotasi, θ adalah sudut increment atau derajat putaran langkah waktu, ω adalah kecepatan putaran turbin (rad/s), 0,15915 adalah sebuah konstanta untuk mengubah satuan rad/s menjadi satuan rot/s [14].

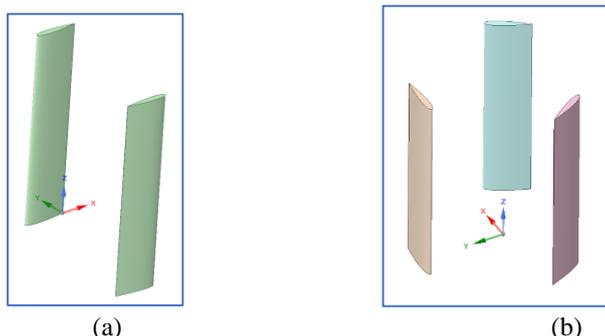
2.3 Alat

Laptop *Dell Latitude 5420*, Processor *11th Gen Intel(R) Core™ i7-1165G7 @ 2.80Ghz (8 CPUs)*, ~1.7Ghz, RAM *16GB DDR4*, VGA *Intel Iris (Xe) Graphics*, digunakan untuk proses simulasi turbin angin satu sudu. Personal computer *Dell Optiplex 7490 AIO*, Processor *11th Gen Intel(R) Core™ i7-1170 @ 2.50Ghz (16 CPUs)*, ~2.5Ghz, RAM *16GB DDR4*, VGA *Intel Iris UHD Graphics Family*, VGA *NVIDIA GeForce GTX 1650 Ti*, digunakan untuk proses simulasi turbin angin dua dan tiga sudu.

2.4 Bahan

Tabel 2. Konfigurasi dimensi turbin angin

Tinggi Rotor	0.39 m
Diameter Rotor	0.31 m
Profil Sudu	NACA 0015
Jumlah Sudu	2 dan 3
Panjang Chord	0.09 m
Area Sapuan	0.11 m ²



Gambar 14. Geometri (a) TASV dua sudu, (b) TASV tiga sudu

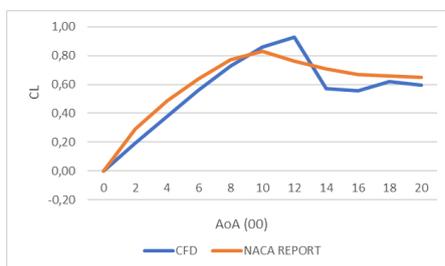
3. HASIL DAN DISKUSI

3.1. Simulasi Turbin Angin Satu Sudu

Jumlah meshing yang digunakan pada simulasi satu sudu menggunakan 100.200 element mesh. Parameter kondisi dalam simulasi airfoil menggunakan *Reynold Number (Re)* 42900, dengan tujuan untuk kemudahan dalam perbandingan data hasil simulasi dengan *NACA Report No.586*. Verifikasi yang ditinjau adalah nilai koefisien angkat pada sudut serang 0° hingga 20° dengan interval 2°. [15] Nilai koefisien lift ini dicari untuk melihat seberapa besar nilai error yang dihasilkan. Berikut data hasil verifikasi yang terdapat pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai CL hasil simulasi dengan NACA Report No. 586

AoA (0°)	Cl		
	CFD	NACA Report	% error
0	0,00	0,00	-
2	0,193	0,29	33,38%
4	0,383	0,49	21,89%
6	0,563	0,64	11,96%
8	0,727	0,77	5,57%
10	0,860	0,83	-3,57%
12	0,929	0,76	-22,25%
14	0,572	0,71	19,40%
16	0,556	0,67	17,03%
18	0,619	0,66	6,23%
20	0,595	0,65	8,45%
	Rata-rata		9,81%



Gambar 15. Grafik Nilai CL hasil simulasi dengan NACA Report No. 586

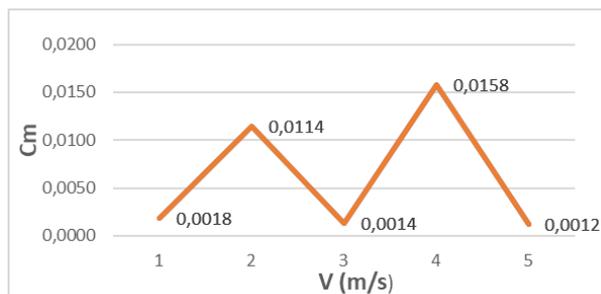
Simulasi CFD yang dilakukan saat ini terbukti mampu menunjukkan perilaku yang hampir sama dibandingkan hasil ekperimental, namun perbedaan antara hasil simulasi tidak berbeda jauh dengan hasil eksperimental. Persentase *error* yang ditunjukkan pada Tabel 3 dan Gambar 15. Grafik Nilai CL hasil simulasi dengan NACA Report No. 586. Gambar 15 menunjukkan hasil yang sesuai yaitu kurang dari 10%, sehingga simulasi pada airfoil NACA 0015 ini cukup sesuai dengan kondisi aktualnya, dan dapat disimpulkan bahwa hasil numerik ini dapat dijadikan acuan untuk penelitian ini.

3.2. Simulasi turbin angin model dua sudu dengan variasi kecepatan angin

Jumlah meshing yang digunakan pada simulasi satu sudu menggunakan 33420 element mesh, TSR=1,31 dan variasi kecepatan yaitu 1, 3, 5, 8, 10 m/s. *Number of Rotation (N)* ditentukan 6 dan *increment angle* 5° sehingga didapatkan nilai *Number Time Step (NTS)* 432[14].

Tabel 4. Skema Simulasi dua sudu

TSR	Kecepatan Angin (m/s)	Kecepatan Putar (rad/s)	Number Time Step	Time Step Size
1,31	1	8,452	432	0,01
	3	25,355		0,003
	5	42,258		0,002
	8	67,613		0,001
	10	84,516		0,001

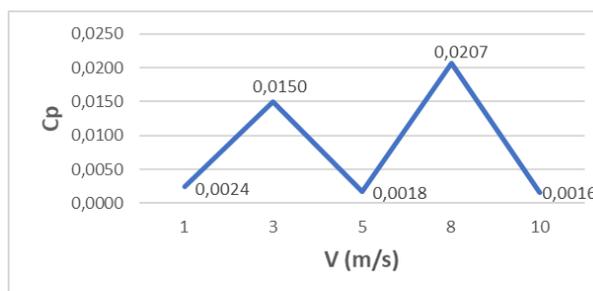


Gambar 16. Grafik Kecepatan angin terhadap Coefficient moment

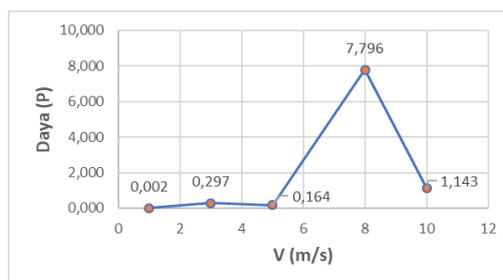
Dari hasil simulasi CFD didapatkan grafik *coefficient moment* yang variatif pada TSR 1,31 dan variasi kecepatan. Dari Gambar 16 menunjukkan pada kecepatan 1 m/s, 3 m/s dan 10 m/s C_m yang dihasilkan relatif kecil dan memiliki nilai hampir sama. Harga C_m yang paling tinggi terjadi pada kecepatan angin 8 m/s di ikuti kecepatan angin 3 m/s.

Tabel 5. Perhitungan Nilai C_p dan Power

v (m/s)	C_m	C_p	Pa	Pt
1	0,0018	0,0024	0,735	0,002
3	0,0114	0,0150	19,845	0,297
5	0,0014	0,0018	91,875	0,164
8	0,0158	0,0207	376,320	7,796
10	0,0012	0,0016	735,000	1,143



Gambar 17. Grafik Kecepatan angin terhadap *Coefficient Power* (C_p)

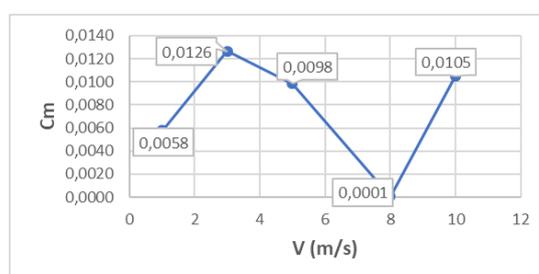


Gambar 18: Grafik Kecepatan angin terhadap Daya (P)

Dari Tabel 5 dan Gambar 17 menunjukkan bahwa TASV 2 (dua) sudu pada kecepatan angin 8 m/s memiliki nilai C_p paling tinggi yaitu 2% dan daya yang dihasilkan 7,796 watt diikuti kecepatan angin 3 m/s dengan nilai C_p 1,5 % dan daya yang dihasilkan 0,296 watt.

Dari Gambar 17 dan Gambar 18 menunjukkan nilai C_p pada kecepatan angin 3 m/s lebih besar dari kecepatan angin 10 m/s namun daya yang dihasilkan kecepatan angin 10 m/s lebih tinggi dari kecepatan angin 3 m/s. Hal ini dipengaruhi oleh daya angin dimana daya ini berbanding lurus dengan pangkat tiga kecepatannya.

3.3. Simulasi turbin angin model tiga sudu dengan variasi kecepatan angin

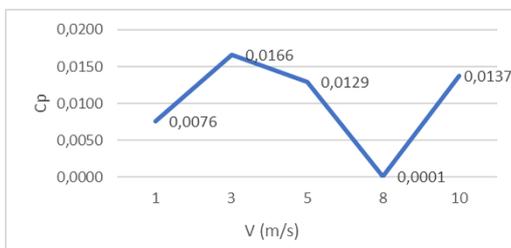


Gambar 19. Grafik Kecepatan angin terhadap *Coefficient moment*

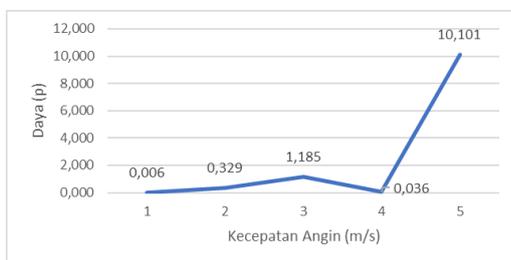
Dari hasil simulasi CFD didapatkan grafik *coefficient moment* yang variatif pada TSR 1,31 dan variasi kecepatan. Dari Gambar 19 di atas menunjukkan pada kecepatan 8 m/s, nilai C_m yang dihasilkan paling kecil. Harga C_m yang paling tinggi terjadi pada kecepatan angin 3 m/s di ikuti kecepatan angin 10 m/s dan 5 m/s.

Tabel 6. Perhitungan Nilai Cp dan Power

v (m/s)	Cm	Cp	Pa	Pt
1	0,0058	0,0076	0,735	0,006
3	0,0126	0,0166	19,845	0,329
5	0,0098	0,0129	91,875	1,185
8	0,0001	0,0001	376,320	0,036
10	0,0105	0,0137	735,000	10,101



Gambar 20. Grafik Kecepatan angin terhadap Coefficient Power (Cp)

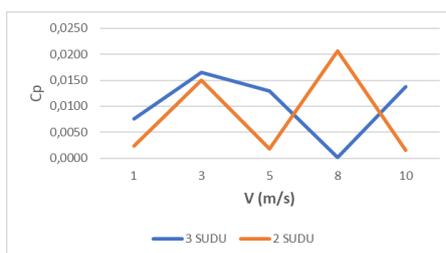


Gambar 21. Grafik kecepatan angin terhadap Daya (P)

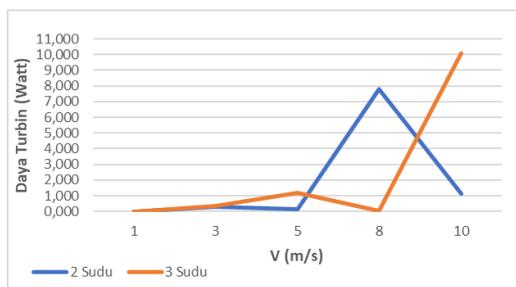
Dari Tabel 6 dan Gambar 20 menunjukkan bahwa TASV 3 sudu pada kecepatan angin 3 m/s memiliki nilai Cp paling tinggi yaitu 1,6% dan daya yang dihasilkan 0,329 watt diikuti kecepatan angin 10 m/s dengan nilai Cp 1,3 % dan daya yang dihasilkan 10,101 watt. Dari Gambar 20 dan Gambar 21 menunjukkan nilai Cp pada kecepatan angin 3 m/s lebih besar dari kecepatan angin 10 m/s namun daya yang dihasilkan kecepatan angin 10 m/s lebih tinggi dari kecepatan angin 3 m/s. Hal ini dipengaruhi oleh daya angin dimana daya ini berbanding lurus dengan pangkat tiga kecepatannya.

3.3. Perbandingan TASV 2 (dua) sudu dengan TASV 3 (tiga) sudu

Dari hasil simulasi TASV dua dan tiga sudu diatas, hasil nya akan dibandingkan satu sama lain. Untuk mengetahui coefficient power dan daya turbin yang paling efektif



Gambar 22. Grafik kecepatan angin terhadap Cp



Gambar 23. Grafik kecepatan angin terhadap Cp

Dari Gambar 22 menunjukkan pada kecepatan angin 1,3,5, dan 10 m/s nilai C_p pada konfigurasi tiga bilah sudu lebih besar dibandingkan konfigurasi dua bilah sudu. Namun pada kecepatan 8 m/s konfigurasi 3 bilah sudu lebih kecil dibandingkan konfigurasi 2 bilah sudu.

Pada skala beaufort, dengan nilai skala dibawah 4 (kecepatan angin dibawah 5,5 m/s) konfigurasi TASV H-darrieus lebih cocok menggunakan 3 bilah sudu. Namun untuk nilai skala 5 (kecepatan angin 8 m/s) konfigurasi TASV H-darrieus lebih cocok menggunakan 2 bilah sudu. Pada kecepatan angin diatas gedung perkantoran (3 m/s) daya turbin yang dihasilkan sebesar 0.329 watt pada konfigurasi 3 bilah sudu.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa kinerja Turbin Angin Sumbu Vertikal tipe H-Darrieus straight blade dengan sudu NACA 0015 dengan menggunakan CFD memiliki nilai coefficient power (C_p) maksimum sebesar 0.02 pada kecepatan 8 m/s dengan konfigurasi 2 (dua) bilah sudu. Pada kecepatan angin 1, 3, 5, dan 10 m/s konfigurasi 3 (tiga) bilah sudu memiliki nilai C_p yang lebih besar dibandingkan dengan konfigurasi 2 (dua) buah sudu, namun pada kecepatan angin 8 m/s konfigurasi 2 bilah sudu memiliki nilai C_p yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi 3 (tiga) sudu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Kumar, K. Raahemifar, and A. S. Fung, "A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 89, no. March, pp. 281–291, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.033.
- [2] F. A. Didik Notosudjono, *Teknologi Energi Terbarukan*. Bogor: Unpak Press.
- [3] F. Kanyako and I. Janajreh, "Numerical Investigati/on of Four Commonly Used Airfoils for Vertical Axis Wind Turbine," pp. 443–454, 2014, doi: 10.1007/978-3-319-05708-8_35.
- [4] J. Alberto and G. Campos, "Design and Experimentation of Darrieus," pp. 1–9, 2020.
- [5] B. R. Munson, D. F. Young, T. H. Okiishi, and W. W. Huebsch, "Elementary Fluid Dynamics - The Bernoulli Equation," *Fundam. Fluids Mech.*, pp. 93–146, 2009, [Online]. Available: http://civilcafe.weebly.com/uploads/2/8/9/8/28985467/fluid_mechanics.pdf
- [6] E. Herter, *Wind turbine*. 1979.
- [7] S. Susilo, B. Widodo, E. Magdalena Silalahi, and A. Priyono, "Pengaruh Jumlah Bilah dan Sudut Pasang terhadap Daya Turbin Angin Poros Vertikal Tipe H-Darrieus Termodifikasi sebagai Energi Alternatif Pembangkit Tenaga Listrik Skala Rumah Tangga," *J. Energi Dan Manufaktur*, vol. 12, no. 2, p. 92, 2019, doi: 10.24843/jem.2019.v12.i02.p08.
- [8] S. Yerikho, "Unjuk Kerja Kincir Angin Poros Horizontal 2 sudu Diameter 1 Meter dengan Lebar Maksimum 10 cm dari Pusat Poros," pp. 1–96, 2016.
- [9] E. Nur Fridayana, "Aerodynamic Performance Analysis of Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) Darrieus Type H-Rotor using Computational Fluid Dynamics (CFD) Approach," 2018.
- [10] G. Natayuda, "Analisa Aerodinamika dan Kinerja Turbin Angin Tipe Sumbu Horizontal Menggunakan Computational Fluid Dynamics," *Univ. Jendral Achmad Yani*, no. September 2017, 2017, doi: 10.13140/RG.2.2.36558.15689.
- [11] "ANSYS FLUENT User ' s Guide," no. January, 2021.
- [12] A. Shourangiz-Haghighi, M. A. Haghnegahdar, L. Wang, M. Mussetta, A. Kolios, and M. Lander, "State of the Art in the Optimisation of Wind Turbine Performance Using CFD," *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 27, no. 2, pp. 413–431, 2020, doi: 10.1007/s11831-019-09316-0.
- [13] E. N. Jacobs and A. Sherman, "Airfoil section characteristics as affected by variations of the Reynolds number," *Tech. rep., Washington. D.C Natl. Advis. Comm. Aeronaut.*, no. 586, pp. 227–259, 1939.
- [14] D. Satrio, I. Ketut Aria Pria Utama, and Mukhtasor, "The influence of time step setting on the CFD simulation result of vertical axis tidal current turbine," *J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 12, no. 1, pp. 3399–3409, 2018, doi: 10.15282/jmes.12.1.2018.9.0303.
- [15] İ. Şahin and A. Acir, "Numerical and Experimental Investigations of Lift and Drag Performances of NACA 0015 Wind Turbine Airfoil," *Int. J. Mater. Mech. Manuf.*, vol. 3, no. 1, pp. 22–25, 2015, doi: 10.7763/ijmmm.2015.v3.159.