

Analisis pengaruh tinggi bilah terhadap performa dengan *airfoil* NACA 0012 pada turbin angin sumbu vertikal tipe *darrieus-H* di Jawa Barat

Raditya Elfa Pratama, Marno, Aripin

Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang
Jl. HS. Ronggo Waluyo, Telukjambe Timur, Karawang 41361
Email korespondensi: 1810631150114@student.unsika.ac.id

Abstrak

Turbin angin yang memiliki performa terbaik untuk daerah perkotaan dengan perawatan yang mudah yaitu Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV) Darrieus-H. Tujuan dari kajian ini yaitu untuk mengetahui karakteristik *airfoil* NACA 0012, mengetahui pengaruh tinggi bilah terhadap performa TASV dan mendapatkan rancangan desain bilah yang optimum. Metode yang digunakan dalam kajian ini yaitu metode simulasi dan analisis. Simulasi dan analisis yang dilakukan menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel untuk mengolah data, Rotor DMS Simulation pada Qblade untuk mengetahui karakteristik *airfoil* dan menganalisis performa turbin angin serta Ansys FLUENT untuk mengetahui aliran fluida yang terjadi pada bilah. Pada kajian ini dengan kondisi daerah di Jawa Barat memiliki kecepatan angin rata-rata 6,83 m/s dan kecepatan angin maksimal 10 m/s, dilakukan simulasi dan analisis dengan beberapa variasi tinggi mendapatkan hasil bahwa bilah Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV) Darrieus-H memiliki Coefficient Power (C_p) maksimum yang sama yaitu sebesar 73% pada TSR 4,5. Dalam kajian juga digunakan generator 300 W, didapatkan tinggi bilah yang optimum dengan desain 0,7 – 1,1 meter, dengan daya yang dihasilkan sebesar 99,8 – 492 W, torsi sebesar 1,72 – 5,80 Nm pada kecepatan putar rotor sebesar 55,05 – 85 rad/s.

Kata kunci: turbin angin sumbu vertikal, darrieus-H, bilah, *airfoil*, NACA 0012.

Abstract

The wind turbine that has the best performance for urban areas with easy maintenance is the Darrieus-H Vertical Axis Wind Turbine (TASV). The purpose of this study was to determine the characteristics of the NACA 0012 *airfoil*, to determine the effect of blade height on TASV performance, and to obtain the optimum blade design. The method used in this research is the simulation and analysis method. Wind turbine simulations and analysis were carried out using Microsoft Excel software to process data, Rotor DMS Simulation on Qblade to determine *airfoil* characteristics and analyze wind turbine performance, and Ansys FLUENT to determine fluid flow that occurs in the blades. In this study, with regional conditions in West Java having an average wind speed of 6.83 m/s and a maximum wind speed of 10 m/s, simulations and analysis with several variations in height obtained the results that the Darrieus Vertical Axis Wind Turbine (TASV) blade H has the same maximum Coefficient Power (C_p), which is 73% at a TSR of 4.5. In the study, also with a 300 W generator, the optimum blade height was obtained, which has a design of 0.7–1.1 meters with a power generated of 99.8–492 W with a torque of 1.72–5.80 Nm at a rotor rotational speed of 55.05–85 rad/s.

Keywords: vertical axis wind turbine, darrieus-H, blade, *airfoil*, NACA 0012.

1. Pendahuluan

Listrik merupakan salah satu kebutuhan di kehidupan pada masa kini. Seiring berjalannya waktu, permintaan akan energi listrik dari masyarakat selalu meningkat dibandingkan dengan jenis energi lainnya. Pada tahun 2021, konsumsi listrik di Indonesia semakin meningkat sejak tahun 2015 dan menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) pada kuartal III 2021 mencapai 1.109 kWh per kapita [1],[2].

Pertumbuhan listrik dipastikan akan naik setiap tahunnya. Sesuai dengan PP No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional Pemerintah memiliki target bauran energi baru terbarukan (EBT) mencapai 23% pada tahun 2025 dan 31% pada 2050. Menteri ESDM mengutarakan hingga akhir 2021

bauran energi terbarukan telah mencapai 11,7% [3]-[5]. Minimnya pengembangan serta pemanfaatan EBT masih relatif tinggi dikarenakan sulit bersaing dengan pembangkit listrik yang berbahan bakar fosil seperti batu bara dan kurang mendapat dukungan industri dalam pendanaan hingga pengembangan EBT di Indonesia.

Indonesia memiliki potensi yang cukup besar untuk mengembangkan teknologi energi baru terbarukan. Salah satu EBT yang memiliki potensi yang cukup besar dan dapat dimanfaatkan yaitu angin. Kecepatan angin rata-rata di Indonesia pada daerah *onshore* sebesar 6-8 m/s dan *offshore* >8 m/s [6]. Pada tahun 2021, potensi energi angin pada siku-siku atap gedung tinggi memiliki potensi yang cukup besar [7]-[10]. Kecepatan rata-rata angin pada tempat tersebut sebesar 2,5 m/s dengan kecepatan maksimal angin

sebesar 4,7 m/s. Potensi energi angin di Indonesia dapat dimaksimalkan untuk mencapai bauran EBT yang ditetapkan oleh pemerintah.

Turbin angin adalah alat yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik dengan memanfaatkan energi angin. Karakteristik angin dapat mempengaruhi performa dari turbin salah satunya pada komponen bilah turbin itu sendiri. Bilah merupakan salah satu komponen terpenting dalam hal melakukan perancangan turbin angin. Bilah berfungsi untuk menangkap energi angin dan mengubahnya menjadi energi mekanik berupa putaran poros lalu disalurkan menuju generator yang kemudian di konversi menjadi energi listrik.

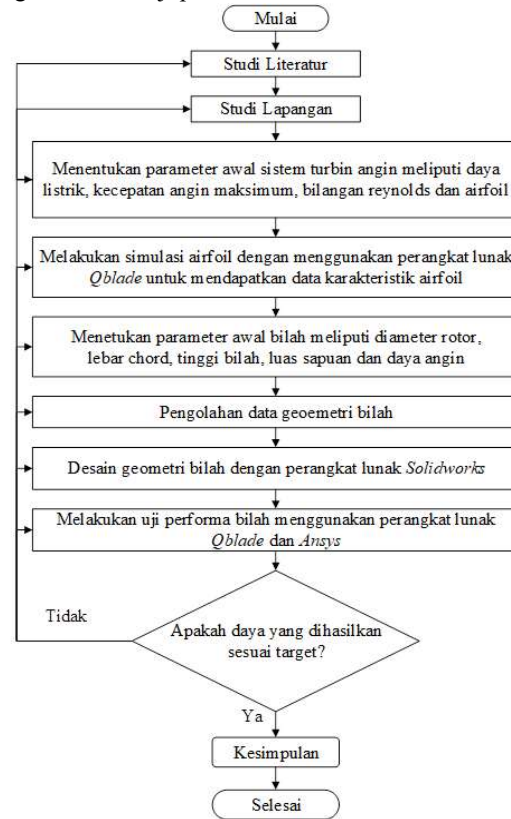
Pada tahun 2019 dengan melakukan rancang bangun turbin angin tipe *darrieus* dengan menggunakan *airfoil* NACA 0006 dan NACA 0018 [11]. Desain turbin angin yang digunakan yaitu dengan diameter rotor berukuran 0,5 m dan tinggi bilah 0,7 m. Hasil pengujian yang didapatkan yaitu bahwa dengan tiga sudut tunggal menggunakan *airfoil* NACA 0018, didapatkan efisiensi sistem sebesar 0,1548 atau 15,48% pada kecepatan angin maksimal 12 m/s. Pada turbin angin tipe *darrieus* dengan tiga sudu rangkap, tiga menggunakan *airfoil* NACA 0006, didapatkan efisiensi sistem sebesar 0,0476 atau 4,76% pada kecepatan angin maksimal 12 m/s. Kajian pada turbin angin tipe *darrieus-H* menggunakan *airfoil* NACA 3412 dengan diameter rotor 40 mm, panjang chord 70 mm, dan tinggi bilah 500 mm didapatkan sebesar 3,62 W pada kecepatan angin maksimal 5 m/s [12]. Kajian yang bertujuan untuk mengimplementasi daya listrik yang dihasilkan oleh turbin angin tipe *darrieus-H* dengan *airfoil* NACA 4412 [13]. Pada kajian yang dilakukan menggunakan desain turbin angin dengan diameter rotor sebesar 350 mm, dan ketinggian rotor 1.050 mm pada kecepatan angin rata-rata sebesar 2,1 m/s. Daya listrik yang dihasilkan sebesar 1.908 Wh mampu untuk bertahan 12 jam di dalam akumulator sebesar 24 V/50 Ah dan menyalakan dua buah lampu LED 40 W/8-24 VDC dan pemakaian beban sebesar 1.104 Wh [14]-[17].

Berdasarkan hal itu, pada perancangan bilah terdapat kesalahan dalam pemilihan dimensi bilah, sehingga mempengaruhi performa turbin angin, sehingga kajian untuk mengetahui pengaruh tinggi bilah pada turbin angin sumbu vertikal tipe *darrieus-H* menggunakan software Microsoft Excel untuk pengolahan data, Q-Blade untuk analisis karakteristik *airfoil* dan performa turbin angin dilakukan. Kemudian menggunakan SolidWorks untuk mendapatkan gambar teknik dalam bentuk 2D dan 3D dan Ansys FLUENT untuk analisis aliran fluida [18]-[20].

2. Metode

Metode yang digunakan pada kajian ini yaitu metode simulasi dan analisis dengan bantuan perangkat lunak.

Perangkat lunak yang digunakan adalah Microsoft Excel, Q-Blade, Ansys dan SolidWorks. Adapun diagram alir tersaji pada Gambar 1 berikut.




Gambar 1. Diagram alir.


3. Hasil dan Pembahasan

Pada kajian ini, data kecepatan angin yang diambil yaitu di daerah Jawa Barat pada Tahun 2021. Data kecepatan angin diambil sesuai dengan pengukuran yang dilakukan oleh BMKG pada 4 stasiun yaitu Stasiun Klimatologi Bogor, Stasiun Geofisika Bandung, Stasiun Meteorologi Citeko, dan Stasiun Meteorologi Kertajati [20]. Kecepatan angin maksimal dan kecepatan angin rata-rata setiap stasiun ditunjukkan pada Tabel 1-Tabel 4 berikut ini.


Tabel 1. Data kecepatan angin di stasiun geofisika bandung tahun 2021.

	ID WMO	: 96783
	Nama Stasiun	: Stasiun Geofisika Bandung
	Lintang	: -6.88356
	Bujur	: 107.59733
	Elevasi	: 791
Bulan	Kec. Angin Maksimal (m/s)	Kec. Angin Rata-Rata (m/s)
Januari	8	4
Februari	9	4
Maret	7	3
April	8	5
Mei	7	2
Juni	5	2
Juli	6	3
Agustus	6	3
September	5	3
Oktober	5	2
November	5	2
Desember	6	3


Tabel 2. Data kecepatan angin di stasiun klimatologi bogor tahun 2021.

	ID WMO	: 96753
	Nama Stasiun	: Stasiun Klimatologi Bogor
	Lintang	: -6.50000
	Bujur	: 106.75000
	Elevasi	: 207
Bulan	Kec. Angin Maksimal (m/s)	Kec. Angin Rata-Rata (m/s)
Januari	5	2
Februari	6	2
Maret	8	2
April	11	2
Mei	9	2
Juni	7	2
Juli	7	2
Agustus	9	2
September	18	2
Oktober	18	2
November	11	2
Desember	11	2

Tabel 3. Data kecepatan angin di stasiun meteorologi citeko tahun 2021.

	ID WMO	: 96751
	Nama Stasiun	: Stasiun Meteorologi Citeko
	Lintang	: -6.70000
	Bujur	: 106.85000
	Elevasi	: 920
Bulan	Kec. Angin Maksimal (m/s)	Kec. Angin Rata-Rata (m/s)
Januari	4	2
Februari	6	2
Maret	5	1
April	5	1
Mei	5	1
Juni	11	1
Juli	5	2
Agustus	4	1
September	5	1
Oktober	4	1
November	12	1
Desember	5	2

Tabel 4. Data kecepatan angin di stasiun meteorologi kertajati tahun 2021.

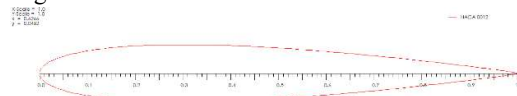
	ID WMO	: 96791
	Nama Stasiun	: Stasiun Meteorologi Kertajati
	Lintang	: -6.73440
	Bujur	: 108.26300
	Elevasi	: 85
Bulan	Kec. Angin Maksimal (m/s)	Kec. Angin Rata-Rata (m/s)
Januari	6	2
Februari	5	1
Maret	4	1
April	5	1
Mei	3	1
Juni	4	1
Juli	5	2
Agustus	8	2
September	6	3
Oktober	5	2
November	5	1
Desember	5	2

Dari data hasil pengukuran kecepatan pada keempat stasiun BMKG yang berada di Jawa Barat mulai Bulan Januari hingga Bulan Desember, maka didapatkan hasil rekapitulasi rata-rata kecepatan angin maksimal dan kecepatan angin rata-rata pada Tahun 2021 tersaji pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Rekapitulasi kecepatan angin di Jawa Barat pada tahun 2021.

No	Nama Stasiun	Kec. Angin Maksimal (m/s)	Kec. Angin Rata-rata (m/s)
1	Stasiun Klimatologi Bogor	10,00	2
2	Stasiun Geofisika Bandung	6,42	5
3	Stasiun Meteorologi Citeko	5,92	2
4	Stasiun Meteorologi Kertajati	5,00	2
Rata-rata		6,83	2,75
Tertinggi		10,00	5,00
Terendah		5,00	2,00

Pada perancangan suatu bilah turbin angin sumbu vertikal, langkah awalnya yaitu berupa pemilihan *airfoil*. Pada kajian ini, tipe *airfoil* yang digunakan yaitu NACA 0012 (Gambar 2). Pada tahapan ini dilakukan analisis karakteristik *airfoil* menggunakan *software* Q-Blade [21]-[23]. Karakteristik yang dianalisis dari *airfoil* yaitu grafik perbandingan *coefficient lift* dan *coefficient drag* terhadap *angle of attack* ($Cl/Cd - \alpha$) serta grafik *coefficient lift* terhadap *angle of attack* ($Cl - \alpha$). Tujuan pada tahapan ini yaitu untuk menganalisis kecenderungan yang terjadi pada *airfoil* ketika adanya gaya angkat dan hambatan dari angin.



Gambar 2. Geometri airfoil NACA 0012.

Analisis karakteristik *airfoil* menggunakan *software* Q-Blade dengan metode *XFOIL Direct Analysis*.

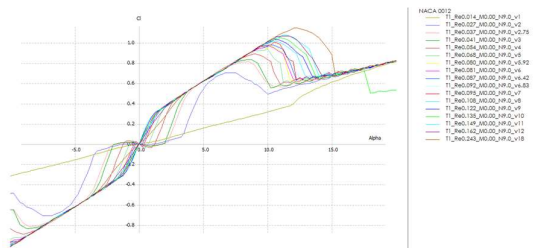
Tahapan sebelum dilakukan analisis *airfoil* yaitu melakukan perhitungan bilangan Reynolds pada setiap kecepatan angin yang ada. Perhitungan bilangan Reynolds mulai dari kecepatan angin 1 m/s sampai 10 m/s. dengan panjang *chord* 0,2 m dan viskositas kinematik sebesar $1,47923 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, maka dilakukan perhitungan dengan Persamaan (1), di mana hasil dari perhitungan tersaji pada Tabel 6.

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (1)$$

Tabel 6. Hasil perhitungan bilangan reynolds NACA 0012.

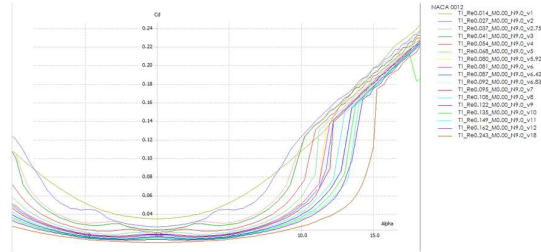
Kec. Angin (m/s)	Panjang Chord (m)	Viskositas Kinematik (m ² /s)	Bilangan Reynolds
1,00	0,20	1,47923E-05	13520,55
2,00	0,20	1,47923E-05	27041,10
2,75	0,20	1,47923E-05	37181,51
3,00	0,20	1,47923E-05	40561,64
4,00	0,20	1,47923E-05	54082,19
5,00	0,20	1,47923E-05	67602,74
5,92	0,20	1,47923E-05	80041,64
6,00	0,20	1,47923E-05	81123,29
6,42	0,20	1,47923E-05	86801,92
6,83	0,20	1,47923E-05	92345,34
7,00	0,20	1,47923E-05	94643,83
8,00	0,20	1,47923E-05	108164,38
9,00	0,20	1,47923E-05	121684,93
10,00	0,20	1,47923E-05	135205,48
11,00	0,20	1,47923E-05	148726,03
12,00	0,20	1,47923E-05	162246,57
18,00	0,20	1,47923E-05	243369,86

Setelah dilakukan perhitungan bilangan Reynolds pada setiap kecepatan udara, selanjutnya dilakukan analisis karakteristik *airfoil* NACA 0012. Hasil dari analisis akan menunjukkan nilai *Coefficient lift/Coefficient drag (Cl/Cd)*, *Coefficient lift (Cl)*, *Coefficient drag (Cd)* dan *Angle of Attack (α)* dari mulai kecepatan angin 1-18 m/s. Hasil dari analisis yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5



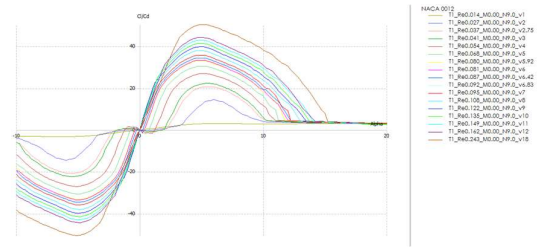
Gambar 3. Grafik Cl-α.

Dari grafik *Cl-α* di atas, dapat dilihat bahwa nilai *Cl* akan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya nilai dari sudut serang tersebut. Pada *airfoil* NACA 0012 memiliki nilai sudut serang maksimum yaitu 10°, karena pada saat melebihi nilai tersebut akan terjadi *stall*, sehingga nilai *Cl* tidak akan bertambah.



Gambar 4. Grafik Cd-α.

Dari grafik *Cd-α* di atas, dapat dilihat bahwa nilai *Cd* akan meningkat jikalau nilai sudut serang meningkat. Nilai *Cd* tidak akan bernilai 0 sekalipun pada sudut serang 0°, dikarenakan hambatan akan terus bekerja pada *airfoil*.



Gambar 5. Grafik Cl/Cd-α.

Dari grafik *Cl/Cd- α* di atas, dapat dilihat bahwa ketika nilai sudut serang (α) memiliki nilai negatif, maka nilai *Cl/Cd* pun akan rendah. Hal itu dikarenakan pada sudut serang bernilai negatif memiliki nilai *Cd* yang bekerja pada *airfoil* lebih besar dibandingkan nilai *Cl*, serta sudut serang optimum yang dimiliki oleh *airfoil* NACA 0012 berkisar 5-6,5°.

Adapun kesimpulan hasil analisis karakteristik *airfoil* dari grafik pada Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5 tersaji pada Tabel 7 berikut.

Tabel 7. Hasil analisis karakteristik airfoil NACA 0012.

Kec. Angin (m/s)	Bilangan Reynolds	α	Cl	Cd	Cl/Cd
1,00	13521	6,5	0,198	0,0649	3,15
2,00	27041	6	0,665	0,0459	14,47
2,75	37182	5	0,654	0,0316	20,71
3,00	40562	5,5	0,657	0,0295	22,33
4,00	54082	5,25	0,637	0,0237	26,95
5,00	67603	5	0,616	0,0202	30,47
5,92	80042	5	0,615	0,0185	33,15
6,00	81123	5	0,615	0,0184	33,36
6,42	86802	5	0,615	0,0179	34,42
6,83	92345	5	0,614	0,0174	35,41
7,00	94644	5	0,614	0,0171	35,78
8,00	108164	5	0,614	0,0162	37,92
9,00	121685	5	0,615	0,0155	39,77
10,00	135205	5	0,615	0,0148	41,40

11,00	148726	5	0,616	0,0144	42,87
12,00	162247	5	0,617	0,0140	44,22
18,00	243370	5	0,623	0,0124	50,32

Dapat diketahui dari Tabel 7 di atas, bahwa karakteristik *airfoil* NACA 0012 yakni nilai *Coefficient lift* (*Cl*) akan semakin meningkat, sedangkan *Coefficient drag* (*Cd*) semakin berkurang ketika kecepatan angin bertambah mulai dari kecepatan 1 m/s hingga 18 m/s, sehingga semakin tinggi kecepatan angin, maka semakin tinggi juga nilai dari *Coefficient lift/ Coefficient drag* (*Cl/Cd*). Pada *airfoil* NACA 0012 yang memiliki nilai *Cl/Cd* sebesar 50,32, nilai *Cl* sebesar 0,623, serta nilai *Cd* sebesar 0,0124 dengan sudut serang optimum yaitu 5° pada kecepatan angin maksimal 18 m/s.

Parameter awal yang ditentukan yaitu besar kapasitas daya listrik yang dibutuhkan. Kapasitas daya listrik ini ditentukan oleh generator, sehingga dapat mempengaruhi terhadap ukuran dan dimensi bilah. Dalam kajian ini, digunakan daya listrik minimal yang dihasilkan adalah sebesar 300 W dengan kecepatan angin rata-rata 6,83 m/s sebagai batas bawah dan kecepatan angin maksimal 10 m/s sebagai batas atas. Pada kajian ini untuk mengetahui pengaruh tinggi bilah terhadap performa turbin angin, maka dilakukan variasi tinggi bilah turbin angin mulai dari 0,3-1,5 m dengan diameter rotor turbin angin berukuran 1 meter. Perhitungan luas sapuan dan daya angin dengan Persamaan (2) sebagai berikut.

$$A = D \times h \tag{2}$$

Persamaan (2) menunjukkan bahwa *D* merupakan diameter rotor dan *h* adalah tinggi bilah.

Selanjutnya dilakukan perhitungan daya angin dengan Persamaan (3) berikut.

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

Parameter awal bilah dengan lengkap tersaji pada Tabel 8 dan Tabel 9 sebagai berikut.

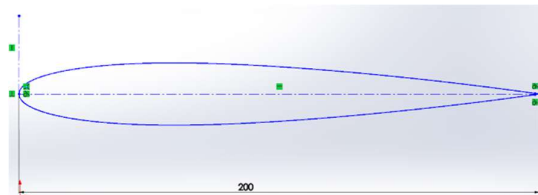
Tabel 8. Parameter awal bilah (*v* = 6,83 m/s).

Diameter (m)	Tinggi (m)	Luas Sapuan (m ²)	Daya Angin (Watt)
1	0,3	0,3	58,54
	0,5	0,5	97,57
	0,7	0,7	136,60
	0,9	0,9	175,63
	1,1	1,1	214,66
	1,3	1,3	253,69
	1,5	1,5	292,72

Tabel 9. Parameter awal bilah (*v* = 10 m/s).

Diameter (m)	Tinggi (m)	Luas Sapuan (m ²)	Daya Angin (Watt)
1	0,3	0,3	183,75
	0,5	0,5	306,25
	0,7	0,7	428,75
	0,9	0,9	551,25
	1,1	1,1	673,75
	1,3	1,3	796,25
	1,5	1,5	918,75

Pada tahap ini akan memuat gambar teknik menggunakan perangkat lunak SolidWorks, setelah didapatkan data hasil perhitungan geometri bilah. Data koordinat *airfoil* NACA 0012 diolah menggunakan Microsoft Excel, kemudian dimasukkan ke perangkat lunak SolidWorks serta parameter lainnya sesuai dengan parameter awal yang telah ditentukan. Hasil input ditunjukkan pada Gambar 6 berikut. Sketsa dalam 2D ditunjukkan pada Gambar 7, kemudian Gambar 8 menunjukkan desain 3D turbin angin yang digunakan dalam kajian ini.



Gambar 6. Hasil input data koordinat airfoil ke solidworks.



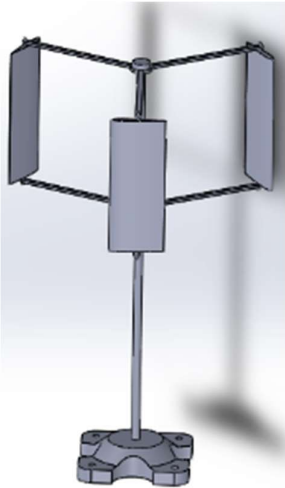
Gambar 7. Sketsa 2D TASV darrieus-H.



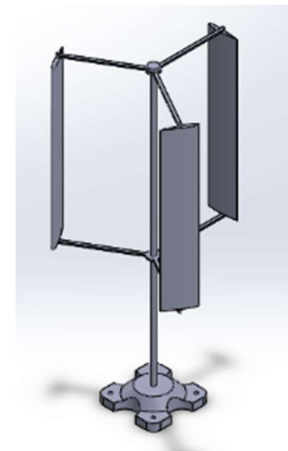
(a)



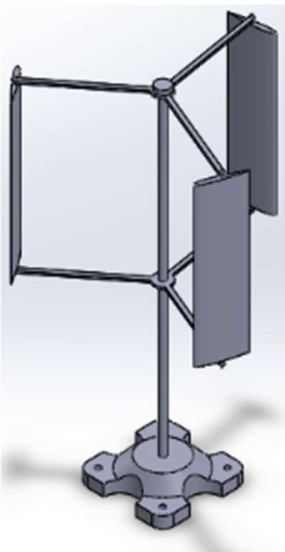
(d)



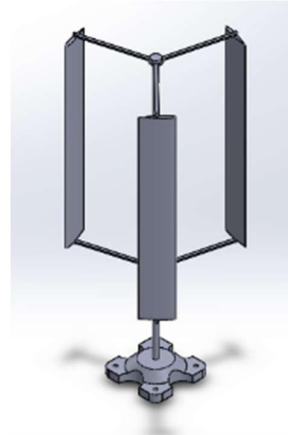
(b)



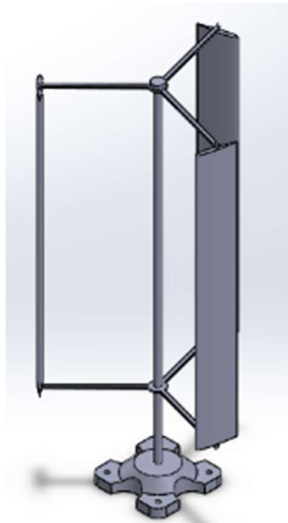
(e)



(c)



(f)

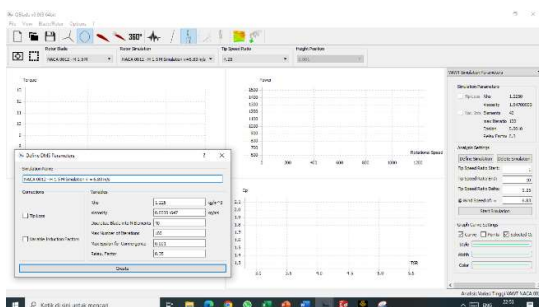


(g)

Gambar 8. Desain 3D TASV darrieus-H dengan variasi tinggi bilah (a) 0,3 m, (b) 0,5 m, (c) 0,7 m, (d) 0,9 m, (e) 1,1 m, (f) 1,3 m, dan (g) 1,5 m.

Pada tahapan ini, akan dilakukan simulasi dan analisis untuk mengetahui pengaruh tinggi bilah terhadap performa dari TASV *darrieus-H*. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Q-Blade dengan metode rotor *DMS simulation* (Gambar 9). Tahapan ini dilakukan guna memperoleh *Coefficient Power* (C_p), daya maksimal yang dihasilkan oleh turbin angin, serta kondisi minimal yang terjadi agar bilah memperoleh daya 300 W. Simulasi dan analisis yang akan dilakukan dengan 2 kecepatan angin yaitu 6,83 m/s sebagai kecepatan minimum untuk mengetahui daya minimum yang dapat diperoleh dan 10 m/s sebagai kecepatan maksimum untuk mengetahui daya maksimum yang dihasilkan oleh bilah.

Pada simulasi pertama menggunakan kecepatan angin 6,83 m/s. Langkah pertama sebelum melakukan simulasi yaitu input data parameter awal sesuai dengan Tabel 8.



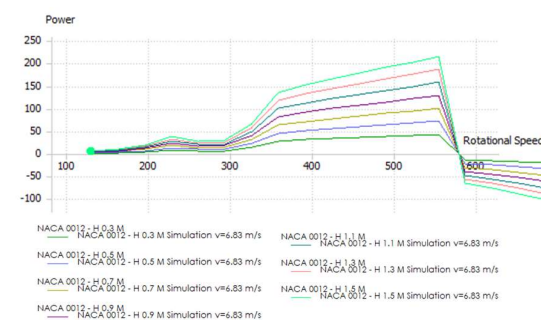
Gambar 9. Tampilan rotor DMS simulation pada Q-Blade ($v=6,83$ m/s).

Hasil simulasi yang dilakukan terhadap TASV *darrieus-H* didapatkan nilai *Coefficient Power* (C_p) sebesar 73% pada TSR 4,25, ditunjukkan oleh grafik *Coefficient Power* dengan TSR (C_p -TSR) pada Gambar 10, serta hasil simulasi pengaruh tinggi bilah

terhadap performa didefinisikan oleh grafik daya dengan kecepatan putar dilihat pada Gambar 11 dan grafik torsi dengan kecepatan putar pada Gambar 12.

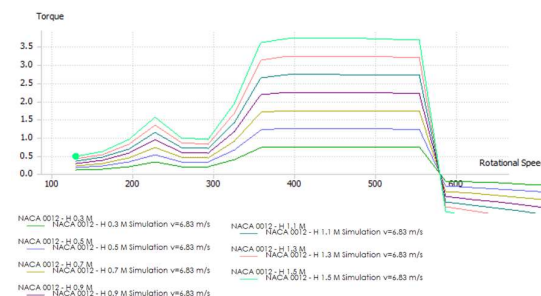


Gambar 10. Grafik C_p -TSR ($v=6,83$ m/s).



Gambar 11. Grafik P-n ($v=6,83$ m/s).

Pada grafik *P-n* di atas, dapat dilihat bahwa pada putaran awal memiliki nilai daya yang rendah. Pada kecepatan putar maksimal 554,38 rpm dapat menghasilkan daya optimum dari masing-masing bilah tersebut.



Gambar 12. Grafik T-n ($v=6,83$ m/s).

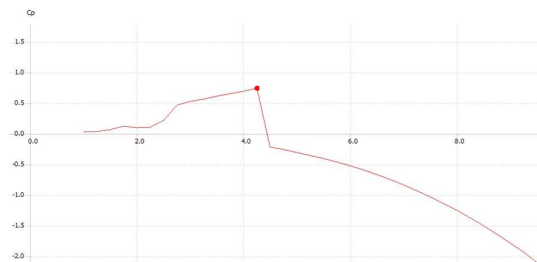
Pada grafik *T-n* di atas, dapat dilihat bahwa pada putaran awal memiliki nilai torsi yang rendah. Nilai torsi maksimum yang bekerja pada masing-masing bilah bekerja pada mulai kecepatan 358,22-554,38 rpm.

Rekapitulasi hasil simulasi pertama performa TASV *darrieus-H* dengan variasi tinggi bilah pada kecepatan angin rata-rata 6,83 m/s tersaji pada Tabel 10 berikut.

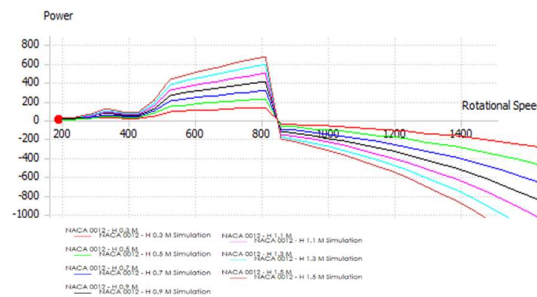
Tabel 10. Daya dan torsi yang dihasilkan ($v = 6,83$ m/s).

Tinggi Bilah (m)	Torsi (Nm)	Kec. Sudut (rad/s)	Daya (W)
0,3	0,74	58,05	42,9
0,5	1,23	58,05	71,4
0,7	1,72	58,05	99,8
0,9	2,22	58,05	128,8
1,1	2,71	58,05	157,23
1,3	3,20	58,05	185,7
1,5	3,69	58,05	214,2

Tahapan selanjutnya yakni melakukan simulasi yang kedua menggunakan kecepatan angin 10 m/s, langkah yang dilakukan sama dengan yang dilakukan pada tahapan pertama. Hasil simulasi yang kedua terhadap TASV *darrieus-H*, didapatkan nilai *Coefficient Power* (C_p) sebesar 73% pada TSR 4,25, dapat dilihat pada Gambar 13. Jika dibandingkan antara grafik C_p -TSR pada kecepatan angin 6,83 m/s dengan 10 m/s tidak ada bedanya, sehingga nilai C_p tidak dipengaruhi tinggi bilah maupun kecepatan angin. Hasil simulasi pengaruh tinggi bilah terhadap performa dengan kecepatan angin 10 m/s didefinisikan oleh grafik daya dengan kecepatan putar dilihat pada Gambar 14 dan grafik torsi dengan kecepatan putar pada Gambar 15.

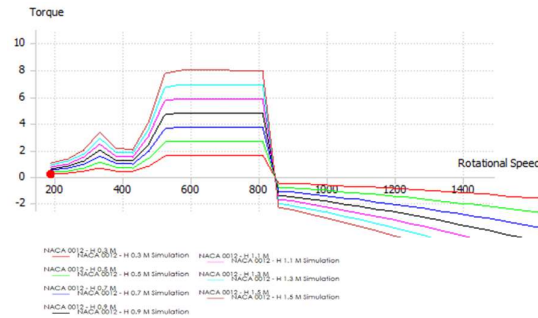


Gambar 13. Grafik C_p -TSR.



Gambar 14. Grafik $P-n$ ($v=10$ m/s).

Pada grafik $P-n$ di atas, dapat dilihat bahwa pada putaran awal memiliki nilai daya yang rendah. Pada kecepatan putar maksimal 811,69 rpm dapat menghasilkan daya optimum dari masing-masing bilah tersebut.



Gambar 15. Grafik $T-n$ ($v=10$ m/s).

Pada grafik $T-n$ di atas, dapat dilihat bahwa pada putaran awal memiliki nilai torsi yang rendah. Nilai torsi maksimum yang bekerja pada masing-masing bilah bekerja pada mulai kecepatan putar 525,21 – 811,69 rpm.

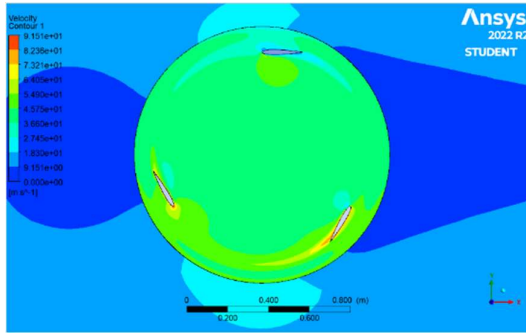
Rekapitulasi hasil simulasi pertama performa TASV *darrieus-H* dengan variasi tinggi bilah pada kecepatan angin maksimal 10 m/s tersaji pada Tabel 11 berikut.

Tabel 11. Daya dan torsi yang dihasilkan ($v = 10$ m/s).

Tinggi Bilah (m)	Torsi (Nm)	Kec. Sudut (rad/s)	Daya (W)
0,3	1,58	85	134,3
0,5	2,64	85	224,4
0,7	3,70	85	314,5
0,9	4,75	85	403,75
1,1	5,79	85	492,1
1,3	6,86	85	583,1
1,5	7,92	85	673,2

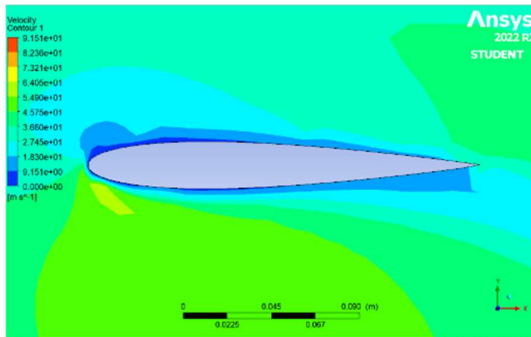
Setelah dilakukan simulasi dan analisis untuk mengetahui performa turbin angin tersebut menggunakan perangkat lunak Q-Blade, tahapan selanjutnya yaitu melakukan simulasi dan analisis dengan menggunakan perangkat lunak Ansys.

Simulasi dan analisis menggunakan perangkat lunak Ansys dilakukan untuk mengetahui aliran fluida saat mengenai sudu turbin. Langkah pertama yakni input data geometri TASV *darrieus-H* dan membuat geometri area berputar turbin berbentuk lingkaran dengan diameter 1250 mm dan *wind tunnel* berbentuk persegi dengan panjang sisi 3750 mm. Hasil simulasi akan ditunjukkan dengan kontur berupa warna dan angka. Kontur warna berfungsi untuk menampilkan pola aliran udara dari *inlet* melewati bilah turbin dan menuju *outlet*, sedangkan angka berfungsi untuk menunjukkan nilai maksimum dan minimum dari kontur yang dihasilkan dari simulasi. Adapun hasil simulasi berupa pola aliran udara ditunjukkan pada Gambar 16.

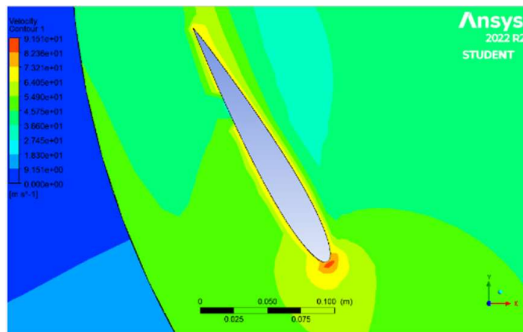


Gambar 16. Hasil simulasi dan analisis bilah menggunakan software Ansys.

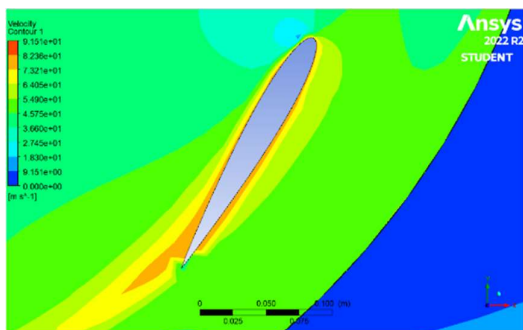
Dari hasil analisis yang ditunjukkan pada Gambar 16, dapat dilihat bahwa terjadinya perbedaan pola aliran fluida antara bilah satu dengan yang lain ketika angin bergerak dari *inlet* menuju *outlet*. Perbedaan pola aliran udara secara detail pada masing-masing bilah ditunjukkan pada Gambar 17, Gambar 18, dan Gambar 19 berikut.



Gambar 17. Pola aliran udara pada bilah sudut 0°.



Gambar 18. Pola aliran udara pada bilah sudut 120°.



Gambar 19. Pola aliran udara pada bilah sudut 240°.

Hasil analisis yang ditunjukkan pada Gambar 17, Gambar 18, dan Gambar 19 bahwa ketika bilah mendekati datangnya arah angin, maka akan mengalami peningkatan kecepatan, hal itu ditunjukkan oleh kontur berwarna merah. Seiring dengan berputarnya rotor turbin, maka bilah akan menjauhi arah angin datang dan mengalami hambatan, sehingga menyebabkan bilah mengalami penurunan kecepatan, kejadian ini ditunjukkan oleh kontur yang berubah warna menjadi biru.

4. Kesimpulan

Pada kajian ini dengan kondisi daerah di Jawa Barat memiliki kecepatan 6,83 m/s dan 10 m/s, dilakukan simulasi dan analisis dengan beberapa variasi tinggi mendapatkan hasil bahwa bilah Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV) *darrieus-H* memiliki *Coefficient Power (Cp)* maksimum yang sama yaitu sebesar 73% pada TSR 4,5. Dalam kajian juga dengan generator 300 W didapatkan tinggi bilah yang optimum yang memiliki desain 0,7–1,1 meter dengan daya yang dihasilkan sebesar 99,8–492 W dengan torsi sebesar 1,72–5,80 Nm pada kecepatan putar rotor sebesar 58,05–85 rad/s.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa dimensi tinggi bilah dapat berpengaruh terhadap performa TASV *darrieus-H* dari daya angin yang dikonversi dan daya listrik yang dihasilkan, maka semakin tinggi suatu bilah maka semakin besar daya angin yang dapat dikonversi, sehingga daya listrik yang dihasilkan pun ikut meningkat. Namun tinggi bilah tidak mempengaruhi nilai *Cp* yang dihasilkan.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada Universitas Singaperbangsa Karawang dan BMKG untuk data yang telah diberikan, serta pihak lainnya yang membantu dalam kajian ini.

Daftar Pustaka

- [1] Dihni VA. Konsumsi Listrik Per Kapita Indonesia Capai 1.109 kWh pada Kuartal III 2021. DataboksID [Internet]. 2021; Available from: <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2021/12/10/konsumsi-listrik-per-kapita-indonesia-capai-1109-kwh-pada-kuartal-iii-2021>
- [2] Uly YA. Potensi Energi Terbarukan di Indonesia Besar, tapi Baru Dipakai 0,3 Persen. Kompas.com [Internet]. 2022 [cited 2022 Mar 12]; Available from: <https://money.kompas.com/read/2022/02/09/164618126/potensi-energi-terbarukan-di-indonesia-besar-tapi-baru-dipakai-03-persen?page=all>
- [3] Sugeng Dwi Mulyo, Subuh Isnur Haryudo. DESAIN PROTOTYPE TURBIN DARRIEUS TIPE H SEBAGAI ALAT CHARGING BATERAI UNTUK MEMENUHI

- KEBUTUHAN BEBAN PENERANGAN Sugeng Dwi Mulyo Subuh Isnur Haryudo. *J Tek Elektro*. 2016;09(03):633–40.
- [4] Aryabathi W, Erwin E, Wiyono S. Potensi Energi Angin pada Sisi Siku Atap Gedung Tinggi. *J Asimetri J Ilm Rekayasa Dan Inov*. 2021;3(2):205–14.
- [5] Fadila A, Zakaria I, Fauzan M. RANCANG BANGUN TURBIN ANGIN TIPE DARRIEUS TIGA SUDU RANGKAP TIGA DENGAN PROFIL NACA 0006. *Eksergi J Tek Energi*. 2019;15(3):102–14.
- [6] Andika F, Astuti F, Fachrudin AR, Malang PN, Malang PN. Optimasi Daya Turbin Angin Tipe Darrieus-H Naca 3412. *Conf Innov Appl Sci Technol (CIASTECH 2020)*. 2020;(Ciastech):863–8.
- [7] Ismail, Pane E, Triyanti. Optimasi Perancangan Turbin Angin Vertikal Tipe Darrieus Untuk Penerangan Di Jalan Tol. *Semin Nas Sains dan Teknol*. 2017;1(November):12.
- [8] Crowe CT, Elger DF, Williams BC, Roberson JA. *Engineering Fluid Mechanics*. 9th ed. Welter J, Dumas S, Sapira L, Owens M, editors. United States of America: John Wiley & Sons, Inc; 2009.
- [9] Letcher TM. *Wind Energy Engineering*. London: Elsevier Inc; 2017.
- [10] Lentera Angin Nusantara. *Pengenalan Pemanfaatan Energi Angin*. Tasikmalaya; 2014.
- [11] Nongdhar D, Goswami B. Design of Micro Wind Turbine for Low Wind Speed Areas: A Review. *ADBU J Electr Electron Eng [Internet]*. 2018;2(2):39–47. Available from: www.tinyurl.com/ajeec-adbu
- [12] Mahyuddin & Usman. Perancangan dan Uji Kincir Angin Vertikal Darrieus Tipe-H Dengan Daya 0,31 HP. *J Ristech (Jurnal Riset, Sains dan Teknol [Internet]*. 2019;1(1):27–37. Available from: <http://jurnal.abulyatama.ac.id/eristechISSN0000-0000>
- [13] Taufiqurrahman R, Suphandani V. Studi Numerik Turbin Angin Darrieus dengan Variasi Jumlah Sudu dan Kecepatan Angin. *J Tek ITS*. 2017;6(1).
- [14] Hunt A, Stringer C, Polagye B. Effect of aspect ratio on cross-flow turbine performance. *J Renew Sustain Energy [Internet]*. 2020 Sep;12(5):054501. Available from: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0016753>
- [15] Alqurashi F. Aerodynamic Forces Affecting the H-Rotor Darrieus. *Hindawi Model Simul Eng*. 2020;2020.
- [16] Messina SBRLM. Design of a vertical-axis wind turbine : how the aspect ratio affects the turbine ' s performance National Advisory Committee for Aeronautics. *Int J Energy Env Eng*. 2014;333–40.
- [17] Cai X, Zhang Y, Ding W, Bian S. Environmental Effects The aerodynamic performance of H-type darrieus VAWT rotor with and without winglets : CFD simulations. *Energy Sources, Part A Recover Util Environ Eff [Internet]*. 2019;00(00):1–12. Available from: <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1691286>
- [18] Li Q, Takao M, Kamada Y, Shimizu K. Effect of rotor aspect ratio and solidity on a straight-bladed vertical axis wind turbine in three-dimensional analysis by the panel method. *Energy*. 2016;
- [19] Castelli MR, Betta S De, Benini E. Effect of Blade Number on a Straight-Bladed Vertical-Axis Darrieus Wind Turbine. *Int J Aerosp Mech Eng*. 2012;6(1):68–74.
- [20] Ikbil Pandu Prakoso, Dr. Ir. Priyagung Hartono, M., Ir. Hj. Unung Lesmanah M. *Perencanaan Turbin Angin Sumbu Vertikal Tipe Darrieus-H*. Univ Islam Malang. 2016;
- [21] Pratama RE, Suhendra B. Analisis performa bilah taper dengan airfoil GOE 796 pada turbin angin sumbu horizontal TSD-500 di PT Lentera Bumi Nusantara. *J Tek Mesin Indonesia*. 2022;17(2):7–11.
- [22] Ivan M, Hendrawan F, Danardono D, Hadi S. Studi simulasi penggunaan airfoil naca 6412 sebagai sudu pada turbin angin crossflow melalui pemodelan CFD 2 dimensi. *J Tek Mesin Indonesia*. 2018;13(1):28–31.
- [23] Prasetyo DA, Tejasyahputra TB, Santoso B. Design and manufacture of the axial wind turbine integrated with condenser. *J Tek Mesin Indonesia*. 2020;15(1):2–7.