

PENGARUH SUDUT SERANG TERHADAP KOEFISIEN PERFORMA TURBIN ANGIN SUMBU HORIZONTAL SKALA MIKRO NACA 4412

Sholichan

Universitas Wahidiyah, email: Sholichan16@gmail.com

Jaelani Sidik, M.Si.

Universitas Wahidiyah, email: Jaelani.sidik@uniwa.ac.id

Nur Wachid, M.Pd.

Universitas Wahidiyah, email: Wachid.nur@uniwa.ac.id

Abstrak

Menurut salah seorang pakar dari Denish Energy Agency (DEA) mengatakan bahwa saat ini *trend* yang terjadi adalah dengan membangun banyak pembangkit listrik tenaga angin skala kecil di lokasi tersebar yang dekat dengan konsumen, dibanding membangun satu atau dua pembangkit besar secara terpusat. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh sudut serang terhadap performa yang dihasilkan turbin angin sumbu horisontal dengan desain sudu airfoil tipe naca 4412 dengan variasi sudut 3° , 6° dan 9° , 12° , 15° . Penelitian ini menggunakan metode simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamic*) menggunakan software QBlade v0.963. Koefisien performa yang optimal diperoleh dengan melakukan perbandingan hasil simulasi antara variasi sudut serang 3° , 6° , 9° , 12° dan 15° dengan software QBlade sehingga didapat koefisien performa turbin angin yang paling optimal yaitu pada variasi sudut serang 3° dan 6° sebesar 0.5. Sudut serang secara umum mempengaruhi nilai sudut puntir pada turbin angin yang diperoleh dari perhitungan sudut alir dikurangi variasi sudut serang sehingga mempengaruhi performa turbin angin yang dihasilkan secara keseluruhan. Turbin angin terbaik dari hasil simulasi adalah turbin angin dengan variasi sudut serang 6° karena pada kecepatan angin 3 m/s sudah menghasilkan daya 12.5 watt dengan kecepatan putar 161 rpm, Sedangkan daya puncak 500 watt dicapai pada kecepatan angin 10.1 m/s dan kecepatan putarnya adalah 500 rpm.

Kata Kunci: Turbin Angin, Sudut Serang, QBlade, Airfoil, NACA

Abstract

According to one expert from the Denish Energy Agency (DEA) said that currently the trend is happening is to build a lot of small-scale wind power plants in scattered locations close to consumers, rather than building one or two large plants centrally. The purpose of this study was to determine the effect of the angle of attack on the performance of the horizontal axis wind turbine with naca 4412 type airfoil design with angular variations of 3° , 6° and 9° , 12° , 15° . This study uses a CFD (Computational Fluid Dynamic) simulation method using QBlade v0.963 software. The optimal performance coefficient is obtained by comparing the simulation results between variations of the angle of attack 3° , 6° , 9° , 12° and 15° with QBlade software so that the most optimal coefficient of wind turbine performance is found in the variation of the attack angle 3° and 6° of 0.5. The angle of attack generally affects the value of the twist angle on the wind turbine obtained from the calculation of the angle of flow minus the variation of the angle of attack so that it affects the performance of the wind turbine produced as a whole. The best wind turbine from the simulation results is a wind turbine with an attack angle variation of 6° because the wind speed of 3 m / s already produces 12.5 watts of power with a rotating speed of 161 rpm, while a peak power of 500 watts is reached at 10.1 m / s wind speed and spin speed is 500 rpm.

Keywords: Wind Turbines, Angle of Attack, QBlade, Airfoil, NACA

PENDAHULUAN

Indonesia memiliki area pembangkit listrik tenaga angin terbesar di Asia Tenggara yang berlokasi di Kabupaten Sidrap, Sulawesi Selatan. Pembangkit listrik tenaga angin di Kabupaten Sidrap tersebut menggunakan *Wind Turbine Generator (WTG)* berjumlah 30 buah yang masing-masing turbin angin memiliki kapasitas 2,5 megawatt (MW). Sehingga turbin angin yang telah dipasang tersebut mampu menghasilkan energi total 75 megawatt. Pembangkit listrik tenaga angin di kabupaten sidrap ini masuk dalam program 35.000 megawatt yang digagas oleh pemerintah (Pratama & Tamtomo, 2018).

Diperkirakan pada tahun 2018 kebutuhan energi listrik di Indonesia mencapai 340 TWh dan dalam selang waktu 5 tahun ke depan, Indonesia akan terus mengalami peningkatan kebutuhan energi listrik, setidaknya minimal 20% dari periode 5 tahun sebelumnya (Rachman, 2012). Menurut salah seorang pakar dari Denish Energy Agency (DEA) mengatakan bahwa saat ini *trend* yang terjadi adalah dengan membangun banyak pembangkit listrik tenaga angin skala kecil di lokasi tersebar yang dekat dengan konsumen, dibanding membangun satu atau dua pembangkit besar secara terpusat. Hal ini terkait dengan tujuan untuk memanfaatkan energi angin dan energi terbarukan lainnya yang tersebar di berbagai lokasi secara

maksimal (Rahmat, 2017) Salah satu komponen utama yang terdapat pada turbin angin adalah rotor. Rotor adalah bagian dari turbin angin yang dapat berputar yang terdiri dari satu buah sudu atau lebih. Fungsi utama rotor adalah mengubah energi kinetik angin menjadi gaya putar yang selanjutnya diubah menjadi energi listrik oleh generator (Atmadi & Fitroh, 2009).

Dengan konfigurasi dan geometri tertentu, rotor diharapkan mampu menghasilkan koefisien daya sesuai yang direncanakan. Salah satu modifikasi untuk mendapatkan koefisien performa yang ideal adalah dengan cara melakukan variasi pada sudut serang airfoil yang menjadi bagian penyusun dari sudu turbin angin.

Berdasarkan uraian yang telah dijabarkan diatas, sangat menarik untuk diteliti lebih lanjut. Selanjutnya penelitian ini diangkat dengan judul Simulasi Pengaruh Sudut Serang Terhadap Koefisien Performa Turbin Angin Sumbu Horizontal Skala Mikro Naca 4412.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui cara mendapatkan koefisien performa turbin angin sumbu horizontal skala mikro yang optimal dan untuk mengetahui pengaruh sudut serang terhadap turbin angin sumbu horizontal.

Dari dilaksanakannya penelitian ini diharapkan dapat diketahui cara mendapatkan koefisien performa turbin angin sumbu horizontal skala mikro yang optimal dan dapat diketahui pengaruh sudut serang terhadap turbin angin sumbu horizontal.

Turbin Angin

“Turbin angin merupakan suatu alat yang mampu mengubah energi angin menjadi energi mekanik dan selanjutnya diubah menjadi energi listrik melalui generator” (Aryanto, Mara, & Made, 2013). Dalam perkembangannya, turbin angin secara umum dibagi menjadi dua macam menurut poros putarnya yaitu turbin angin sumbu horizontal dan turbin angin sumbu vertikal.



Gambar 1 jenis – jenis Turbin Angin

Sumber (Al-Shemmeri, 2010)

Turbin Angin Sumbu Vertikal

Menurut (Tummala, Velamati, Sinha, Indraja, & Krishna, 2016), “Turbin angin sumbu vertikal memiliki sumbu rotor dalam arah vertikal. Turbin ini tidak memiliki mekanisme yawing atau kemampuan self-starting. Lokasi generator untuk turbin ini berada di tanah dan ketinggian operasinya sangat rendah sehingga memudahkan dalam

hal pemeliharaan. Efisiensi ideal untuk turbin ini lebih dari 70%.”

Turbin Angin Sumbu Horizontal

Menurut (Tummala et al., 2016), “Turbin Angin Sumbu Horizontal adalah turbin yang sumbu rotornya berada pada arah horizontal. Tidak seperti turbin angin sumbu vertikal, turbin angin sumbu horizontal memiliki kemampuan untuk self-starting dan yawing. Turbin ini sangat bergantung pada arah angin, oleh karena itu turbin angin ini umumnya dioperasikan pada ketinggian yang lebih tinggi daripada VAWT. Efisiensi ideal untuk turbin ini adalah antara 50% dan 60%.”

Sedangkan menurut (Bukala et al., 2015), “Turbin angin dengan sumbu rotasi yang sejajar dengan arah angin saat ini sebagian besar yang terpasang di seluruh dunia. Hampir 99% dari semua turbin angin adalah HAWT. Itu karena efisiensi mereka yang tinggi dalam kaitannya dengan instalasi rendah dan biaya perawatan.”

Mukund R. Patel menambahkan bahwa keluaran daya dari turbin angin bervariasi linear dengan daerah yang melawati rotor blade. Untuk turbin sumbu horizontal, daerah yang melewati rotor blade adalah (Sayoga, Wiratama, Mara, & Catur, 2014):

$$A = \frac{\pi}{4} D^2$$

Dimana:

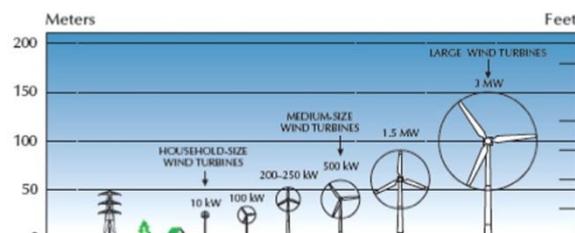
D = diameter rotor (m)

A = luas penampang (m²)

Turbin angin sumbu horizontal memiliki sumbu rotasi yang sejajar dengan arah angin umumnya dioperasikan pada ketinggian yang lebih tinggi daripada turbin angin dengan sumbu rotasi vertikal. Turbin angin sumbu horizontal juga memiliki kelebihan seperti efisiensi yang lebih tinggi dan biaya perawatan yang lebih rendah dibandingkan turbin angin sumbu vertikal.

Klasifikasi Turbin Angin Sumbu Horizontal

Telah dijelaskan bahwa Turbin Angin Sumbu Horizontal adalah turbin yang sumbu rotornya searah dengan arah angin. Turbin Angin Sumbu Horizontal kemudian diklasifikasikan lagi berdasarkan diameter rotor dan kapasitas dayanya.



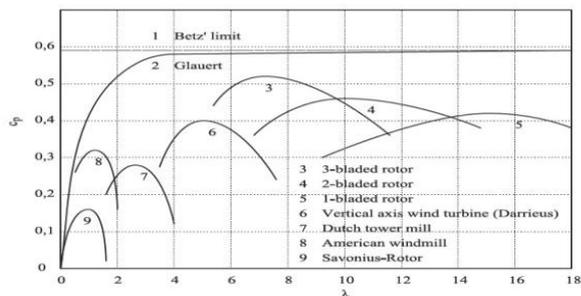
Gambar 2 Klasifikasi Turbin Angin Sumbu Horizontal
Sumber (Tummala et al., 2016)

Menurut (Tummala et al., 2016), “Turbin angin yang termasuk berskala besar adalah yang memiliki diameter rotor mulai dari 50m hingga 100m dan memiliki kapasitas daya antara 1-3 MW. Turbin angin yang termasuk skala kecil adalah turbin angin yang memiliki diameter rotor mulai dari 3m hingga 10m dan memiliki kapasitas daya 1,4 - 20 kW.”

		Rotor diameter (m)		Swept area (m ²)		Standard power rating (kW)	
Small scale	Micro	0.5	1.25	0.2	1.2	0.004	0.25
	Mini	1.25	3	1.2	7.1	0.25	1.4
	Household	3	10	7	79	1.4	16
	Small commercial	10	20	79	314	25	100
	Medium commercial	20	50	314	1963	100	1000
	Large commercial	50	100	1963	7854	1000	3000

Gambar 3 Tabel klasifikasi turbin angin sumbu horisontal
Sumber (Tummala et al., 2016)

Gambar 3 menjelaskan bahwa turbin angin sumbu horisontal skala kecil masih diklasifikasikan kembali, yaitu turbin angin skala mikro yang memiliki diameter rotor 0.5-1.25 meter dan kapasitas dayanya antara 0.004 kW sampai 0.25 kW, turbin angin skala mini memiliki diameter rotor 1.25-3 meter dan kapasitas dayanya antara 0.25 kW sampai 1.4 kW, kemudian turbin angin skala household memiliki diameter rotor 3-10 meter dan kapasitas daya antara 1.4 kW sampai 16kW.



Gambar 4 Grafik koefisien daya terhadap TSR

“Konsep tiga blade lebih seimbang dan kelengkungan blade lebih halus untuk dapat menangkap angin secara efektif. Konsep ini paling sering dipakai pada turbin komersial.” (Sifa, Casiman, & Habib, 2014).

Turbin angin skala mikro yang tergabung dalam turbin angin skala kecil dengan diameter rotor mulai 0.5 meter sampai 10 meter dipadu dengan konsep tiga sudu menjadikannya lebih seimbang, dan kelengkungan sudunya lebih halus untuk dapat menangkap angin secara efisien dan optimal.

Energi Angin

Menurut (Daryanto, 2007), “Angin adalah udara yang bergerak dari tekanan udara yang lebih tinggi ke tekanan udara yang lebih rendah. Perbedaan tekanan udara disebabkan oleh perbedaan suhu udara akibat pemanasan atmosfer yang tidak merata oleh sinar matahari. Karena bergerak angin memiliki energi kinetik. Energi angin

dapat dikonversi atau ditransfer ke dalam bentuk energi lain seperti listrik atau mekanik dengan menggunakan kincir atau turbin angin.”

Dalam ilmu fisika klasik energi kinetik dari sebuah benda dengan massa m dan kecepatan v adalah $E=0.5.m.v^2$, dengan asumsi bahwa kecepatan v tidak mendekati kecepatan cahaya. Rumus tersebut diatas berlaku juga untuk menghitung energi kinetik yang diakibatkan oleh gerakan angin. Sehingga biasa dituliskan sebagai berikut (Aryanto et al., 2013):

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

Dengan:

E = energi (joule)

m = massa udara (kg)

v = kecepatan angin (m/s)

Jika suatu blok angin atau udara yang mempunyai penampang A m², dan bergerak dengan kecepatan v m/s, maka jumlah massa yang mengalir melewati suatu tempat adalah:

$$m = \rho Av$$

Dengan:

m = laju aliran massa (kg/s)

A = luas penampang melintang aliran (m²)

ρ = massa jenis udara (kg/m³)

v = kecepatan angin (m/s)

“Daya adalah energi per satuan waktu. Daya angin berbanding lurus dengan kerapatan udara, dan kubik kecepatan angin, seperti diungkapkan dengan persamaan berikut” (Aryanto et al., 2013):

Daya angin:

$$P_w = \frac{1}{2}\rho Av^3$$

Daya turbin:

$$P_t = T\omega$$

Dengan:

P_w = daya angin (watt)

P_t = daya turbin (watt)

T = torsi (Nm)

A = luas penampang melintang aliran (m²)

ρ = massa jenis udara (kg/m³)

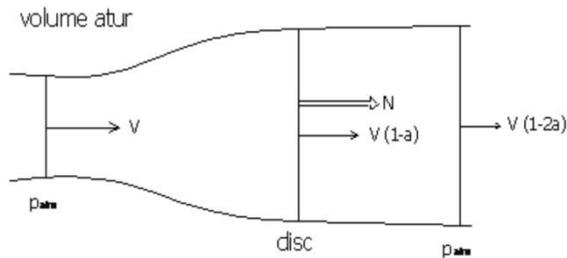
v = kecepatan angin (m/s)

ω = kecepatan sudut (rad/s)

n = putaran (rpm)

Daya adalah energi per satuan waktu dimana energi disini adalah energi kinetik akibat dari angin yang bergerak. Kemudian energi kinetik dikonversi kedalam bentuk energi mekanik menggunakan turbin angin dengan asumsi bahwa kecepatan angin tidak mendekati kecepatan cahaya.

Teori Momentum



Gambar 5 Sketsa volume atur pada teori momentum
Sumber (Atmadi & Fitroh, 2010)

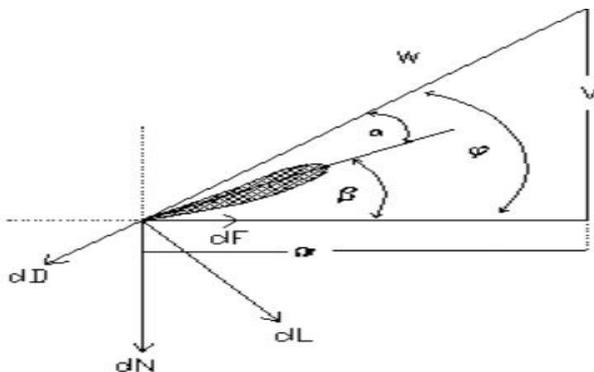
Menurut (Atmadi & Fitroh, 2010), “Angin pada posisi jauh di depan sudu turbin angin mempunyai kecepatan V dan tekanan P_{atm} . Setelah melalui sudu dan berada tepat di belakang sudu kecepatan angin mengalami penurunan kecepatan sebesar a sehingga menjadi $V(1-a)$. Pengurangan kecepatan a disebut sebagai *slip stream*. Metode ini meng- asumsikan bahwa kecepatan angin tepat di depan dan di belakang sudu adalah sama, yaitu $V(1-a)$.”

“Udara yang melewati cakram mengalami perubahan dalam keseluruhan kecepatannya, dan tingkat perubahan momentum sama dengan perubahan kecepatan keseluruhan kali laju aliran massa”(Jenkins, Bossanyi, Burton, & Sharpe, 2010).

Kecepatan udara dan tekanan udara yang melewati sudu turbin angin akan mengalami penurunan kecepatan yang signifikan. Pengurangan kecepatan tersebut biasa disebut *slip stream* dan tingkat perubahan momentumnya sama dengan kecepatan dikalikan dengan laju aliran massanya.

Teori Elemen Sudu

Teori Elemen Sudu mempunyai prinsip yang sama dengan analisis sebuah aerofoil, yaitu menggambarkan diagram kecepatan dan gaya seperti pada sketsa (Atmadi & Fitroh, 2010).



Gambar 6 Sketsa arah gaya dan kecepatan pada Teori Elemen Sudu
Sumber (Atmadi & Fitroh, 2010)

Komponen/proyeksi gaya angkat, dL dan gaya hambat, dD dalam arah tangensial akan menghasilkan gaya putar, dF sebagai berikut:

dengan:

- L = gaya angkat (N/m)
- D = gaya hambat (N/m)
- F = gaya putar (N/m)
- N = gaya aksial (N/m)
- V = kecepatan angin (m/det)
- v = kecepatan relatif (m/det)
- Ω = kecepatan putar (rad/det)
- r = jarak dari sumbu putar ke elemen sudu (m)
- α = sudut serang (derajat)
- β = sudut pasang/sudut puntir (derajat)
- ϕ = sudut aliran (derajat)

Komponen/proyeksi gaya angkat, dL dan gaya hambat, dD dalam arah tangensial akan menghasilkan gaya putar, dF sebagai berikut:

$$dF = dL \sin\theta - dD \cos\theta$$

Sedangkan untuk mencari dL dan dD dinotasikan persamaan sebagai berikut:

$$dL = \frac{1}{2} \rho v^2 c C_l$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho v^2 c C_d$$

Dengan:

- c = chord (m)
- C_l = koefisien gaya angkat
- C_d = koefisien gaya hambat
- ρ = kerapatan udara

Setiap segmen sudu mempunyai sudut aliran yang dinyatakan dalam persamaan:

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda r}$$

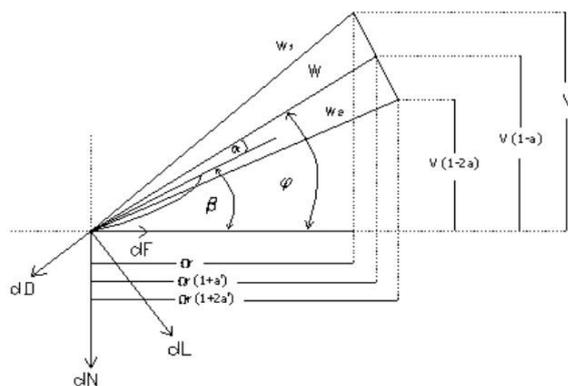
Sudut serang merupakan pengurangan antara sudut aliran ϕ dikurangi sudut puntir β dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\alpha = \phi - \beta$$

Teori Momentum Elemen Sudu

Teori momentum elemen sudu merupakan gabungan antara Teori Elemen Sudu dan Teori Momentum. Dengan kata lain teori ini merupakan modifikasi Teori Elemen Sudu dengan memasukkan parameter *slip stream* a dari Teori Momentum ke dalam persamaan sehingga menghasilkan diagram gaya dan kecepatan seperti pada gambar 6 (Atmadi & Fitroh, 2010)

Teori Momentum Elemen Sudu diketahui mampu memberikan solusi bentuk tertutup dengan prosedur yang relatif sederhana. Teori ini awalnya dikembangkan dari Teori Momentum dan Teori Elemen Sudu. Dengan menggabungkan kedua teori, diperoleh persamaan yang berguna untuk digunakan dalam desain sudu baling-baling (Mahmuddin, 2017).



Gambar 7 Sketsa Teori Momentum Elemen Sudu
Sumber (Atmadi & Fitroh, 2010)

Perkalian antara r dan dF menghasilkan torsi,
 $dT = r dF$

Akumulasi torsi dari setiap elemen sudu menghasilkan torsi total sudu,

$$T = B \int dT$$

Daya keluaran sudu didapat dari perkalian kecepatan putar dan torsi total sudu yang dapat dinotasikan sebagai berikut,

$$P = T\omega$$

Koefisien Performa

“Koefisien performa C_p merupakan perbandingan antara daya mekanik P_m terhadap daya angin P_w ” (Titanio & Safitra, 2015). Hal ini dijelaskan melalui persamaan berikut:

$$C_p = \frac{P_m}{P_w}$$

Daya yang dapat diserap oleh turbin angin menjadi:

$$P = C_p \frac{1}{2} \rho A v^3$$

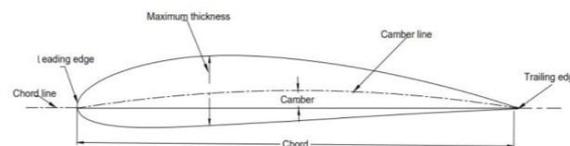
Untuk mengoptimalkan kemampuan merubah Energi angin yg menerpa bilah ke bentuk energi mekanik yang berupa kecepatan putar dan Torsi (gaya putar). Atau istilahnya untuk mendapatkan C_p (koefisien performa) yg optimal.

Airfoil NACA

Menurut (Teddy Nurcahyadi, 2008), “Airfoil adalah bentuk aerodinamik yang ditujukan untuk menghasilkan gaya angkat (*lift*) yang besar dengan gaya hambat (*drag*) yang sekecil mungkin. Ketika suatu airfoil dilewati oleh aliran fluida maka karena adanya pengaruh interaksi antara aliran udara dengan permukaan akan timbul variasi kecepatan dan tekanan di sepanjang permukaan atas dan bawah airfoil serta di bagian depan dan belakang airfoil.”

Airfoil adalah suatu bentuk geometri yang jika ditempatkan disuatu aliran fluida akan menghasilkan gaya angkat (*lift*) lebih dari gaya hambat (*drag*). Saat ini bentuk geometri yang memiliki beragam variasi sudah mempunyai standar panamaan tertentu. Salah satu yang paling sering digunakan didunia internasional adalah standar airfoil menurut *National Advisory Commitee for Aeronautics* (NACA). Nama atau kode penulisan airfoil

dapat secara langsung memberikan informasi utama mengenai bentuk geometri airfoil (Susanto, 2015).



Gambar 8 Geometri Airfoil NACA
Sumber (Susanto, 2015)

Keterangan :

1. Chord line

merupakan garis lurus yang menghubungkan pusat kelengkungan leading edge dan trailing edge.

2. Leading edge

adalah bagian depan airfoil, bentuknya berupa kurva sehingga udara akan mengalir dengan halus.

3. Maximum thickness

merupakan ketebalan maksimum yang diukur tegak lurus terhadap chord line. Ketebalan airfoil dinyatakan sebagai rasio ketebalan terhadap chord.

4. Chamber line

adalah garis yang diperoleh dengan menghubungkan titik-titik tengah antara bagian atas dan bawah airfoil.

5. Chamber

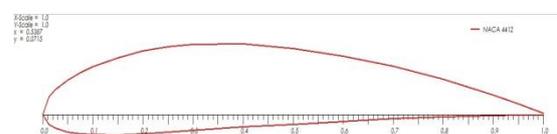
merupakan jarak maksimum camber line yang diukur dari garis chord, biasanya dinyatakan sebagai rasio terhadap chord.

6. Chord

Merupakan jarak dari titik di kurva leading edge ke titik di trailing edge.

7. Trailing edge

adalah titik yang paling belakang dari camber line. Dibawah ini adalah contoh gambar airfoil NACA 4412 (empat digit) dengan penjelasan notasinya.



Gambar 9 Contoh penampang airfoil 4412

Angka 4 pertama menunjukkan harga maksimum chamber dalam presentase terhadap chord (4% x panjang chord). Angka 4 kedua menunjukkan lokasi dari maksimum chamber dalam persepuluh chord (4% x panjang chord). Angka 12 menunjukkan ketebalan maksimum airfoil yaitu 12% x panjang chord.

Tip Speed Ratio

Tip speed ratio (TSR) didefinisikan sebagai hubungan antara kecepatan sudu rotor dan kecepatan angin relatif adalah parameter desain utama di mana semua dimensi rotor yang optimal lainnya dihitung. Aspek seperti

efisiensi, torsi, tekanan mekanik, aerodinamis, dan kebisingan harus dipertimbangkan dalam memilih kecepatan tip yang sesuai. Efisiensi turbin dapat ditingkatkan dengan kecepatan tip yang lebih tinggi, meskipun peningkatannya tidak signifikan ketika mempertimbangkan beberapa penalti seperti peningkatan kebisingan, aerodinamis, dan tekanan sentrifugal (Schubel & Crossley, 2012).

Tip speed ratio (TSR) sangat penting dalam desain turbin angin. jika rotor turbin angin berputar terlalu lambat, sebagian besar angin akan dilalui tanpa terganggu melalui celah diantara bilah rotor. sebaliknya jika rotor berputar terlalu cepat, bilah yang terlihat kabur akan tampak seperti dinding yang kokoh terhadap angin. Oleh karena itu, turbin angin dirancang dengan TSR yang optimal untuk mengekstrak sebanyak mungkin daya dari angin (Al-Shemmeri, 2010).

Menurut (Sayoga et al., 2014), "*Tip speed ratio* (TSR) adalah perbandingan kecepatan ujung rotor terhadap kecepatan angin . Untuk kecepatan angin nominal tertentu, tip speed ratio akan berpengaruh pada kecepatan rotor. Turbin angin tipe lift akan memiliki tip speed ratio yang relatif lebih besar dibandingkan dengan turbin angin drag". Tip speed ratio dihitung dengan persamaan seperti berikut:

$$\lambda = \frac{2\pi n r}{60 v}$$

Dimana:

- λ = Tip speed ratio
- n = putaran rotor (rpm)
- r = jari-jari rotor (rpm)
- v = kecepatan angin (m/s)

Efisiensi Rotor

Daya angin maksimum yang dapat diekstrak oleh turbin angin dengan luas sapuan rotor A adalah:

$$Pt = \frac{16}{27} \rho A v^3$$

Dengan:

- Pt = daya turbin angin (watt)
- A = luas penampang (m²)
- ρ = massa jenis udara (kg/m³)
- v = kecepatan angin (m/s)

Karena menurut (Aryanto et al., 2013), "Angka 16/27 (=59.3%) ini disebut batas Betz (Betz limit, diambil dari ilmuwan Jerman Albert Betz). Angka ini secara teori menunjukkan efisiensi maksimum yang dapat dicapai oleh rotor turbin angin tipe sumbu horisontal. Pada kenyataannya karena ada rugi-rugi gesekan dan kerugian di ujung sudu, efisiensi aerodinamik dari rotor, η rotor ini akan lebih kecil lagi yaitu berkisar pada harga maksimum 0.45 saja untuk sudu yang dirancang dengan sangat baik." Maka Efisiensi rotor turbin angin menjadi:

$$\eta_{rotor} = Cp = Pt / \frac{1}{2} \rho A v^3$$

Dengan:

- Pw = daya angin (watt)
- Pt = daya turbin (watt)
- A = luas penampang melintang aliran (m²)
- ρ = massa jenis udara (kg/m³)
- v = kecepatan angin (m/s)
- η = efisiensi

Dengan kata lain turbin angin sumbu horisontal dikatakan memiliki efisiensi yang baik apabila daya angin yang dapat diekstrak oleh rotor turbin angin sumbu horisontal mendekati harga maksimum menurut ilmuwan Jerman Albert Betz yaitu sebesar 0.45 saja. Sehingga daya yang dapat diekstrak oleh rotor tidak sampai setengah dari daya angin yang menerpa rotor tersebut.

Efisiensi Sistem

Menurut (Aryanto et al., 2013), "Gearbox mengubah laju putar menjadi lebih cepat, konsekuensinya dengan momen gaya yang lebih kecil, sesuai dengan kebutuhan generator yang ada di belakangnya. Generator kemudian mengubah energi kinetik putar menjadi energi listrik. Efisiensi transmisi gearbox dan bearings (Nb, bisa mencapai 95%), dan efisiensi generator (Ng, ~ 80%)."

$$\eta_{total} = Cp \cdot Nb \cdot Ng$$

Dimana:

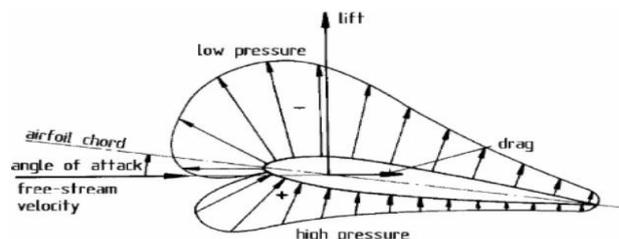
- η = efisiensi
- Cp = koefisien performa
- Nb = efisiensi transmisi gearbox dan bearings
- Ng = efisiensi generator

Aerodinamika Sudu

Sudut Serang (*Angle of attack*)

Istilah yang dipakai di dinamika yang mengalir untuk menjelaskan sudut antara garis pemandu pada badan pengangkat (garis korda disebut airfoil) dan vektor melambangkan gerakan relatif terhadap badan pengangkat dan aliran kemana dia bergerak biasanya disebut sudut serang atau *Angle of attack*. Sudut serang ialah sudut antara garis pemandu badan pengangkat dan aliran yang datang menyambut (Susanto, 2015).

"Sudut serang adalah sudut yang dibentuk antara garis korda dengan arah datang angin. Harga sudut serang ini dapat bernilai positif, negatif, ataupun nol" (Teddy Nurcahyadi, 2008).



Gambar 10 Aerodinamika Sudu
Sumber (Susanto, 2015)

Gaya Angkat (lift force)

Gaya angkat (*lift force*) adalah gaya aerodinamik vertikal yang bekerja pada airfoil, gaya ini terjadi akibat adanya perbedaan tekanan antara permukaan atas airfoil dengan tekanan permukaan bawah airfoil. Jika tekanan di permukaan atas lebih rendah dari tekanan di permukaan bawah airfoil maka akan menimbulkan gaya ke arah atas (Teddy Nurcahyadi, 2008).

Gaya Hambat (Drag Force)

Gaya hambat (*drag force*) merupakan gaya aerodinamik horisontal yang bekerja pada airfoil, gaya hambat ini terjadi karena lebih tingginya tekanan udara pada bagian depan airfoil dibanding tekanan udara pada bagian belakang airfoil sehingga arah gaya yang terjadi adalah ke bagian belakang airfoil (Teddy Nurcahyadi, 2008).

Fenomena Stall

Fenomena aerodinamis yang dikenal sebagai Stall harus dipertimbangkan secara hati-hati dalam mendesain sudu turbin. Stall biasanya terjadi pada sudut serang yang besar tergantung pada desain aerofoil. Ketika *angle of attack* meningkat dan melampaui batasan *critical point* maka mengurangi gaya angkat dan meningkatkan gaya hambat. Kondisi ini dianggap berbahaya dalam penerbangan dan umumnya dihindari. Namun, untuk turbin angin dapat digunakan untuk membatasi output daya maksimum untuk mencegah generator *overload* dan tegangan yang berlebihan pada baling-baling selama kecepatan angin ekstrim (Schubel & Crossley, 2012).

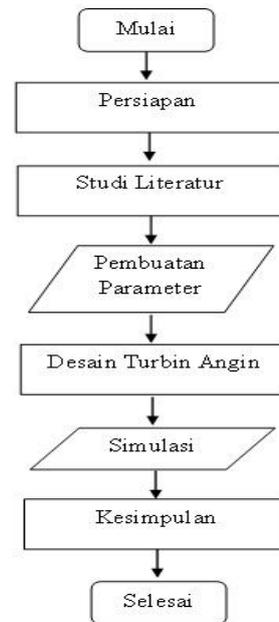
METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode simulasi CFD (*Computational Dynamic Fluid*) menggunakan software QBlade v0.963. Kegiatan yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi persiapan, studi literatur penelitian terdahulu, pembuatan parameter sudu, desain turbin angin, simulasi turbin angin, dan menarik kesimpulan.

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

No	Nama Alat	Fungsi
1	Laptop/PC	Pengolah Software yang dibutuhkan
2	Software QBlade v0.963 Software excel 2013	Simulasi turbin angin
3	Software Solidworks	Membuat parameter turbin angin
4	2014	Desain turbin angin

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Aifoil NACA 4412 dan diagram alir disajikan sebagai berikut:



HASIL DAN PEMBAHASAN

Spesifikasi Turbin Angin

Berikut ini adalah spesifikasi turbin angin yang digunakan sebagai parameter dalam melaksanakan penelitian:

Jenis Turbin Angin: Turbin Angin Sumbu Horizontal

Kelas: 500 watt peak

Radius rotor Turbin Angin : 0.8 meter

Jumlah Sudu: 3 buah

Tip Speed Ratio (TSR): 7

Variasi sudut serang: 3°, 6°, 9°, 12°, 15°

Data Perhitungan Parameter

Dengan mengetahui spesifikasi turbin angin kemudian dilakukan perhitungan parameter yang dihitung menggunakan software microsoft excel, setelah itu data disajikan dalam bentuk tabel menurut masing-masing variasi sudut serang yang digunakan. Perhitungan dimulai dengan membagi sudu turbin angin menjadi 10 elemen, kemudian dicari jari-jari parsial, Tip speed ratio (TSR) parsial, dan koefisien angkat (Cl) pada masing-masing elemen sudu.

Tabel 1 Hasil perhitungan jari-jari parsial dan TSR parsial

Ele men	r	TSR parsial	Cl
0	0.16	1.40	1.52
1	0.224	1.96	1.08
2	0.288	2.52	0.84

3	0.352	3.08	0.69
4	0.416	3.64	0.58
5	0.480	4.20	0.51
6	0.544	4.76	0.45
7	0.608	5.32	0.40
8	0.672	5.88	0.36
9	0.736	6.44	0.33
10	0.800	7.00	0.30

Tabel 1 menunjukkan hasil perhitungan dari tiap elemen sudu diperoleh jari-jari parsial dari elemen 0 hingga 10 sebagai berikut 0.16, 0.224, 0.288, 0.352, 0.416, 0.480, 0.544, 0.608, 0.672, 0.736, 0.8. Sedangkan *tip speed ratio* (TSR) parsialnya dari elemen 0 hingga 10 adalah 1.40, 1.96, 2.52, 3.08, 3.64, 4.20, 4.76, 5.32, 5.88, 6.44, 7. Kemudian didapat pula koefisien angkat pada tiap elemen sudu dari elemen 0 hingga 10 adalah 1.52, 1.08, 0.84, 0.69, 0.58, 0.51, 0.45, 0.40, 0.36, 0.33, 0.30.

Hasil perhitungan pada tabel 1 digunakan untuk semua variasi sudut serang yang akan diteliti pengaruhnya terhadap turbin angin sumbu horisontal karena memiliki spesifikasi yang seragam pada masing-masing turbi angin.

Tabel 2 Perhitungan sudut alir dan sudut puntir dengan variasi AoA 3°

Alpha	Flow angle (deg)	Twist (beta) (deg)	Twist linier 75%	Twist linier 75%
3.00	23.69	20.69		9.35
3.00	18.02	15.02		9.31
3.00	14.43	11.43		9.27
3.00	11.99	8.99		9.22
3.00	10.24	7.24		9.18
3.00	8.93	5.93		9.14
3.00	7.91	4.91		9.10
3.00	7.10	4.10	4.10	9.05
3.00	6.43	3.43	3.43	9.01
3.00	5.88	2.88		8.97
3.00	5.42	2.42		8.92

Dari tabel 2 menunjukkan hasil perhitungan bahwa variasi sudut serang 3° berpengaruh pada perubahan sudut puntir pada tiap-tiap elemen sudu. Pada sudut puntir sebelum dilakukan linearisasi adalah 20.69, 15.02, 11.43, 8.99, 7.24, 5.93, 4.91, 4.10, 3.43, 2.88, 2.42 derajat. Sedangkan sudut puntir setelah dilakukan linearisasi adalah 9.35, 9.31, 9.27, 9.22, 9.18, 9.14, 9.10, 9.05, 9.01, 8.97, 8.92 derajat.

Tabel 3 Perhitungan sudut alir dan sudut puntir dengan variasi AoA 6°

Alpha	Flow angle (deg)	Twist (beta) (deg)	Twist linier 75%	Twist linier 75%
6.00	23.69	17.69		5.68
6.00	18.02	12.02		5.64
6.00	14.43	8.43		5.60
6.00	11.99	5.99		5.55
6.00	10.24	4.24		5.51
6.00	8.93	2.93		5.47
6.00	7.91	1.91		5.43
6.00	7.10	1.10	1.10	5.38
6.00	6.43	0.43	0.43	5.34
6.00	5.88	-0.12		5.30
6.00	5.42	-0.58		5.25

Dari tabel 3 menunjukkan hasil perhitungan bahwa variasi sudut serang 6° berpengaruh pada perubahan sudut puntir pada tiap-tiap elemen sudu. Pada sudut puntir sebelum dilakukan linearisasi adalah 17.69, 12.02, 8.43, 5.99, 4.24, 2.93, 1.91, 1.10, 0.43, -0.12, -0.58 derajat. Sedangkan sudut puntir setelah dilakukan linearisasi adalah 5.68, 5.64, 5.60, 5.55, 5.51, 5.47, 5.43, 5.38, 5.34, 5.30, 5.25 derajat.

Tabel 4 Perhitungan sudut alir dan sudut puntir dengan variasi AoA 9°

Alpha	Flow angle (deg)	Twist (beta) (deg)	Twist linier 75%	Twist linier 75%
9.00	23.69	14.69		2.68
9.00	18.02	9.02		2.64
9.00	14.43	5.43		2.60
9.00	11.99	2.99		2.55
9.00	10.24	1.24		2.51
9.00	8.93	-0.07		2.47
9.00	7.91	-1.09		2.43
9.00	7.10	-1.90	-1.90	2.38
9.00	6.43	-2.57	-2.57	2.34
9.00	5.88	-3.12		2.30
9.00	5.42	-3.58		2.25

Dari tabel 4 menunjukkan hasil perhitungan bahwa variasi sudut serang 9° berpengaruh pada perubahan sudut puntir pada tiap-tiap elemen sudu. Pada sudut puntir sebelum dilakukan linearisasi adalah 14.69, 9.02, 5.43, 2.99, 1.24, -0.07, -1.09, -1.90, -2.57, -3.12, -3.58 derajat. Sedangkan sudut puntir setelah dilakukan linearisasi adalah 2.68, 2.64, 2.60, 2.55, 2.51, 2.47, 2.43, 2.38, 2.34, 2.30, 2.25 derajat.

Tabel 5 Perhitungan sudut alir dan sudut puntir dengan variasi AoA 12°

Alpha	Flow angle (deg)	Twist (beta) (deg)	Twist linier 75%	Twist linier 75%
12.00	23.69	11.69		-0.37
12.00	18.02	6.02		-0.41
12.00	14.43	2.43		-0.46
12.00	11.99	-0.01		-0.50
12.00	10.24	-1.76		-0.54
12.00	8.93	-3.07		-0.58
12.00	7.91	-4.09		-0.63
12.00	7.10	-4.90	-4.90	-0.67
12.00	6.43	-5.57	-5.57	-0.71
12.00	5.88	-6.12		-0.75
12.00	5.42	-6.58		-0.80

Dari tabel 5 menunjukkan hasil perhitungan bahwa variasi sudut serang 12° berpengaruh pada perubahan sudut puntir pada tiap-tiap elemen sudu. Pada sudut puntir sebelum dilakukan linearisasi adalah 11.69, 6.02, 2.43, -0.01, -1.76, -3.07, -4.09, -4.90, -5.57, -6.12, -6.58 derajat. Sedangkan sudut puntir setelah dilakukan linearisasi adalah -0.37, -0.41, -0.46, -0.50, -0.54, -0.58, -0.63, -0.67, -0.71, -0.75, -0.80 derajat.

Tabel 6 Perhitungan sudut alir dan sudut puntir dengan variasi AoA 15°

Alpha	Flow angle (deg)	Twist (beta) (deg)	Twist linier 75%	Twist linier 75%
15.00	23.69	8.69		-3.73
15.00	18.02	3.02		-3.77
15.00	14.43	-0.57		-3.82
15.00	11.99	-3.01		-3.86
15.00	10.24	-4.76		-3.90
15.00	8.93	-6.07		-3.94
15.00	7.91	-7.09		-3.99
15.00	7.10	-7.90	-7.90	-4.03
15.00	6.43	-8.57	-8.57	-4.07
15.00	5.88	-9.12		-4.11
15.00	5.42	-9.58		-4.16

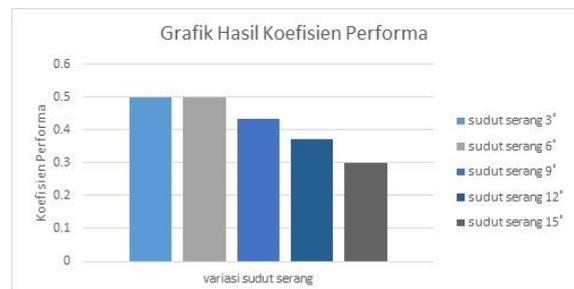
Dari tabel 6 menunjukkan hasil perhitungan bahwa variasi sudut serang 3° berpengaruh pada perubahan sudut puntir pada tiap-tiap elemen sudu. Pada sudut puntir sebelum dilakukan linearisasi adalah 8.69, 3.02, -0.57, -3.01, -4.76, -6.07, -7.09, -7.90, -8.57, -9.12, -9.58 derajat. Sedangkan sudut puntir setelah dilakukan linearisasi

adalah -3.73, -3.77, -3.82, -3.86, -3.90, -3.94, -3.99, -4.03, -4.07, -4.11, -4.16 derajat.

Data Performa Turbin Angin

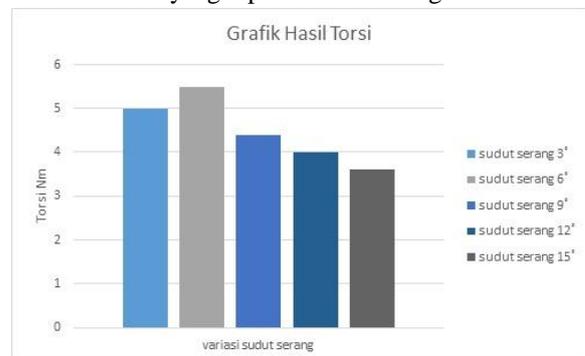
Berikut ini disajikan olahan data hasil perolehan performa turbin angin setelah dilakukan simulasi supaya lebih mudah dibaca dan dimenegerti.

Grafik 1 Hasil Koefisien Performa



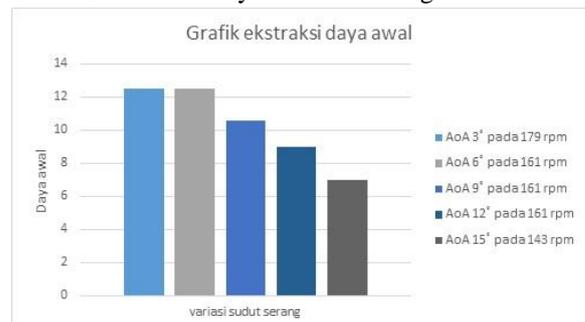
Grafik 1 menunjukkan koefisien performa maksimum yang dihasilkan oleh turbin angin adalah sebesar 0.5 pada variasi sudut serang 3°, 0.5 pada variasi sudut serang 6°, 0.43 pada variasi sudut serang 9°, 0.37 pada variasi sudut serang 12°, dan 0.3 pada variasi sudut serang 15°.

Grafik 2 Torsi yang diperoleh turbin angin



Grafik 2 menunjukkan torsi yang dihasilkan oleh turbin angin sumbu horisontal melalui simulasi adalah sebesar 5 Nm pada variasi sudut serang 3°, 5.5 Nm pada variasi sudut serang 6°, 4.4 Nm pada variasi sudut serang 9°, 4 Nm pada variasi sudut serang 12°, 3.6 pada variasi sudut serang 15°.

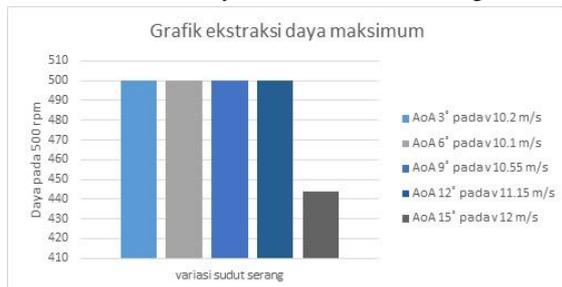
Grafik 3 Ekstraksi daya awal turbin angin



Grafik 3 menunjukkan daya awal yang dapat diekstrak oleh turbin angin sumbu horisontal melalui simulasi adalah sebesar 12.5 watt pada variasi sudut serang 3° dengan kecepatan putar 179 rpm, 12.5 watt pada variasi sudut serang 6° dengan kecepatan putar 161 rpm, 10.6

watt pada variasi sudut serang 9° dengan kecepatan putar 161 rpm, 9 watt pada variasi sudut serang 12° dengan kecepatan putar 161 rpm, 7 watt pada variasi sudut serang 15° dengan kecepatan putar 143 rpm.

Grafik 4 ekstraksi daya maksimum turbin angin



Grafik 4 menunjukkan daya maksimum yang dapat diekstrak oleh turbin angin sumbu horisontal melalui simulasi adalah sebesar 500 watt pada variasi sudut serang 3° dengan kecepatan putar 500 rpm, 500 watt pada variasi sudut serang 6° dengan kecepatan putar 500 rpm, 500 watt pada variasi sudut serang 9° dengan kecepatan putar 500 rpm, 500 watt pada variasi sudut serang 12° dengan kecepatan putar 500 rpm, 444 watt pada variasi sudut serang 15° dengan kecepatan putar 500 rpm.

PENUTUP

Simpulan

Setelah dilakukannya simulasi Turbin Angin Sumbu Horizontal Naca 4412 dengan variasi sudut serang 3°, 6°, 9°, 12° dan 15° penulis dapat megambil kesimpulan yaitu Koefisien performa turbin angin sumbu horisontal skala mikro yang optimal dapat diperoleh dengan cara melakukan perbandingan hasil simulasi antara variasi sudut serang 3°, 6°, 9°, 12° dan 15° menggunakan software QBlade sehingga didapat koefisien performa turbin angin yang paling optimal yaitu pada variasi sudut serang 3° dan 6° sebesar 0.5. Kemudian sudut serang secara umum mempengaruhi nilai sudut puntir pada turbin angin yang diperoleh dari perhitungan sudut alir dikurangi variasi sudut serang sehingga mempengaruhi performa turbin angin yang dihasilkan secara keseluruhan. Turbin angin terbaik dari hasil simulasi adalah turbin angin dengan variasi sudut serang 6° karena pada kecepatan angin 3 m/s dapat menghasilkan daya 12.5 watt dan kecepatan putarnya adalah 161 rpm, Sedangkan daya puncak 500 watt dicapai pada kecepatan angin 10.1 m/s dan kecepatan putarnya adalah 500 rpm.

Saran

Penulis menyarankan turbin angin sumbu horisontal dengan variasi sudut serang 6° untuk dibuat prototype karena terbukti memiliki koefisien performa yang lebih tinggi. Perlu dilakukan juga penelitian lebih lanjut untuk mengetahui faktor lain yang dapat mempengaruhi nilai koefisien performa turbin angin sumbu horisontal skala

mikro. Serta perlu dilakukan perbandingan antara pengaruh sudut serang terhadap turbin angin secara simulasi dan uji coba turbin angin secara nyata.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Shemmeri, T. (2010). *Wind Turbine*. Bookboon.
- Aryanto, F., Mara, I. M., & Made, N. (2013). Pengaruh Kecepatan Angin Dan Variasi Jumlah Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Poros Horizontal. *Jurnal Dinamika Teknik Mesin*.
- Atmadi, S., & Fitroh, A. J. (2009). Analisa Pengaruh Sudut Pitch , Untuk Memperoleh Daya Optimal Turbin Angin Lpn-Skea 50 Kw Pada Beberapa Kondisi Kecepatan Angin. *Jurnal Teknologi Dirgantara*, 7(1), 60–66.
- Atmadi, S., & Fitroh, A. J. (2010). Analisis Dan Optimasi Sudu Skea 5 Kw Untuk Pemompaan. *Jurnal Teknologi Dirgantara*, 8(2), 108–115.
- Bukala, J., Damaziak, K., Karimi, H. R., Kroszczynski, K., Krzeszowiec, M., & Malachowski, J. (2015). Modern Small Wind Turbine Design Solutions Comparison in Terms of Estimated Cost to Energy Output Ratio. *Jurnal Renewable Energy*, 83, 1166–1173.
- Daryanto, Y. (2007). *Kajian Potensi angin Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu*. Yogyakarta: Balai PPTAGG.
- Jenkins, N., Bossanyi, E., Burton, T., & Sharpe, D. (2010). *Wind Energy Handbook*. Chichester: John Wiley & Sons, Inc.
- Mahmuddin, F. (2017). Rotor Blade Performance Analysis with Blade Element Momentum Theory. *Jurnal Energy Procedia*, 105, 1123–1129.
- Pratama, A. N., & Tamtomo, A. B. (2018). Infografik 7 Fakta PLTB Sidrap. Retrieved July 22, 2018, from <https://nasional.kompas.com/read/2018/07/04/17474551/infografik-7-fakta-pltb-sidrap>
- Rachman, A. (2012). *Analisis Dan Pemetaan Potensi Energi Angin Di Indonesia. Skripsi tidak diterbitkan*. Depok: PPs Universitas Indonesia.
- Rahmat, M. H. (2017). Potensi Pengembangan PLTB di Indonesia. Retrieved July 22, 2018, from <http://setkab.go.id/potensi-pengembangan-pltb-di-indonesia/>
- Sayoga, I. M. A., Wiratama, I. K., Mara, I. M., & Catur, A. D. (2014). Pengaruh Variasi Jumlah Blade Terhadap Aerodinamik Performan Pada Rancangan Kincir Angin 300 Watt. *Jurnal Dinamika Teknik Mesin*, 4(2).
- Schubel, P. J., & Crossley, R. J. (2012). Wind Turbine Blade Design. *Journal Energies*, 5, 3425–3449.

- Sifa, A., Casiman, & Habib, R. (2014). *Pengujian Kincir Angin Horizontal Type di Kawasan Tambak sebagai Energi Listrik Alternatif untuk Penerangan*. Bandung: IRWNS.
- Susanto, A. (2015). *Studi Eksperimen Pengaruh Sudut Serang Terhadap Performa Turbin Angin Sumbu Horizontal Naca 4415. Naskah Publikasi*. Surakarta: PPs Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Teddy Nurcahyadi, S. (2008). Pengaruh Airfoil Simetris Terhadap Koefisien Angkat Aerodinamisnya. *Jurnal Ilmiah Semesta Teknik*, 11(1), 110–124.
- Titano, G., & Safitra, A. G. (2015). Unjuk Kerja Turbin Angin Sumbu Horizontal menggunakan Airfoil. *Jurnal Prosiding Pertemuan Ilmiah*.
- Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha, D. K., Indraja, V., & Krishna, V. H. (2016). A review on small scale wind turbines. *Jurnal Renewable and Sustainable Energy Reviews*.