

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

Muhammad Faadhil¹, Karnowo², Samsudin Anis³

^{1,2,3}Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang
Email: fk.fadhil26@gmail.com

Abstrak. Pada masa sekarang sumber energi yang sering digunakan berasal dari bahan bakar fosil yang menimbulkan efek pencemaran terhadap lingkungan. Untuk itu perlu dilakukan pengembangan pada energi terbarukan. Pengembangan tersebut bisa disalurkan melalui turbin angin. Salah satunya melalui turbin heliks Gorlov. 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*. Perubahan sudut serang mengakibatkan gaya lift dan drag yang bekerja pada sudu berubah. Sudut serang yang tepat dapat memberikan lebih banyak gaya positif yang membantu turbin berputar. Berdasarkan hasil penelitian yang diujikan, nilai power coefficient turbin variasi sudut serang 90° dan penambahan *curveplate* mencapai 0,33 pada TSR 0,677. Sedangkan nilai power coefficient turbin variasi sudut serang 0° tanpa *curveplate* hanya 0,034 pada TSR 0,416. Data tersebut menunjukkan bahwa perubahan sudut serang dan penambahan *curveplate* dapat memberikan hasil power coefficient yang lebih baik.

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

PENDAHULUAN

Penggunaan terhadap energi fosil yang memberikan efek pencemaran terhadap lingkungan, maka dari itu 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.

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. Indonesia sebagai negara kepulauan mempunyai potensi cukup besar akan energi angin, oleh

karena itu pengembangan sumber energi terbarukan dilakukan melalui turbin angin.

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 rentang nya.

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.

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. Pada umumnya konsep konsep gaya angkat (*Lift*) dan gaya hambat (*Drag*) digunakan pada *airfoil*.

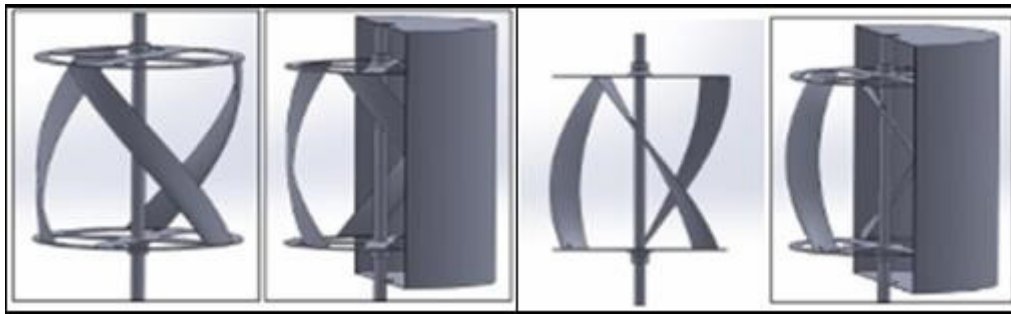
Pada turbin angin sumbu vertikal, gaya *drag* tidak selalu bernilai negatif atau menghambat perputaran turbin. Dalam turbin sumbu vertikal, gaya *drag* sebenarnya bisa memberikan torsi positif yang dapat membantu rotasi. Dengan merubah sudut serang 90° akan merubah turbin menggunakan sisi dalam *airfoil* dan dapat memanfaatkan gaya *drag* yang bernilai positif. Penambahan *curveplate* yang berupa lengkungan plat berbentuk setengah lingkaran bertujuan untuk menutupi setengah bagian turbin heliks. Perubahan sudut serang pada sudu turbin dapat mempengaruhi *power coefficient* turbin tersebut. Hal itu dikarenakan pada sudut serang tertentu dihasilkan koefisien *lift* yang besar, sehingga dapat menghasilkan gaya *lift* yang besar pada sudu. Sudut serang turbin yang tepat dapat menghasilkan daya yang maksimal.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kinerja yang dihasilkan turbin dengan perubahan sudut serang dan penambahan *curveplate* pada beberapa variasi kecepatan angin. Diharapkan penelitian ini dapat menjadi referensi dalam pemilihan sudut serang yang tepat untuk turbin angin tipe heliks Gorlov dengan menyajikan data hasil eksperimen dan dapat berkontribusi dalam penelitian dan pengembangan IPTEKS, khususnya mengenai turbin angin tipe heliks Gorlov.

METODE

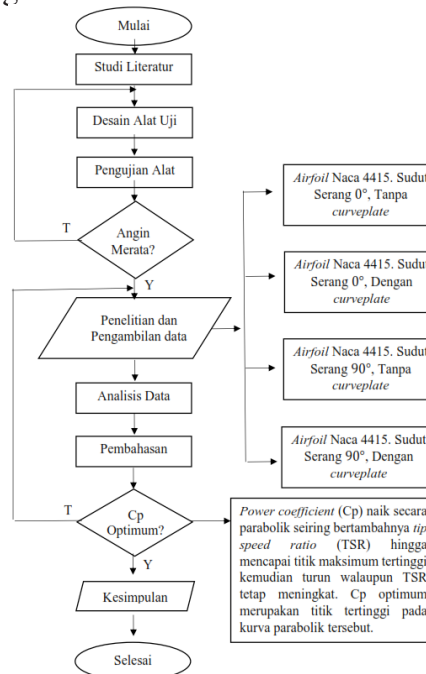
Penelitian ini menggunakan metode deskriptif eksperimen yaitu metode dalam membuat penelitian secara sistematis dan akurat tentang fakta yang didapat dari penelitian. Variasi sudut

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



Gambar 1. 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. Diagram alir dalam penelitian ini ditunjukkan oleh gambar berikut:



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Alat dan Bahan Penelitian

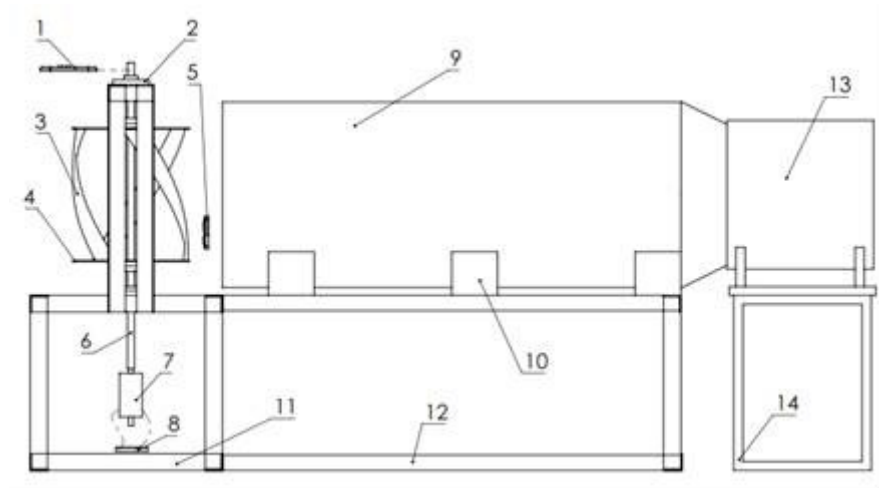
Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- DC Generator canon FH7-1860.
- Kipas portabel ventilator spechtek.
- Anemometer digital Generic.
- 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 pembuatan *curveplate*.
 - d. Galvanum, sebagai bahan pembuatan terowongan angin.
- Skema penelitian dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 3. Skema Penelitian

Keterangan:

- | | |
|---------------------|------------------------|
| 1. Tachometer | 8. Multimeter |
| 2. Bearing | 9. Terowongan |
| 3. Blade | 10. Dudukan terowongan |
| 4. <i>Spoke Arm</i> | 11. Rangka Turbin |
| 5. Anemometer | 12. Rangka terowongan |
| 6. Poros Turbin | 13. Blower |
| 7. Generator | 14. Dudukan Blower |

Dalam perhitungan data - data yang telah diambil akan diolah lebih lanjut dengan perhitungan menggunakan rumus-rumus yang diperlukan. Rumus perhitungan yang akan digunakan dalam pengolahan data adalah sebagai berikut.

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*).

Dimana :

λ = *Tip speed ratio*

ω = Kecepatan sudut rotor (rad/s)

R = Jari-jari turbin (m)

v = Kecepatan angin (m/s).

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:

$$\lambda = \frac{U}{v} = \frac{\omega.R}{v} \dots\dots\dots(2)$$

Dimana:

$P_{generator}$ = Daya motor listrik (W)

V = tegangan motor listrik (V)

I = arus listrik (A) ⁽¹²⁾.

Efisiensi menunjukkan kemampuan turbin dalam mengekstraksi angin. Nilai efisiensi dalam turbin angin biasa disebut sebagai *power coefficient* (C_p). Rumus efisiensi yang digunakan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{generator}}{P_w} \times 100\% \dots\dots\dots(3)$$

Dimana:

η = efisiensi (%)

P_w = Daya *input* (W)

ρ = Densitas fluida (kg/m^3)

A = Luasan acuan (m^2)

v = Kecepatan fluida (m/s) ⁽¹³⁾.

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 den-

gan penambahan *curveplate*. Grafik ini terdiri dari hubungan antar variabel yang diamati, yaitu kecepatan angin (v), putaran (n), arus listrik (I), voltase (V), daya (W), *power coefficient* (C_p), dan *tips speed ratio* (TSR).

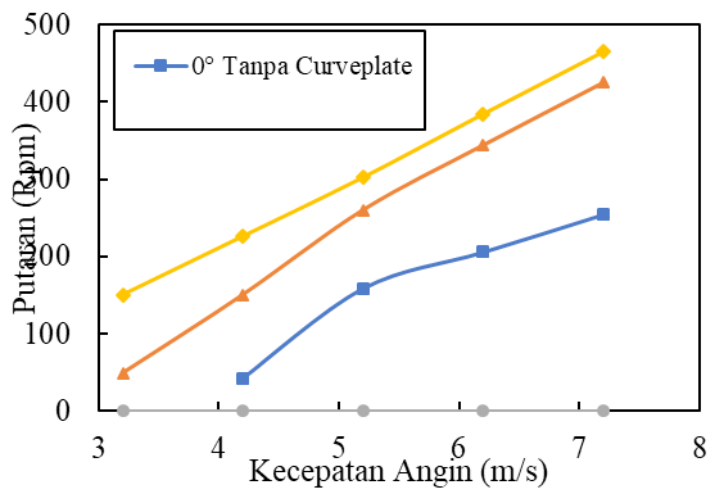
Data hasil penelitian turbin heliks gorlov dengan variasi sudut serang dan penambahan *curve plate* yang telah diolah akan dianalisa dan disajikan dalam bentuk grafik berikut.

Hubungan Variasi Sudut Serang terhadap Putaran Turbin

Tabel 1. Pengukuran Putaran Variasi Sudut Serang dan Kecepatan Angin

Kecepatan Awal (m/s)	Putaran, n (rpm)			
	0° Tanpa <i>Curve-plate</i>	0° Dengan <i>Curve-plate</i>	90° Tanpa <i>Curveplate</i>	90° Dengan <i>Curve-plate</i>
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 1 akan disajikan grafik sebagai berikut:



Gambar 4. Grafik Hubungan Variasi Kecepatan Angin dan Variasi Sudut Serang terhadap Putaran Turbin

Berdasarkan Tabel 1 dan Gambar 4 menunjukkan bahwa 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 mem-

bantu 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, ehingga 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.

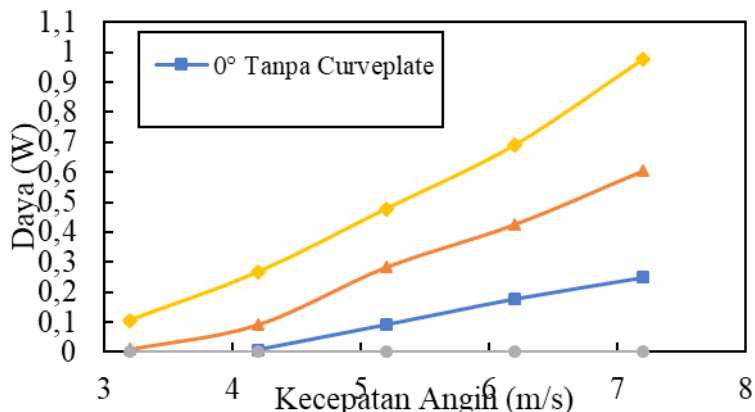
Putaran turbin dihasilkan oleh energi kinetik angin yang mengenai sudu kemudian diubah oleh turbin menjadi putaran. Grafik 4 menjelaskan bahwa putaran turbin meningkat seiring bertambahnya kecepatan angin. Peningkatan tersebut cenderung naik secara linear. Oleh karena itu dapat dikatakan bahwa kecepatan 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.

Hubungan Variasi Sudut Serang terhadap Daya Turbin

Tabel 2. Variasi kecepatan Angin dan Variasi Sudut Serang terhadap Daya Turbin

Kecepatan Awal (m/s)	Daya (W)			
	0° Tanpa <i>Curve-plate</i>	0° Dengan <i>Curve-plate</i>	90° Tanpa <i>Curveplate</i>	90° Dengan <i>Curve-plate</i>
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 2 akan disajikan grafik sebagai berikut:



Gambar 5. Grafik Hubungan Variasi Kecepatan Angin dan Variasi Sudut Serang Terhadap Daya Turbin

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.

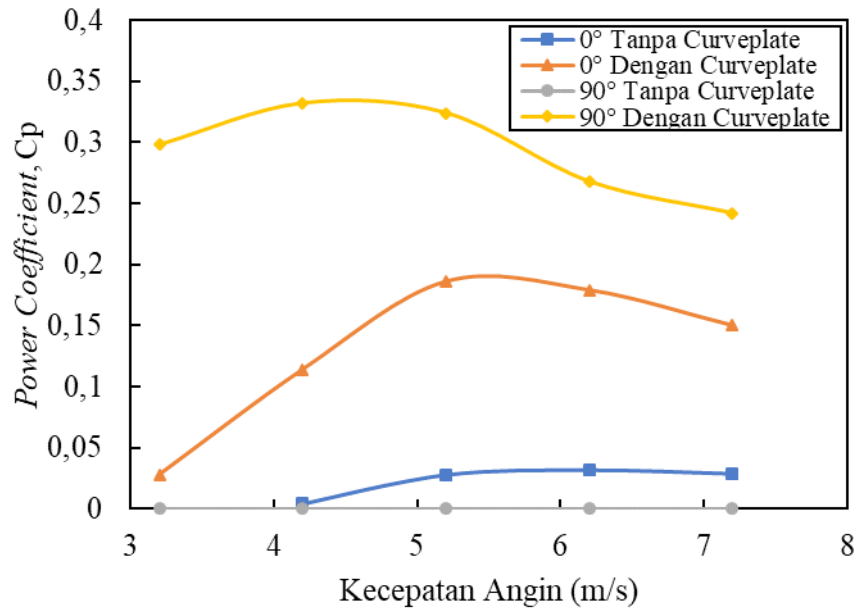
Gambar 5 menunjukkan seiring bertambahnya kecepatan angin maka daya yang dihasilkan juga meningkat. Dapat kita lihat peningkatan daya seiring bertambahnya kecepatan pada grafik diatas cenderung naik secara linear. Hal ini sama seperti kenaikan putaran. Oleh karena itu dengan bertambahnya kecepatan maka 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.

Hubungan Variasi Sudut Serang terhadap Koefisien Daya Turbin

Tabel 3. Variasi kecepatan Angin dan Variasi Sudut Serang terhadap *Power Coefficient* Turbin

Kecepatan Awal (m/s)	<i>Power Coefficient</i> (C_p)			
	0° Tanpa Curve-plate	0° Dengan Curve-plate	90° Tanpa Curveplate	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 3 akan disajikan grafik sebagai berikut:



Gambar 6. Grafik Hubungan Variasi Kecepatan Angin dan Variasi Sudut Serang terhadap Power Coefficient Turbin

Berdasarkan Tabel 3 dan Gambar 6 menunjukkan bahwa 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 penambahan 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.

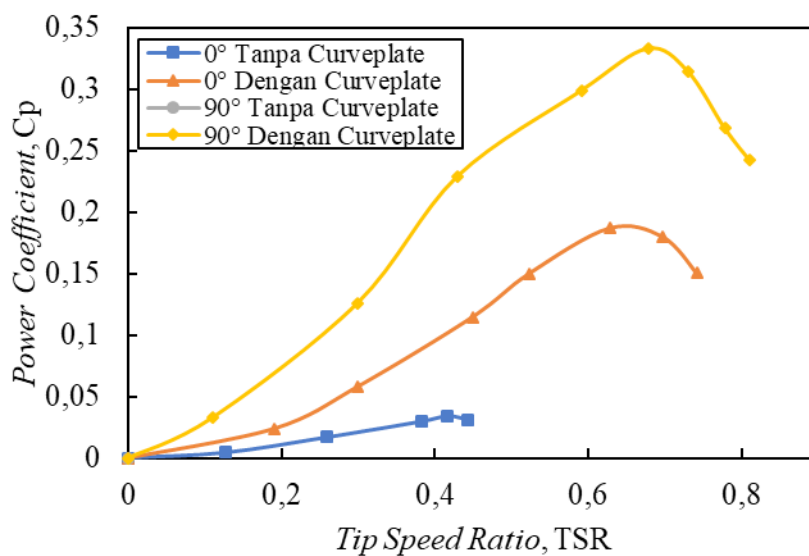
Koefisien daya merupakan kemampuan turbin dalam mengkonversi energi angin. Kurva lengkung yang terjadi diakibatkan oleh penambahan kecepatan angin. Dengan bertambahnya kecepatan daya yang dihasilkan juga meningkat, namun nilai *power coefficient* belum tentu me-

tingkat. 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.

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

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



Gambar 7. Grafik Hubungan Power Coefficient – Tip Speed Ratio

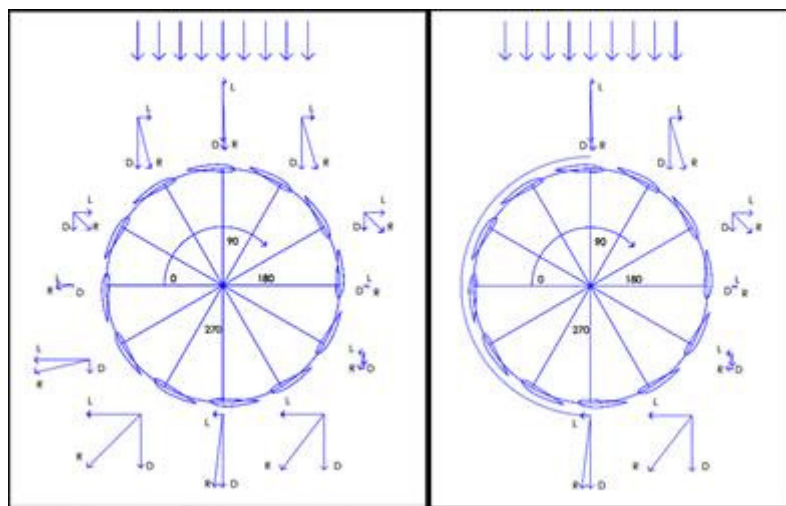
Grafik *power coefficient* - *tip speed ratio* menunjukkan kinerja turbin seiring bertambahnya *tip speed ratio* hingga ditemukan titik maksimal *power coefficient* turbin pada nilai TSR yang ditempati. Gambar 7 menunjukkan turbin dengan variasi 0° tanpa *curve plate* memiliki *power coefficient* tertinggi 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 *tip speed ratio* merupakan perbandingan kecepatan putaran turbin dan kecepatan angin yang melewatinya. Oleh karena itu nilai *tip speed ratio* juga merupakan bagian penilaian penting yang diperhatikan dalam pembuatan turbin angin. *Tip 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 *tip speed ratio* yang optimal untuk mengekstrak sebanyak mungkin tenaga dari angin.

Hubungan Variasi Sudut Serang dengan Gaya pada Turbin

Kinerja turbin angin dipengaruhi oleh gaya yang bekerja pada sudu. Dengan perubahan sudut serang akan merubah gaya *lift* dan *drag* yang bekerja pada sudu. Dengan menggunakan *software* Qblade 0.963 dapat diketahui besar nilai koefisien *lift* (C_L) dan koefisien *drag* (C_D) pada setiap sudut serang. Dengan menggunakan *airfoil* NACA 4415 nilai C_L dan C_D yang diperoleh dapat digunakan untuk menghitung besar *lift* dan *drag* yang bekerja pada sudu.

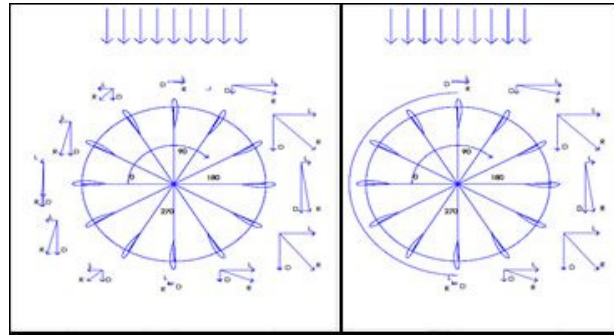
Analisis gaya *lift* dan *drag* yang bekerja pada turbin sudut serang 0. dapat dilihat pada Gambar 8 berikut:



Gambar 8. 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.

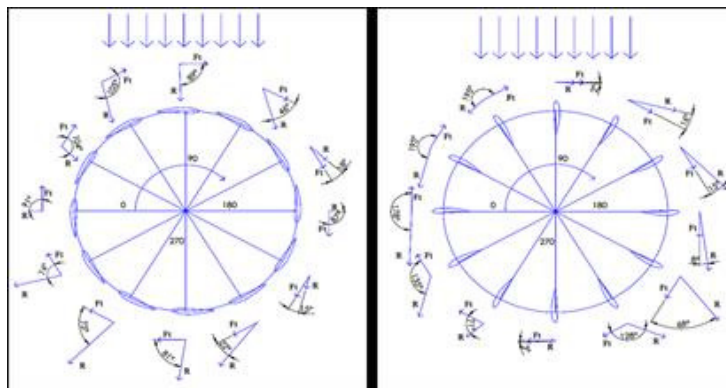
Adapun penjelasan lain yang dapat menunjukkan kinerja turbin variasi sudut serang 90. menggunakan curveplate dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 9. Analisis Gaya *Lift* dan *Drag* Turbin Variasi Sudut Serang 90°. Tanpa *Curveplate* dan Dengan *Curveplate*

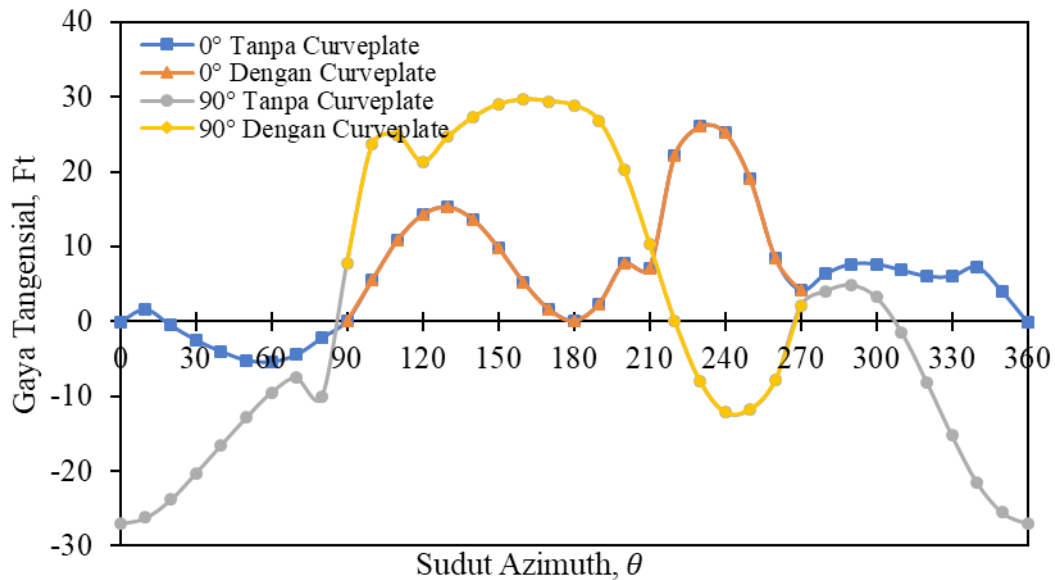
Gambar 9 menunjukkan gaya *lift* dan *drag* yang bekerja saat angin melewati sudu turbin. Gaya *lift* dan *drag* pada turbin variasi sudut serang 90°, menghasilkan resultan gaya yang searah dengan perputaran turbin pada sudut *azimuth* 90°, hingga 220°. Namun pada saat sudut *azimuth* 220°, hingga 90°, 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 putaran dan 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*. Gaya tangensial merupakan hasil perhitungan gaya *lift* dan *drag* kemudian membentuk resultan. Arah resultan yang terbentuk disesuaikan dengan arah turbin berputar pada setiap sudut *azimuth*. Lebih jelasnya konsep gaya tangensial dapat dilihat pada Gambar 10 berikut.



Gambar 10. Analisis Gaya Tangensial pada Turbin Variasi Sudut Serang 0° dan Turbin Variasi Sudut Serang 90°

Besar nilai gaya tangensial yang dihasilkan saat turbin berputar akan disajikan dalam Gambar 11 berikut.



Gambar 11. 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 lingkaranya, sehingga gaya tangensial yang dihasilkan besar. Seiring perputaran turbin variasi 90° memiliki nilai gaya tangensial negatif yang besar pula pada sudut *azimuth* 260° hingga 90°. 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% Tanpa <i>Curveplate</i>	90% Dengan <i>Curve-plate</i>
Putaran (rpm)	158,7	260	0	302,3
Daya (W)	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.

Berdasarkan Gambar 10 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

Perubahan sudut serang, gaya *lift* dan *drag* yang bekerja seiring perputaran turbin juga mengalami perubahan. Gaya *lift* dan *drag* akan membentuk resultan yang dapat membantu putaran maupun menghambat putaran. Turbin variasi sudut serang 0. menggunakan *curveplate* menunjukkan hasil daya dan *power coefficient* yang lebih baik dibandingkan variasi sudut serang 0. tanpa *curveplate* pada setiap variasi kecepatan angin. Nilai C_p terbesar turbin variasi sudut serang 0. tanpa *curveplate* sebesar 0,034 pada TSR 0,416. Sedangkan variasi sudut serang 0. menggunakan *curveplate* memiliki nilai C_p tertinggi 0,186 pada TSR 0,628. Namun secara simulasi hasil gaya tangensial turbin variasi sudut serang 0. tanpa *curveplate*

menunjukkan nilai yang lebih besar yaitu 227,2 N dibandingkan turbin variasi sudut serang 0°. menggunakan *curveplate* yang memiliki nilai gaya tangensial 198,6 N. Faktor turbulensi aliran dan profil sudu heliks dapat mempengaruhi gaya *lift* dan *drag* yang bekerja pada sudu. Hal ini memungkinkan hasil pengujian mengalami perbedaan dengan hasil simulasi perhitungan. Turbin variasi sudut serang 90°. menggunakan *curveplate* memiliki hasil daya yang terbesar diantara semua variasi dikarenakan gaya yang menghambat perputaran hilang dengan penambahan *curveplate*. Nilai C_p maksimal sebesar 0,332 saat TSR 0,67. Sedangkan turbin variasi sudut serang 90°. tanpa *curveplate* tidak dapat berputar dikarenakan adanya hambatan yang besar pada setengah sudut *azimuth*.

DAFTAR PUSTAKA

- Aryanto, F., Mara, I. M., dan Nuarsa, M. 2013. Pengaruh Kecepatan Angin dan Variasi Jumlah Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Poros Vertikal. *Dinamika Teknik Mesin*. 3(1): 50-59.
- Bagar, K. H., Wicaksono, W., Rohmadin, N. A., Prasetyawan, A, dan Rahman, A. 2013. Pembangkit Listrik Tenaga Angin dengan Inovasi Turbin Heliks Vertikal untuk Kemandirian Energi Sekolah Daerah Pesisir. *IEES*.
- Bayu, A. I. 2012. Desain Vertical Axis Wind Turbine Tipe Savonius Optimalisasi Kecepatan Angin Rendah. *Skripsi*. Program S1 Teknik Mesin Universitas Indonesia. Depok.
- Bianchini, A., Ferrara, G., and Ferrari, L. 2015. Pitch Optimization in Small-size Darrieus Wind Turbines. *Energy procedia*, 81: 122-132.
- Culp, A. W., 1979. *Prinsip Prinsip Konversi Energi*. Terjemahan Sitompul, Darwin. 1989. Jakarta: Erlangga.
- Farid, A. 2014. Optimasi Daya Turbin Angin Savonius Dengan Variasi Celah dan Perubahan Jumlah Sudu. *Prosiding SNST*. Vol. 5. Semarang: Universitas Wahid Hasyim
- Hau, E. 2000. *Wind Turbines*. Translated by Renouard, Horst von. 2013. London: Springer-Verlag.
- Herlambang, Y. D. 2012. Kaji Eksperimental Kinerja Turbin Angin Vertikal Multiblade Tipe Sudu Curved Plate Profile Dilengkapi Rumah Rotor dan Ekor Sebagai Pengarah Angin. *Prosiding SNST*. Vol 3. Semarang: Universitas Wahid Hasyim
- Hoffman, M. J., Ramsay, R. R., and Gregorek, G. M. 1996. Effect of Grit Roughness and Pitch Oscillations on the NACA 4415 Airfoil. *National Renewable Energy Laboratory*. 12(99): 1-22.
- Irawan, J. R. 2016. Analisis Desain Vertikal Wind Turbin Dengan Airfoil Naca 0016 Modified Menggunakan Software Ansys 14.5. *Universitas Muhammadiyah Surakarta*. Surakarta
- Kompas. 2007. *Pengembangan Energi Angin Memungkinkan*, <http://www.energi.lipi.go.id/utama.cgi?cetakartikel&1177294977>, diakses pada tanggal 10 April 2017)
- Kusbiantoro, A., Soenoko, R. dan Sutikno, D. 2013. Pengaruh Panjang Lengkung Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Poros Vertikal Savonius. *Universitas Brawijaya*. Malang
- Manwell, J. F., McGrown, J. G., and Rogers, A. L. 2002. *Wind Energy Explained – Theory, Design and Application*. United Kingdom.:Wiley.
- Martinus., Susila, M. D., dan Budiyo, M. 2011. Analisis Fenomena Penampang Alir Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) Tipe Heliks Terhadap Kecepatan Angin Sebagai Pembangkit Listrik Alternatif Berskala Rumah Tangga. *Jurnal Mechanical*. 2(2):1-10

- Niblick, A. L. 2012. Experimental and Analytical Study of Helical Cross-Flow Turbines for a Tidal Micropower Generation System. *Thesis*. Master Science in Mechanical Engineering University of Washington. Washington.
- Paillard, B., Astolfi, J. A., and Hauville, F. 2015. URANSE Simulation of An Active Variabel-Pitch Cross-Flow Darrieus Tidal Turbine: Sinusoidal Pitch Function Investigation. *International Journal of Marine Energy*. 11: 9-26.
- 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).
- Saleh, Z. 2014. Analisis Profil Blade Pada Turbin Gorlov. *Simposium Nasional Teknologi Terapan (SNTT)*, 2: 31-36.
- Sudargana, R., dan Yuniarso, G. K.. 2012. Analisa Perancangan Turbin Darrieus Pada Hydrofoil Naca 0015 Dari Karakteristik CL dan CD Pada Variasi Sudut Serang Menggunakan Regresi Linear Pada MATLAB. *Rotasi*, 14(1): 21-28.
- Susanto, A., Akhlis, N., dan Subroto. 2015. Studi Eksperimen Pengaruh Sudut Serang Terhadap Performa Turbin Angin Sumbu Horizontal. *Universitas Muhammadiyah Surakarta. Surakarta*.