

PENGARUH SUDUT SERANG TERHADAP KINERJA TURBIN ANGIN HELIKS GORLOV DENGAN PENAMBAHAN *CURVEPLATE*

Muhammad Fadhil¹, Karnowo², Samsudin Anis³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang
e-mail: fk.fadhil26@gmail.com

Abstrak. Pada masa sekarang sumber energi yang sering digunakan berasal dari bahan bakar fosil. Untuk mengatasi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil yang menimbulkan efek pencemaran terhadap lingkungan, perlu dilakukan pengembangan pada energi terbarukan. Pengembangan tersebut bisa disalurkan melalui turbin angin. Untuk meningkatkan kinerja turbin heliks Gorlov ada beberapa faktor yang mempengaruhi, salah satunya adalah sudut serang. Inovasi yang dapat dilakukan adalah dengan merubah sudut serang menjadi 90° dan penambahan *curveplate*, hal ini dapat memberikan hasil daya dan *power coefficient* yang lebih besar dibandingkan turbin heliks Gorlov yang pada umumnya digunakan saat ini. Hal itu dikarenakan perubahan sudut serang mengakibatkan gaya lift dan drag yang bekerja pada sudu berubah. Dengan sudut serang yang tepat dapat memberikan lebih banyak gaya positif yang membantu turbin berputar. Semakin banyak gaya yang membantu turbin berputar maka daya yang dihasilkan juga semakin besar.

Kata Kunci: Turbin Heliks Gorlov, Sudut Serang, *Curveplate*

Abstract. At present, source of energy is used from fossil fuels. To overcome the fossil fuels that cause pollution effects to the environment, needs a development on renewable energy. The development can be channeled through a wind turbine. To improve the performance of Gorlov's helical turbine there are several factors that influence, one of them is the angle of attack. The innovation can be do is change the angle of attack to 90° and adding *curveplate*, this innovation can provide greater power yield and *power coefficient* compared to the Gorlov's helical turbine that already currently used. This is because change the angle of attack conduct lift and drag force on blade are change. With the right angle of attack can provide more positive forces that help the turbine rotating. The more force that help the turbine rotating made the more power generated.

Keyword: Gorlov's helical turbine, angle of attack, *curveplate*

PENDAHULUAN

Untuk mengurangi penggunaan terhadap energi fosil yang memberikan efek pencemaran terhadap lingkungan, maka perlu dilakukan pengembangan sumber- sumber energi terbarukan. Pengembangan sumber energi ini harus memperhatikan tiga "E", yakni energi, ekonomi, dan ekologi. Jadi, pengembangan sumber energi harus dapat memproduksi energi dalam jumlah yang besar, dengan biaya yang rendah serta mempunyai dampak minimum terhadap lingkungan ⁽¹⁾.

Indonesia umumnya memiliki potensi angin berkecepatan lebih dari 5 meter per detik (m/detik). Hasil pemetaan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (Lapan) pada 120 lokasi menunjukkan, beberapa wilayah memiliki kecepatan angin di atas 5 m/detik, diantaranya pada daerah Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan, dan Pantai Selatan Jawa ⁽²⁾. Indonesia sebagai negara kepulauan mempunyai potensi cukup besar akan energi angin, oleh karena itu pengembangan sumber energi terbarukan dilakukan melalui turbin angin ⁽³⁾.

Terdapat berbagai macam jenis turbin angin, salah satunya adalah turbin heliks Gorlov. Turbin heliks diciptakan oleh Alexander Gorlov pada tahun 1995 oleh karena itu dikenal sebagai Turbin Gorlov. Turbin heliks Gorlov hampir sama dengan turbin Darrieus yang berbilah lurus, hanya saja airfoil sudunya tersapu dalam profil heliks (melengkung mengitari poros) sepanjang rentangnya ⁽⁴⁾.

Turbin heliks Gorlov masih menggunakan prinsip kerja yang hampir sama dengan turbin Darrieus. Meskipun menggunakan prinsip kerja yang sama, turbin heliks Gorlov justru menutupi kekurangan yang terdapat pada turbin Darrieus dan bahkan dapat menghasilkan daya keluaran yang lebih besar pada kecepatan angin yang sama ⁽⁵⁾.

Bentuk sudu heliks juga dapat meredam getaran torsi osilasi selama perputaran. Cakupan sudu yang seragam mengabaikan efek akhir dan gerakan baling-baling, idealnya memberikan torsi turbin yang seimbang walaupun kenyataannya terjadi beberapa perbedaan ⁽⁴⁾.

Konsep gaya angkat (*Lift*) dan Gaya hambat (*Drag*) terjadi ketika sebuah benda apapun bergerak melalui sebuah fluida atau fluida bergerak melalui benda. Suatu interaksi antara benda dengan fluida mengakibatkan efek yang dapat digambarkan dalam bentuk gaya- gaya pada pertemuan antar-muka fluida benda. Hal ini dapat digambarkan dalam tegangan- tegangan geser dinding, τ_w , akibat efek viskositas dan tegangan normal akibat tekanan disekeliling benda tersebut ⁽⁶⁾. Pada umumnya konsep konsep gaya angkat (*Lift*) dan gaya hambat (*Drag*) digunakan pada airfoil.

Pada turbin angin sumbu vertikal, gaya drag tidak selalu bernilai negatif atau menghambat perputaran turbin. Dalam turbin, sumbu vertikal, gaya drag sebenarnya bisa memberikan torsi positif yang dapat membantu rotasi ⁽⁴⁾. Dengan merubah sudut serang 90° akan merubah turbin menggunakan sisi dalam airfoil dan dapat memanfaatkan gaya drag yang bernilai positif. Penambahan *curveplate* yang berupa lengkungan plat berbentuk setengah lingkaran bertujuan untuk menutupi setengah bagian turbin heliks.

Daya merupakan tolak ukur dari kinerja turbin. Semakin besar daya yang dihasilkan menunjukkan semakin baik turbin bekerja. Salah satu faktor yang mempengaruhi besar daya turbin adalah sudut serang. Perubahan sudut serang pada sudu turbin dapat mempengaruhi koefisien power turbin tersebut. Hal ini dikarenakan pada sudut serang tertentu dihasilkan koefisien lift yang besar, sehingga dapat menghasilkan gaya lift yang besar pada sudu. Dengan sudut serang turbin yang tepat dapat menghasilkan daya yang maksimal.

LANDASAN TEORI

Energi Angin

Angin merupakan udara yang bergerak disebabkan adanya perbedaan tekanan udara. Udara akan mengalir dari daerah bertekanan tinggi ke daerah bertekanan lebih rendah ⁽⁷⁾. Energi kinetik dihasilkan oleh udara yang memiliki massa (m) bergerak dengan kecepatan (v).

Dalam sistem konversi energi angin, energi mekanik turbin diperoleh dari energi kinetik yang tersimpan dalam aliran angin. Dengan asumsi v_1 adalah kecepatan angin sebelum melewati rotor, dan v_2 adalah kecepatan angin setelah melewati rotor, maka nilai daya mekanik turbin dapat diperoleh dari besar energi kinetik angin sebelum melewati rotor dikurangi energi kinetik angin setelah melewati rotor ⁽⁸⁾. Dengan menggunakan teori momentum Element Betz, besar daya mekanik yang dapat diambil dari daya yang terkandung dalam angin hanya sebatas nilai 0,593. Oleh karena itu hanya sekitar 60% saja daya angin yang dapat diubah menjadi daya mekanik ⁽⁹⁾.

Tip Speed Ratio (TSR)

Tip speed ratio (λ atau TSR) adalah faktor yang penting dalam desain turbin angin. TSR merupakan perbandingan antara kecepatan ujung sudu dengan kecepatan angin (*free stream*) ⁽¹⁰⁾.

$$\lambda = \frac{U}{v} = \frac{\omega.R}{v} \dots \dots \dots (1)$$

Dimana :

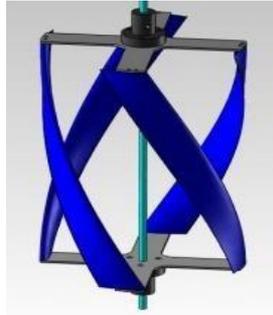
- λ = *Tip speed ratio*
- ω = Kecepatan sudut rotor (rad/s)
- R = Jari-jari turbin (m)
- v = Kecepatan angin (m/s).

Turbin Heliks Gorlov

Turbin heliks Gorlov pertama diperkenalkan oleh Professor Alexander M. Gorlov dari Northeastern University, yang dipatenkan pada September 1995 sebagai bentuk dari perkembangan Turbin Darrieus. Oleh karena itu turbin heliks sering disebut turbin Gorlov. Perbedaan turbin heliks Gorlov dengan turbin Darrieus ada pada *helical pitch angle* dari blade. Secara keseluruhan turbin heliks Gorlov sama dengan turbin Darrieus yang memiliki bentuk sudu lurus, hanya saja profil sudu aerofoil berbentuk heliks dan menyapu sepanjang

rentangnya.

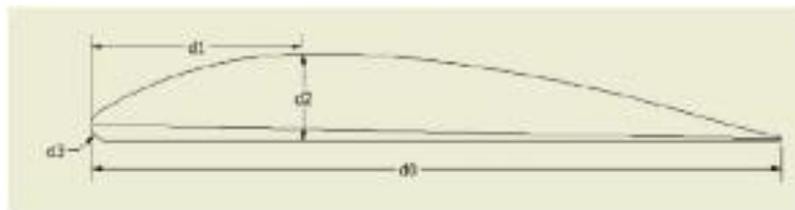
Berikut gambar turbin heliks gorlov 4 sudu:



Gambar 1. Turbin Heliks Gorlov ⁽⁴⁾.

Airfoil NACA 4415

Aerofoil dalam bahasa Indonesia sering kali disebut dengan nama airfoil. Airfoil merupakan suatu bentuk geometri yang apabila mengenai aliran fluida akan menghasilkan gaya angkat (*lift*) lebih dari gaya hambatan (*drag*). Nama atau kode penulisan airfoil standar yang digunakan international adalah *National Advisory Commite for Aerodinautics* (NACA). Dengan nama atau kode tertentu dapat secara langsung memberikan informasi utama mengenai bentuk geometri airfoil ⁽¹¹⁾.Berikut adalah contoh airfoil NACA 4415 (empat digit) beserta penjelasannya:



Gambar 2. Airfoil naca 4415 ⁽¹¹⁾.

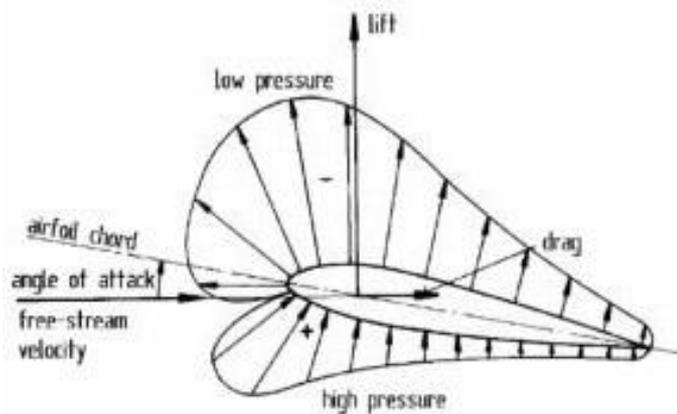
Keterangan:

- Angka 4 pertama menunjukkan nilai maksimum *chamber* dalam presentase terhadap chord (4% x panjang chord).
- Angka 4 kedua menunjukkan lokasi maksimum *chamber* dalam persepuluh chord (4% x panjang chord).
- Angka 15 berikutnya menunjukkan ketebalan maksimum airfoil yaitu 15% x panjang chord.

Sudut serang (Angle of attack).

Sudut serang atau *Angle of attack* adalah istilah yang dipakai dalam aerodinamika untuk menjelaskan sudut yang terbentuk antara garis pemandu pada badan pengangkat atau seringnya disebut garis korda dan vektor komponen kecepatan angin. Sudut serang ialah sudut antara garis

pemandu badan pengangkat (garis chord) dan aliran yang datang menyambut ⁽¹¹⁾.



Gambar 3. *Angle of attack* ⁽⁸⁾.

Unjuk Kerja Turbin Angin

Brake horse power (BHP) merupakan penilaian dari unjuk kerja turbin. *Brake Horse Power* adalah daya turbin yang diukur setelah mengalami pembebanan yang tersambungkan oleh generator, gearbox, pompa ataupun perangkat tambahan lainnya. Jika percobaan nantinya BHP diukur dengan menggunakan generator listrik. Maka besaran nilai daya yang diukur dapat dilihat dengan menggunakan rumus seperti berikut ⁽¹²⁾:

$$P_{generator} = V \cdot I \dots\dots\dots(2)$$

Besarnya BHP dapat dihitung setelah didapatkan harga P generator dengan rumus sebagai berikut:

$$BHP = \frac{P_{generator}}{\eta_{generator}} \dots\dots\dots(3)$$

Dimana:

BHP = *Brake Horse Power* (W)

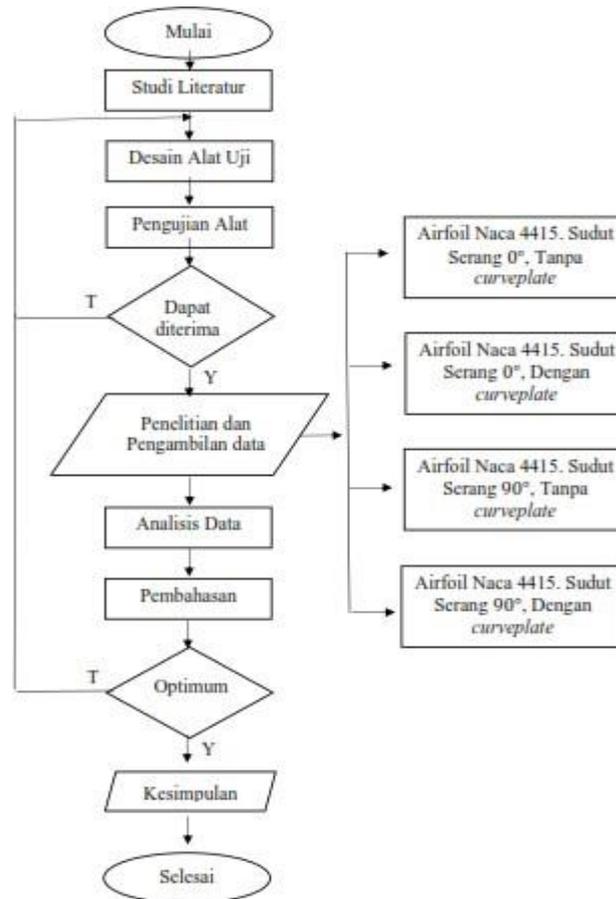
P_{generator} = Daya motor listrik (W)

V = tegangan motor listrik (V)

I = arus listrik (A) ⁽¹²⁾.

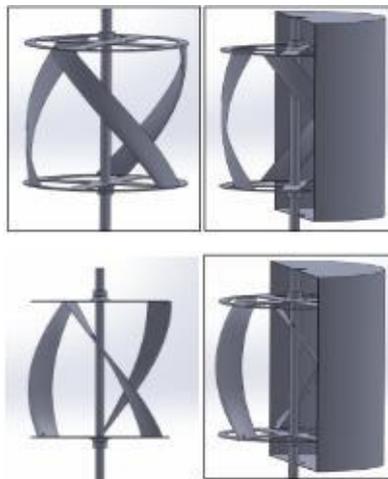
METODE

Diagram alir dalam penelitian ini ditunjukkan oleh gambar berikut:



Gambar 5. Diagram Alir Penelitian

Variasi sudut serang yang digunakan yaitu 0° dan 90° dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 6. Variasi Turbin

Spesifikasi turbin yang digunakan pada penelitian ini memiliki dimensi panjang chord 7cm, diameter blade 24cm, tinggi blade 30cm dan menggunakan airfoil naca 4415.

Alat dan Bahan Penelitian

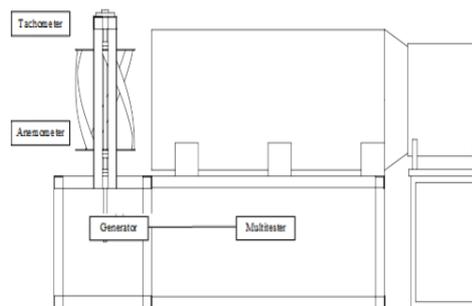
Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- a. DC Generator canon FH7-1860.
- b. Kipas portabel ventilator spechtek.
- c. Anemometer digital BENETECH GM816.
- d. Tachometer digital DT-2234C+.
- e. Multimeter digital Sinhwa DT9205A.

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Fiber, sebagai bahan pembuatan sudu turbin
- b. Aluminium sebagai bahan pembuatan spoke dan poros turbin.
- c. Triplek, sebagai bahan pembuatann *curveplate*.
- d. Galvanum, sebagai bahan pembuatan terowongan angin.

Skema penelitian dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 7. Skema Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif eksperimen yaitu metode dalam membuat penelitian secara sistematis dan akurat tentang fakta yang didapat dari penelitian. Dalam perhitungan data - data yang telah diambil akan diolah lebih lanjut dengan perhitungan menggunakan rumus-rumus yang diperlukan.

Teknik Analisis Data

Berikut rumus perhitungan yang akan digunakan dalam pengolahan data lebih lanjut:

- a. Rumus Daya

$$P = V \times I \dots\dots\dots(4)$$

Dimana:

P = Daya (W)

I = Kuat arus (A)

V = Beda potensial (V)

$$\lambda = \frac{U}{v} = \frac{\omega R}{v} \dots\dots\dots(5)$$

Dimana :

λ = Tip speed ratio

ω = Kecepatan sudut rotor (rad/s)

R = Jari-jari turbin (m)

v = Kecepatan angin (m/s)

b. Rumus Power Coefficient (Cp)

$$C_p = \frac{P_t}{P_w} = \frac{V \times I}{\frac{1}{2} \rho A v^3} \dots\dots(6)$$

Dimana :

C_p = Power Coefficient

P_t = Daya mekanik (W)

P_w = Daya kinetik (W)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengambilan data memvariasikan sudut serang 0° dan 90° tanpa *curveplate* maupun dengan penambahan *curveplate*. Untuk setiap variasi sudut serang 0° dan 90° tanpa maupun dengan penambahan *curveplate*. Dilakukan lima kali variasi kecepatan angin 3,2 m/s; 4,2 m/s; 5,2 m/s; 6,2m/s; dan 7,2 m/s. Data eksperimen yang akan disusun dalam bentuk tabel dan grafik. Grafik ini terdiri dari hubungan antar variabel yang diamati, yaitu kecepatan angin (v), putaran (n), arus listrik (I), voltase (V). Kemudian diolah untuk didapatkan hasil lebih lanjut untuk mendapatkan nilai daya, *power coefficient* (Cp), dan *tips speed ratio* (TSR).

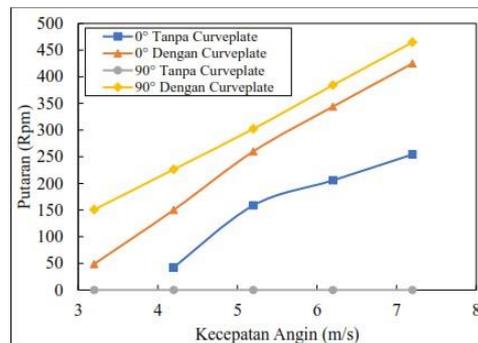
Data hasil penelitian turbin heliks gorlov dengan variasi sudut serang dan penambahan *curve plate* yang telah diolah akan dianalisa dan disajikan dalam bentuk grafik berikut:

Hubungan Variasi Sudut Serang terhadap Putaran Turbin

Tabel 1. Hasil Pengukuran Putaran

Kecepatan Awal (m/s)	Putaran, n (Rpm)			
	0° Tanpa Curve Plate	0° Dengan Curve Plate	90° Dengan Curve Plate	90° Dengan Curve Plate
3,2	0	48,7	0	150,7
4,2	42,3	150,3	0	226,3
5,2	158,7	260	0	302,3
6,2	205,7	344	0	384,3
7,2	254,3	425	0	464,7

Dari tabel diatas akan disajikan grafik sebagai berikut :

**Gambar 8. Grafik Hubungan Variasi Sudut Serang terhadap Putaran Turbin**

Putaran yang dihasilkan sesuai grafik menunjukkan bahwa variasi turbin sudut serang 90° dengan *curve plate* memiliki putaran paling tinggi disetiap variasi kecepatan angin. Hal itu dikarenakan gaya lift dan drag yang membantu turbin berputar lebih besar dan dengan adanya *curveplate* menghilangkan gaya yang menghambat perputaran turbin. Sedangkan variasi turbin sudut serang 0° tanpa *curveplate* memiliki putaran terendah di setiap variasi kecepatan angin. Hal itu disebabkan karena terdapat resultan gaya yang membantu turbin berputar dan adapula yang menghambat turbin berputar. Sehingga secara keseluruhan gaya yang memutar turbin lebih sedikit. Saat turbin berputar aliran yang melewati sudu pada setiap sudut azimuth selama perputaran akan menghasilkan sudut serang yang berbeda, hal ini menjadikan airfoil menghasilkan gaya lift dan drag yang berbeda⁽¹³⁾.

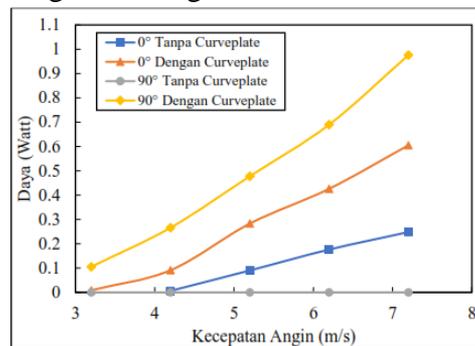
Putaran turbin dihasilkan oleh energi kinetik angin yang mengenai sudu kemudian diubah oleh turbin menjadi putaran. Grafik diatas menjelaskan bahwa putaran turbin meningkat seiring bertambahnya kecepatan angin. Peningkatan tersebut cenderung naik secara linear. Oleh karena itu dapat dikatakan bahwa kecepatan angin berbanding lurus dengan putaran yang dihasilkan, artinya dengan bertambahnya kecepatan angin yang diberikan, maka semakin besar pula hasil putaran turbin. Hal itu dikarenakan semakin besar energi yang diberikan oleh angin terhadap turbin maka semakin besar pula energi yang dapat dikonversikan turbin menjadi putaran⁽¹⁴⁾.

Hubungan Variasi Sudut Serang terhadap Daya Turbin

Tabel 2. Sudut Serang Terhadap Daya Turbin

Kecepatan Awal (m/s)	Daya (Watt)			
	0° Tanpa Curve Plate	0° Dengan Curve Plate	90° Dengan Curve Plate	90° Dengan Curve Plate
3,2	0	0,0084	0	0,105
4,2	0,006	0,091	0	0,266
5,2	0,09	0,283	0	0,4776
6,2	0,176	0,426	0	0,69
7,2	0,248	0,605	0	0,976

Dari tabel diatas akan disajikan grafik sebagai berikut:

**Gambar 9. Grafik Hubungan Variasi Sudut Serang Terhadap Daya Turbin.**

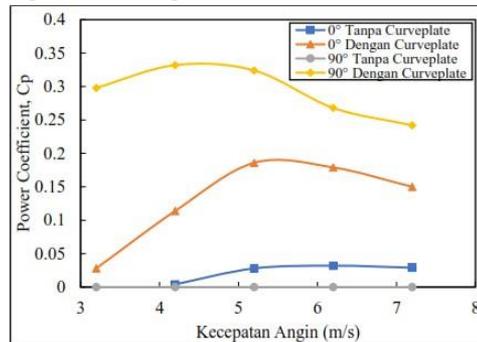
Dengan perubahan sudut serang gaya lift dan drag yang bekerja pada sudu akan berubah. Dengan sudut serang yang maksimal akan dapat menghasilkan daya turbin yang lebih besar. Untuk mengoptimalkan perangkat (turbin), sebuah variabel siklus sudut pitch harus diperhatikan dalam perhitungan. Tujuan utama pengaturan sudut pitch adalah untuk meningkatkan torsi dan menghilangkan gaya yang tidak produktif, hal itu untuk memperlancar gaya selama rotasi turbin dan untuk mengendalikan awal kavitasi ⁽¹⁵⁾

Gambar 9 menunjukkan seiring bertambahnya kecepatan angin maka daya yang dihasilkan juga meningkat. Dapat kita lihat peningkatan daya seiring bertambahnya kecepatan pada grafik diatas cenderung naik secara linear. Hal ini sama seperti kenaikan putaran. Oleh karena itu dengan bertambahnya kecepatan maka semakin tinggi putaran turbin yang dihasilkan dan akan menghasilkan daya yang semakin besar. Kecepatan angin berbanding lurus dengan daya listrik yang dihasilkan, artinya semakin besar kecepatan angin, maka semakin besar daya listrik yang dihasilkan. Kenaikan kecepatan angin menyebabkan peningkatan putaran pada turbin dan peningkatan putaran pada generator ⁽¹⁴⁾.

Hubungan Variasi Sudut Serang terhadap Koefisien Daya Turbin Tabel 3. Sudut Serang Terhadap Koeffisien Daya

Kecepatan Awal (m/s)	Power Coefficient (Cp)			
	0° Tanpa Curve Plate	0° Dengan Curve Plate	90° Dengan Curve Plate	90° Dengan Curve Plate
3,2	-	0,023	0	0,298
4,2	0,004	0,114	0	0,332
5,2	0,029	0,186	0	0,324
6,2	0,034	0,179	0	0,268
7,2	0,030	0,15	0	0,242

Dari tabel diatas akan disajikan grafik sebagai berikut:



Gambar 10. Grafik Hubungan Variasi Variasi Sudut Serang Terhadap Koeffisien Daya Turbin.

Turbin variasi sudut serang 90° dengan menggunakan *curve plate* memiliki *power coefficient* tertinggi diantara 2 variasi turbin lainnya. Pada kecepatan 3,2 turbin variasi ini menghasilkan *power coefficient* 0,298 yang bahkan lebih tinggi dari 2 variasi turbin lainnya pada titik maksimal *power coefficient* yang dihasilkan. *Power coefficient* tertinggi dihasilkan pada kecepatan 4,2 m/s dengan nilai 0,332. Setelah itu penambahn kecepatan angin mengakibatkan *power coefficient* turun.

Dari ketiga variasi yang diujikan turbin dengan sudut serang 90° dengan *curve plate* memiliki koefisien daya paling besar pada semua kecepatan. Berbeda dengan daya dan putaran yang selalu meningkat pada setiap penambahan kecepatan angin. Pada *power coefficient* turbin penambahan kecepatan membentuk garis parabolik dimana pada kecepatan tertentu menghasilkan nilai tertinggi, setelah itu penambahan kecepatan angin akan mengakibatkan *power coefficient* menurun.

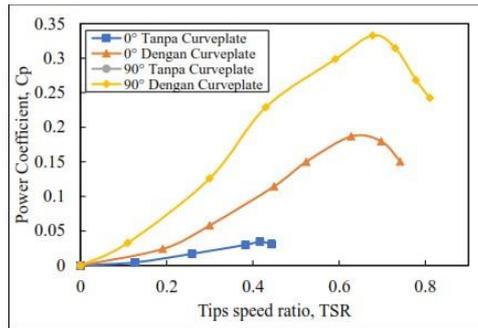
Koefisien daya merupakan kemampuan turbin dalam mengkonversi energi angin. Kurva lengkung yang terjadi diakibatkan oleh penambahan kecepatan angin. Dengan bertambahnya kecepatan daya yang dihasilkan juga meningkat, namun nilai *power coefficient* belum tentu meningkat. Hal tersebut dikarenakan daya yang dihasilkan generator tidak bisa mengimbangi peningkatan daya secara teoritis.

Daya listrik yang dihasilkan akan lebih kecil jika dibandingkan dengan daya teoritis angin, faktor yang mempengaruhi di antaranya adalah faktor gesekan yang terjadi pada turbin, efisiensi transmisi dan efisiensi generator, oleh karena itu daya yang dihasilkan oleh turbin

tersebut menjadi lebih kecil ⁽¹⁴⁾.

Hubungan Variasi Sudut Serang terhadap *Power coefficient* dan *Tips speed ratio*

Berikut akan disajikan grafik hubungan *power coefficient* -*tips speed ratio* turbin heliks gorlov dengan variasi sudut serang dan penambahan *curve plate*.

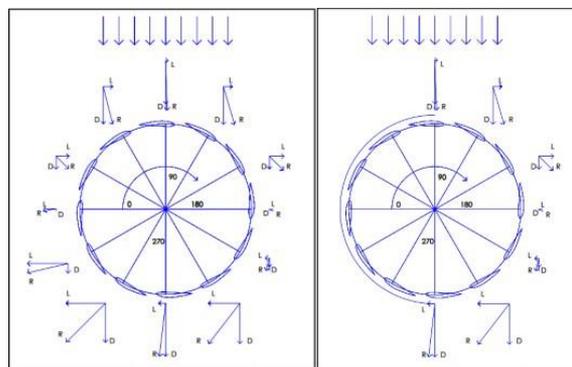


Gambar 11. Grafik Hubungan *power coefficient* dan *tips speed ratio*

Grafik *power coefficient* -*Tips speed ratio* menunjukkan kinerja turbin seiring bertambahnya *tips speed ratio* hingga ditemukan titik maksimal *power coefficient* turbin pada nilai TSR yang ditempati. Gambar 11 menunjukkan turbin dengan variasi 0° tanpa *curve plate* memiliki *power coefficient* tertinggi dalam parabolik pada TSR 0,416 dengan nilai Cp 0,034. Turbin variasi 0° menggunakan *curve plate* memiliki titik tertinggi sekitar TSR 0,628 dengan nilai Cp 0,186. Sedangkan variasi 90° menggunakan *curve plate* memiliki *power coefficient* tertinggi pada TSR 0,67 dengan nilai Cp sebesar 0,332.

Nilai *tips speed ratio* merupakan perbandingan kecepatan putaran turbin dan kecepatan angin yang melewatinya. Oleh karena itu nilai *tips speed ratio* juga merupakan bagian penilaian penting yang diperhatikan dalam pembuatan turbin angin. *Tips speed ratio* berhubungan dengan efisiensi untuk mencari variasi optimal desain sudu. Jika rotor turbin angin berputar terlalu lambat sebagian besar angin akan lewat tanpa terganggu melalui celah antara bilah rotor. Atau jika rotor berputar terlalu cepat bilah yang berputar akan tampak seperti dinding yang kokoh pada angin. Oleh karena itu turbin dirancang dengan *tips speed ratio* yang optimal untuk mengekstrak sebanyak mungkin tenaga dari angin ⁽¹⁶⁾.

Analisis gaya lift dan drag yang bekerja pada turbin sudut serang 0° dapat dilihat pada Gambar 12 berikut:

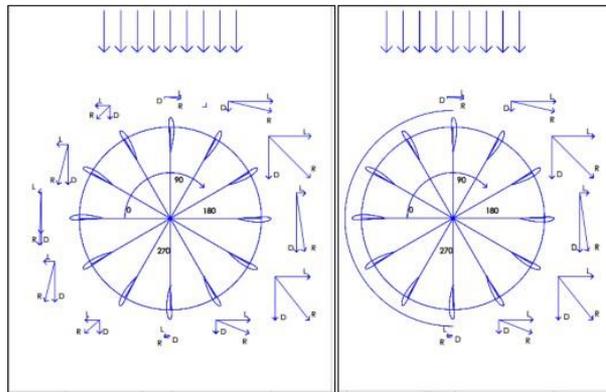


Gambar 12. Analisis Gaya Lift dan Drag Turbin Variasi Sudut Serang 0° Tanpa

Curveplate dan Dengan Curveplate

Dari Gambar 12 dapat kita lihat gaya lift dan drag yang bekerja saat angin mengenai sudu turbin variasi sudut serang 0° . Pada sudut azimuth 90° hingga 360° resultan gaya yang dihasilkan searah dengan putaran turbin. Dan pada sudut azimuth 0° hingga 90° terdapat resultan gaya yang menghambat perputaran turbin. Oleh karena itu turbin dengan variasi sudut serang 0° tanpa *curveplate* memiliki nilai *power coefficient* yang rendah karena adanya hambatan pada saat turbin berputar. Sedangkan turbin variasi sudut pitch 0° menggunakan *curveplate* dapat menghasilkan *power coefficient* yang lebih tinggi dibandingkan tanpa *curveplate* dikarenakan gaya yang menghambat putaran terhapuskan dengan adanya *curveplate*.

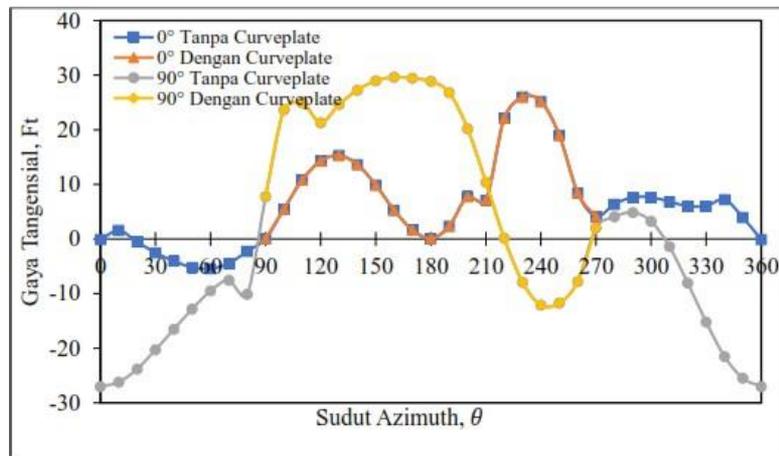
Adapun penjelasan lain yang dapat menunjukkan kinerja turbin variasi sudut serang 90° menggunakan *curveplate* dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 13. Analisis Gaya Lift dan Drag Turbin Variasi Sudut Serang 90° Tanpa Curveplate dan Dengan Curveplate

Gambar 13 menunjukkan gaya lift dan drag yang bekerja saat angin melewati sudu turbin. Gaya lift dan drag pada turbin variasi sudut serang 90° menghasilkan resultan gaya yang searah dengan perputaran turbin pada sudut azimuth 90° hingga 270° . Namun pada saat sudut azimuth 270° hingga 90° resultan gaya yang terjadi justru menghambat putaran turbin karena berlawanan arah dengan putaran turbin. Dalam hal ini fungsi dari *curveplate* pada turbin yaitu menghilangkan gaya yang menghambat putaran saat sudut azimuth 90° hingga 270° . Dengan penambahan *curveplate*, turbin variasi sudut serang 90° dapat menghasilkan resultan gaya yang membantu putarannya menghilangkan gaya yang menghambat putaran. Oleh karena itu daya angin yang dapat diekstrak menjadi daya turbin lebih maksimal dan menghasilkan *power coefficient* yang lebih baik.

Dalam hal ini membuktikan dengan penambahan *curveplate* dapat meningkatkan nilai *power coefficient* pada turbin dikarenakan gaya yang menghambat putaran turbin hilang dengan adanya *curveplate*. Secara keseluruhan perbandingan antara turbin variasi sudut serang 0° dan 90° menggunakan *curveplate* adalah besar gaya tangensial yang dihasilkan. Besar nilai gaya tangensial yang dihasilkan saat turbin berputar akan disajikan dalam gambar 14 berikut:



Gambar 14. Nilai Gaya Tangensial Terhadap Sudut Azimuth Turbin.

Turbin variasi sudut serang 0° pada saat sudut azimuth 150° sampai 210° memiliki nilai lift yang besar namun gaya tangensial yang dihasilkan kecil. Hal itu dikarenakan resultan gaya yang terbentuk tidak mendekati arah putaran turbin sehingga nilai gaya tangensial yang dihasilkan kecil. Saat sudut azimuth 220° sampai 250° turbin variasi sudut serang 0° memiliki nilai gaya tangensial yang besar dikarenakan resultan gaya nya mendekati arah putaran turbin. Untuk turbin variasi sudut serang 0° nilai gaya tangensial negatif hanya terjadi pada posisi sudut azimuth 0° sampai 90° saja.

Sedangkan turbin dengan variasi sudut serang 90° memiliki nilai gaya tangensial yang besar saat sudut azimuth 150° sampai 200° . Hal itu dikarenakan saat sudut azimuth tersebut resultan gaya lift dan drag yang bekerja mendekati arah putaran turbin pada garis lingkarannya, sehingga gaya tangensial yang dihasilkan besar. Seiring perputaran turbin variasi 90° memiliki nilai gaya tangensial negatif yang besar pula pada sudut azimuth 260° hingga 300° . Namun dengan gaya negatif tersebut dapat dihilangkan dengan penambahan *curveplate*.

Tabel 4. Hasil Daya, Putaran, dan Gaya Tangensial Variasi Turbin Pada Kecepatan Angin 5,2 m/s

Besaran	Variasi Sudut Serang			
	0° Tanpa <i>Curve Plate</i>	0° Dengan <i>Curve Plate</i>	90° Dengan <i>Curve Plate</i>	90° Dengan <i>Curve Plate</i>
Putaran (rpm)	158,7	260	0	302,3
Daya (Watt)	0,09	0,283	0	0,4776
Gaya Tangensial (N)	227,2	198,6	26,1	266,5

Dalam perhitungan total gaya tangensial turbin variasi sudut serang 0° tanpa *curveplate* lebih besar dari turbin variasi sudut serang 0° menggunakan *curveplate*. namun secara hasil pengujian daya dan putaran variasi sudut serang 0° menggunakan *curveplate* memiliki hasil daya dan putaran yang lebih besar. Hal itu dikarenakan faktor turbulensi aliran yang mempengaruhi nilai gaya lift dan drag pada sudu, sehingga sudu memiliki nilai drag yang lebih besar dibandingkan gaya lift nya. Dalam simulasi perhitungan gaya tangensial hanya disimulasikan airfoil naca 4415 secara 2 dimensi, namun pada pengujian langsung sudu turbin yang digunakan berbentuk heliks, hal ini juga menjadi salah satu faktor yang menjadikan aliran angin saat mengenai sudu menjadi lebih turbulen. Sehingga memungkinkan gaya drag yang dihasilkan lebih besar. Variasi sudut serang 90° tanpa *curveplate* dalam pengujian langsung menghasilkan putaran dan daya 0° , dikarenakan tidak dapat berputar.

Dalam perhitungan nilai gaya tangensial turbin variasi sudut serang 90° tanpa *curveplate* memiliki total nilai gaya tangensial positif 26,1 N. Namun hal itu belum mampu membuat turbin berputar dengan stabil karena masih adanya faktor- faktor yang menghambat turbin atau memberikan beban pada turbin.

Dalam Gambar 4.7 dapat kita lihat besar gaya tangensial yang dihasilkan oleh turbin variasi sudut serang 90° menggunakan *curveplate*. dalam posisi sudut azimuth 90° hingga 210° terdapat nilai yang besar. Walaupun nilai gaya tangensial variasi sudut serang 0° pada sudut azimuth 90° hingga 360° bernilai positif atau membantu perputaran turbin, namun besar nilai gaya tangensial secara keseluruhan, turbin variasi sudut serang 90° menggunakan *curveplate* memiliki nilai yang lebih besar. Oleh karena itu *power coefficient* yang dihasilkan juga lebih besar.

SIMPULAN

Dengan perubahan sudut serang, gaya lift dan drag yang bekerja seiring perputaran turbin juga berubah. Gaya lift dan drag akan membentuk resultan yang dapat membantu putaran maupun menghambat putaran. Turbin variasi sudut serang 90° menggunakan *curveplate* memiliki hasil daya yang terbesar diantara semua variasi dikarenakan gaya yang menghambat perputaran hilang dengan penambahan *curveplate*. sedangkan turbin variasi sudut serang 90° tanpa *curveplate* tidak dapat berputar dikarenakan adanya hambatan yang besar pada setengah sudut azimuth. Turbin variasi sudut serang 0° menggunakan *curveplate* secara hasil daya memiliki hasil yang lebih baik dari tanpa *curveplate*. namun secara simulasi hasil gaya tangensialnya lebih besar. turbulensi aliran dan profil heliks sudu belum termasuk dalam perhitungan simulasi. Faktor turbulensi aliran dapat mempengaruhi gaya lift dan drag yang bekerja pada sudu.

DAFTAR PUSTAKA

- Culp, Archie W., 1991. *Prinsip Prinsip Konversi Energi*. Jakarta: Erlangga. Terjemahan: Principles of Energy Conversion. 1979. McGraw-Hill, Ltd
- Kompas. 2007. “Pengembangan Energi Angin Memungkinkan”, <http://www.energi.lipi.go.id/utama.cgi?cetakartikel&1177294977>, diakses pada tanggal 10 april 2017 pukul 10.27
- Martinus. et al. 2011. *Analisis Fenomena Penampang Alir Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) Tipe Heliks Terhadap Kecepatan Angin Sebagai Pembangkit Listrik Alternatif Berskala Rumah Tangga*. Lampung: Universitas Lampung.
- Niblick, Adam L. 2012. *Experimental and Analytical Study of Helical Cross-Flow Turbines for a Tidal Micropower Generation System. Thesis*. University of Washington. Washington.
- Bagar, K. H. et al. 2013. *Pembangkit Listrik Tenaga Angin dengan Inovasi Turbin Heliks Vertikal untuk Kemandirian Energi Sekolah Daerah Pesisir*. Surabaya: ITS
- Sudargana. R. Guruh Kis Yuniarso. *Analisa Perancangan Turbin Darrieus Pada Hydrofoil Naca 0015 Dari Karakteristik CL dan CD Pada Variasi Sudut Serang Menggunakan Regresi Linear Pada MATLAB*. Semarang: Rotasi
- Habibie, M Najib. 2011. *Kajian Potensi Energi Angin di Wilayah Sulawesi dan Maluku*. Jakarta: Puslitbang BMKG
- Pangaribuan, Lenni Pabrina. 2015. *Pengaruh Jumlah Sudu Turbin Angin Sumbu Tegak (TAST) Terhadap Daya Dan Efisiensi Turbin*. Bogor. Institut Pertanian Bogor.
- Hau, Erick. 2000. *Wind Turbines*. Translated by Renouard, Horst von. 2013. London: Springer-Verlag.
- Bayu, Aditya Indra. 2012. *Desain Vertical Axis Wind Turbine Tipe Savonius Optimalisasi Kecepatan Angin Rendah*. Jakarta: Universitas Indonesia
- Susanto, Andi. et al. 2015. *Studi Eksperimen Pengaruh Sudut Serang Terhadap Performa Turbin Angin Sumbu Horizontal*. Surakarta. Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Farid, Ahmad. 2014. *Optimasi Daya Turbin Angin Savonius Dengan Variasi Celah dan Perubahan Jumlah Sudu*. Tegal: Universitas Pancasakti Tegal.
- Bianchini, Alessandro. et al. 2015. *Pitch Optimization in Small-size Darrieus Wind Turbines*. Italy: Energy procedia.
- Aryanto, Firman. et al. 2013. *Pengaruh Kecepatan Angin dan Variasi Jumlah Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Poros Vertikal*. Mataram: Dinamika Teknik Mesin
- Paillard, B. et al. 2015. *URANSE Simulation of An Active Variabel- Pitch Cross-Flow Darrieus Tidal Turbine: Sinusoidal Pitch Function Investigation*. Irenav: Institut de Recherche de l’Ecole Navale.
- Reuk. 2017. *Wind Turbine Tips Speed Ratio*. <http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/wind-turbine-tip-speed-ratio/>, diakses pada tanggal 7 maret 2018 pukul 21.37.