

## **KAJIAN TEORITIS RANCANGAN BILAH KINCIR ANGIN HORIZONTAL MODIFIKASI NACA 4412, 4415, 23012, DAN 23015 SEBAGAI PENGHASIL ENERGI ALTERNATIF DI MANOKWARI**

THEORETICAL ANALYSIS OF MODIFIED HORIZONTAL WIND BLADES OF NACA 4412, 4415, 23012, AND 23015 AS ALTERNATIVE ENERGY PRODUCERS IN MANOKWARI

Rosalina Rosina Mirino\*, I Gede Deny Arsemaya Partadinova, Aries A. Subgan  
Jurusan Fisika, FMIPA  
Universitas Papua  
Email: [r.mirino@unipa.ac.id](mailto:r.mirino@unipa.ac.id)

### **ABSTRACT**

This study was aimed to produce a simulation of the design of windmill blades to obtain the greatest efficiency using the NACA Airfoil series 4412, 4415, 23012, and 23015, to estimate the power of the best efficiency design of the windmill blades on wind speed in Manokwari. Blade designs were made using the Qblade v0.91b program based on NACA 4412, 4415, 23012, and 23015 airfoils with a taper and taperless types. Blade design began with determining blade geometry and continued with design performance testing. Wind speed in Manokwari is classified based on the limit of effective wind occurring in 9 hours a day. The results showed that NACA 4412 and NACA 4415 were better than NACA 23012 and NACA 23015 with the efficiency of each blade reaching 49%. The NACA 4412 series with a taper type produced an average total power per month of 168.38 kW and a taperless of 196.93 kW from an average number of potential wind speeds of 9.35 m/s for 26 days. The NACA 4415 blade of the taper type produced 164.8 kW of power while the taperless blade was 192.73 kW for the same average number of wind potentials. Based on the amount of power generated, the taperless type in the 4412 series was the best blade for wind speed in Manokwari.

Keywords: Blade Design, NACA Airfoil, Wind Speed, Power

---

### **PENDAHULUAN**

Saat ini potensi energi terbarukan yang dimanfaatkan, sangat mendapatkan perhatian di kalangan ilmuwan dan sektor industri akibat krisis energi. Hal ini dikarenakan menipisnya bahan bakar fosil yang tersedia di alam. Di sisi lain sebagian besar kota di Indonesia, masih menggunakan pembangkit listrik tenaga fosil yaitu minyak dan gas bumi sebagai energi utama (Syahrul, 2008). Efek negatif dari pemanfaatan bahan

bakar fosil memberikan pengaruh berupa polusi udara dan naiknya temperatur bumi (Herlambang, 2013). Berdasarkan keadaan ini, diupayakan penggunaan sumber energi baru dan terbarukan yang berwawasan lingkungan, sebagai salah satu cara penyelesaian masalah tersebut.

Salah satu bentuk energi terbarukan yang berwawasan lingkungan yaitu energi angin. Lokasi pemanfaatan energi angin biasanya dilakukan pada dataran landai,

dataran tinggi, dan di laut. Identifikasi lokasi yang memiliki potensi energi angin yang tinggi perlu dilakukan sehingga pemanfaatan energi angin lebih kompetitif apabila dibandingkan dengan energi alternatif lain (Daryanto, 2007). Menurut data dari WWEA (*World Wind Energy Association*), energi listrik yang bersumber dari turbin angin pada akhir tahun 2007 mencapai 93,85 Giga Watt yang melebihi 1% jumlah listrik global. Pada tahun 2010 diharapkan total kapasitas pembangkit listrik tenaga angin global dapat mencapai 170 Giga Watt. Potensi energi angin di Indonesia cukup memadai karena Indonesia memiliki kecepatan angin rata-rata sekitar 3,5-7m/s (Pradana *et al*, 2013).

Energi angin yang diubah menjadi energi listrik menggunakan turbin angin. Turbin angin merupakan kincir angin yang dimanfaatkan sebagai pembangkit energi listrik. Pada awalnya turbin angin dibuat untuk membantu menyelesaikan masalah kebutuhan para petani diantaranya dalam proses penggilingan padi dan irigasi. Turbin angin pada dasarnya memiliki prinsip kerja sebagai berikut energi angin diubah menjadi energi mekanik pada kincir, kemudian hasil putaran kincir digunakan sebagai penggerak generator yang menghasilkan listrik.

Pembuatan turbin angin melalui perancangan bilah menjadi bagian utama peningkatan daya turbin angin. Daya turbin angin menggunakan *Airfoil National Advisory Committee for Aeronautics (NACA)*. Secara umum, *Airfoil NACA* dikelompokkan menjadi beberapa model antara lain seri 4 digit, seri 5 digit, seri-1 (seri 16), seri 6, seri 7, seri 8. Dalam penelitian ini *Airfoil NACA* yang digunakan adalah seri 4 digit dan seri 5 digit yaitu 4412, 4415, 23012 dan 23015. Perancangan bilah kincir angin menggunakan simulasi pada aplikasi *Qblade v0.91b* (Marthen, 2013).

Manokwari merupakan ibukota Provinsi Papua Barat yang berada di timur Indonesia, dengan luas wilayah 3168,28 km<sup>2</sup> dan jumlah penduduk mencapai

192.663 Jiwa (BPS, 2021). Kebutuhan terhadap energi listrik masih bertumpu pada pembangkit listrik tenaga disel. Berdasarkan pada laju pertumbuhan penduduk dan ekonomi maka pemenuhan kebutuhan energi di Manokwari perlu ditingkatkan. Menurut Rehiara (2010) daerah pesisir Pantai Utara Manokwari memiliki potensi pendayagunaan pembangkit listrik tenaga angin.

Tujuan dari penelitian ini yaitu menghasilkan simulasi rancangan bilah kincir angin untuk memperoleh efisiensi terbesar terhadap 4 seri *Airfoil NACA* 4412, 4415, 23012, 23015 dan mengestimasi daya dari rancangan bilah kincir angin dengan efisiensi terbaik berdasarkan kecepatan angin di Manokwari.

## METODE PENELITIAN

### Data Kecepatan Angin dan Sumber Data

Data kecepatan angin yang digunakan adalah data sekunder kecepatan angin harian kota Manokwari. Sumber data berasal dari *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)* dengan rentang data selama 8 tahun (2008-2015)

### Prosedur Kerja

Pada penelitian ini dilakukan simulasi rancangan bilah kincir angin pada kecepatan angin maksimum 12 m/s. Perancangan pada aplikasi *QBlade v0.91b* seri NACA yang digunakan adalah seri 4412, 4415, 23012, dan 23015 (Marten, 2013)

### Perancangan Bilah

Pada tahap awal bilah dirancang dengan menggunakan 3 kapasitor energi listrik maksimum yang diperoleh dari kincir. Perancangan bilah ini dilakukan menurut kebutuhan setiap pendesain. Kincir angin merupakan suatu sistem yang terpadu dimana pada pendesainan kincir angin terdapat hubungan terkait antara bilah, transmisi, generator, dan *controller*. Salah satu nilai penghubung komponen-komponen tersebut adalah efisiensi. Diketahui efisiensi bilah maksimum (*Betz Limit*) adalah 59% dengan nilai kisaran efisiensi bilah yaitu

15% (*Holland type*) sampai 40% (*Propeller type*). Nilai efisiensi bilah, transmisi, generator, dan *controller* diasumsikan bahwa telah diketahui nilainya sehingga efisiensi sistem kincir angin dapat dihitung dengan rumus (LAN, 2015),

$$K = \eta_{bilah} \times \eta_{transmisi} \times \eta_{generator} \times \eta_{controller} \quad (1)$$

K adalah efisiensi sistem kincir angin,  $\eta_{bilah}$  adalah efisiensi bilah,  $\eta_{transmisi}$  adalah efisiensi transmisi,  $\eta_{generator}$  adalah efisiensi generator dan  $\eta_{controller}$  adalah efisiensi *controller*.

Nilai efisiensi sistem kincir angin setelah ditentukan, kemudian dilanjutkan dengan menghitung energi angin yang diharapkan dengan rumus (LAN, 2015),

$$W_a = \frac{W_e}{K} \quad (2)$$

$$W_a = \frac{1}{2} \rho A v_{max}^3 \quad (3)$$

$W_a$  adalah kapasitas energi listrik yang diharapkan,  $W_e$  adalah kapasitas energi listrik secara teori,  $\rho$  adalah densitas udara,  $A$  adalah luas sapuan,  $v_{max}$  adalah kecepatan angin maksimum dan jari-jari bilah ( $R$ ) dicari dengan menggunakan persamaan (3),

$$A = \frac{2W_a}{\rho v_{max}^3} \quad (4)$$

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (5)$$

Selanjutnya parameter geometri bilah *Qblade* ditentukan untuk proses simulasi sebagai berikut (LAN, 2015):

- a. Bilah *airfoil* didesain dengan menentukan *twist* ( $\beta$ ) pada masing-masing elemen bilah. Cara menentukan *twist* melalui *flow angle* ( $\phi$ ) dan sudut serang ( $\alpha$ ) pada setiap elemen.
- b. *Flow Angle* setiap elemen menggunakan persamaan:

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \left( \frac{v_1}{\omega r} \right) = \frac{2}{3} \tan^{-1} \left( \frac{R}{\lambda_r} \right) \quad (6)$$

- c.  $\lambda_r$  adalah rasio kecepatan linear elemen bilah yang berbeda diantara elemen bilah 1,2,3...10 terhadap kecepatan angin,  $r$  adalah jarak setiap elemen dan  $R$  adalah jari-jari bilah.

$$\lambda_r = \frac{r}{R} \lambda \quad (7)$$

dimana  $\lambda$  adalah *Tip Speed Ratio* (TSR) sebagai rasio kecepatan putaran turbin terhadap kecepatan angin, dengan persamaan (Mittal,2001),

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_w} \quad (8)$$

$\omega$  adalah kecepatan sudut turbin,  $v_w$  adalah kecepatan angin.

- d. Sudut Serang (*Angle of Attack*) dengan simbol  $\alpha$  adalah sudut yang terbentuk oleh tali busur suatu *airfoil* dan arah aliran udara yang melewatinya (*relative wind*). Pada *airfoil* yang berbentuk simetris, besar lift bernilai nol bila sudut serangnya nol, sedangkan pada *airfoil* yang tidak simetris sekalipun sudut serang nol tetapi gaya angkat (*lift*) tetap memiliki nilai. Gaya angkat menjadi nol bila *airfoil* tidak simetris membentuk sudut negatif terhadap aliran udara. Sudut serang dengan gaya angkat sebesar nol disebut *zero angle lift* (Hidayat, 2014).
- e. Kemudian kembali pada *twist* dengan menggunakan persamaan:

$$\beta(r) = \frac{2}{3} \tan^{-1} \left( \frac{R}{\lambda_r} \right) - \alpha \quad (9)$$

- f. Selanjutnya ditentukan lebar bilah (*chord*) pada masing-masing elemen bilah, dengan menggunakan persamaan:

$$c(r) = \frac{16\pi r}{B C_L} \sin^{-2} \left( \frac{1}{3} \tan^{-1} \left( \frac{R}{\lambda_r} \right) \right) \quad (10)$$

dengan  $B$  adalah jumlah bilah (baling-baling),  $C_L$  adalah koefisien beban angkat (*lift*).

Penentuan parameter awal bilah menggunakan perangkat lunak *microsoft excel 2007*, dengan asumsi bahwa daya 1kW dan bilangan Reynold ( $Re$ )  $10^6$  (Daryanto, 2007), bilah di desain menggunakan program *QBlade v.09b*. kecepatan angin yang digunakan berdasarkan data sekunder.

Desain bilah menggunakan *airfoil* NACA 4412, 4415, 23012, dan 23015 yang dimodifikasi menjadi jenis *taper* dan *taperless*.

### Pengolahan Data

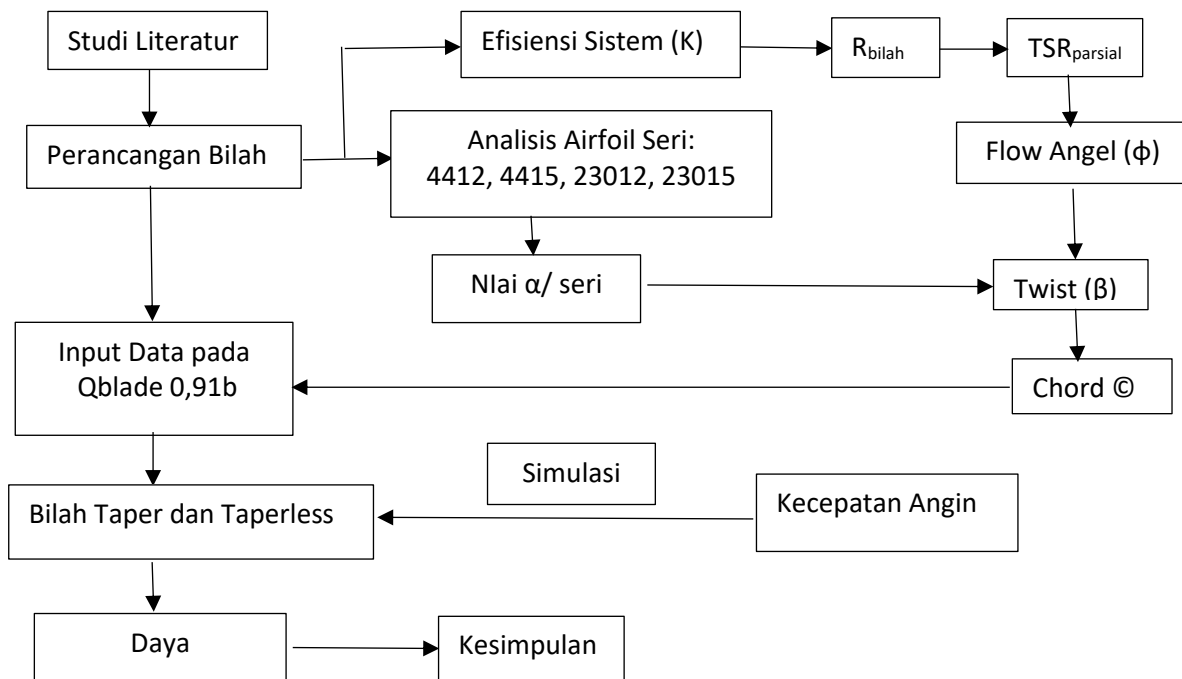
Pengolahan data kecepatan angin menggunakan perangkat lunak *microsoft excel 2007*. Tahapan pengolahan data kecepatan angin sebagai berikut:

1. Kecepatan angin Manokwari secara umum
  - a. Data sekunder kecepatan angin harian yang diperoleh dari *National Climatic Data Center* dirata-ratakan untuk mendapatkan data kecepatan angin bulanan.
  - b. Data kecepatan angin bulanan kemudian dirata-ratakan berdasarkan bulan yang sama selama 8 tahun sehingga diperoleh gambaran kecepatan rata-rata angin di Manokwari.
2. Kecepatan angin Manokwari berdasarkan seri *airfoil*
  - a. Data sekunder kecepatan angin harian dikelompokkan menjadi 2 jenis yaitu data harian seri 4 dan data harian seri 5 menggunakan batasan kecepatan angin untuk

masing-masing seri yang diperoleh dari software *Qblade 0.91b*.

- b. Setelah pengelompokkan data kecepatan angin harian, diperoleh jumlah rata-rata kemunculan potensi angin selama 8 tahun.
- c. Data kecepatan angin harian yang dikelompokkan kemudian dirata-ratakan untuk menghasilkan kecepatan angin bulanan selama 8 tahun.
- d. Data kecepatan angin bulanan kemudian dirata-ratakan berdasarkan bulan yang sama selama 8 tahun dan diperoleh gambaran kecepatan angin rata-rata di Manokwari berdasarkan seri 4 dan seri 5.

**Diagram Alir Penelitian**



Gambar1. Diagram alir penelitian

**Analisis Data**

Hasil simulasi dari perancangan bilah dan kecepatan angin dihasilkan daya yang dianalisis untuk mengetahui kualitas desain, potensi angin, dan desain yang sesuai untuk daerah Manokwari.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Penentuan Parameter Bilah**

Perancangan bilah dimulai dengan menentukan parameter bilah secara keseluruhan. Parameter yang ditentukan pada saat awal yaitu efisiensi sistem yang meliputi efisiensi bilah, efisiensi transmitter, efisiensi generator, dan efisiensi *controller*. Efisiensi bilah memiliki nilai maksimum 59%, efisiensi transmitter, generator, dan *controler* memiliki efisiensi masing-masing sebesar 90% (Tukan,2015). Efisiensi total

atau efisiensi sistem kincir angin sebesar 43%. Rancangan bilah digunakan pada sistem kincir angin HAWT *three-blade propeller*.

Pada perancangan ini kapasitas daya ( $W_e$ ) yang ingin dihasilkan sebesar 1000 Joule. Menurut Tim LAN (2015), kecepatan angin maksimal sistem turbin adalah 12 m/s - 15 m/s, sehingga kecepatan angin yang ditetapkan sebesar 12 m/s. Berdasarkan persamaan (2) jumlah energi angin yang dibutuhkan ( $W_a$ ) sebesar 2325 Joule dan persamaan (5) didapat jari-jari bilah yang terpakai (R) sepanjang 0,85 m dari panjang bilah sesungguhnya yaitu 1 m. Nilai panjang bilah yang digunakan untuk mendesain bilah *airfoil* NACA seri 4412, 4415, 23012, dan 23015 ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Penentuan Parameter Bilah

We (J)	Efisiensi (%)					Wa (J)	v <sub>max</sub> (m/s)	R (m)
	Bilah	Transmitter	Generator	Controller	Total (K)			
1000	59	90	90	90	43	2325	12	1

Parameter berikutnya yang ditentukan adalah nilai *Tip Speed Ratio* (TSR). Menurut Huge Piggot (2000) nilai TSR untuk *three-blade propeller* sebesar 6-8. Pada penelitian ini TSR yang digunakan bernilai 7.

**Penentuan Geometri Bilah**

Perancangan bilah dilanjutkan dengan menghitung geometri bilah. Sudut

serang ( $\alpha$ ) dan *Coefficient lift* ( $C_L$ ) yang didapatkan dengan melakukan analisis *airfoil* menggunakan aplikasi *Qblade v0.9b*. Nilai untuk sudut serang dan *Coefficient lift* pada masing-masing seri berbeda. Tabel 2 menunjukkan nilai sudut serang ( $\alpha$ ) dan *Coefficient Lift* ( $C_L$ ) pada setiap seri.

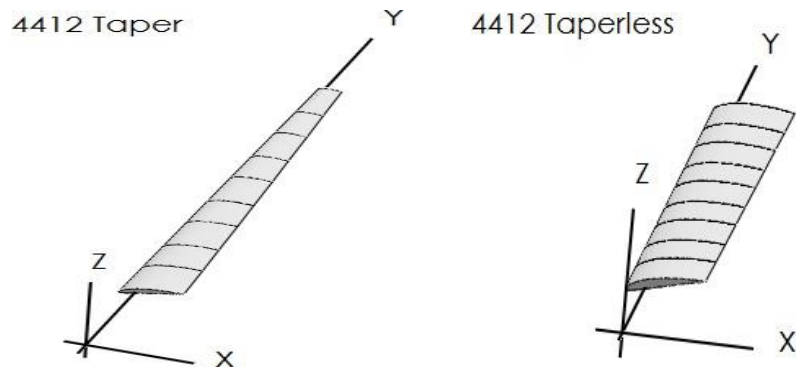
Tabel 2. Nilai Sudut Serang ( $\alpha$ ) dan *Coefficient Lift* ( $C_L$ ) setiap Seri

Seri Airfoil	Sudut Serang ( $^\circ$ )	<i>Coefficient Lift</i>
4412	6	1.13
4415	6.5	1.17
23012	9.5	1.18
23015	10	1.25

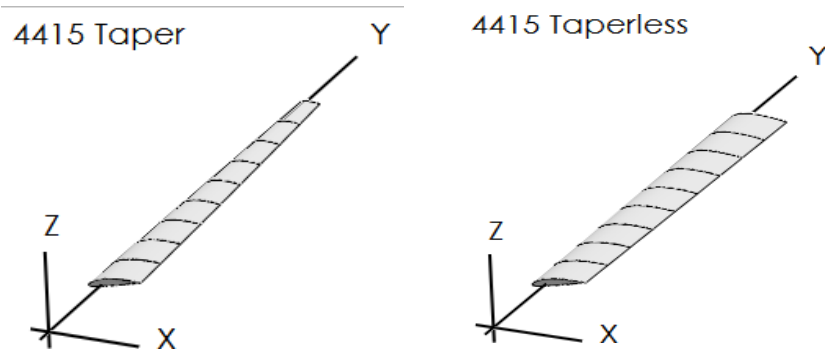
Panjang bilah terbagi menjadi 10 bagian dengan tiap bagian memiliki panjang tertentu (jari-jari parsial), lebar bilah (*chord*) dan *twist* tersendiri. Penentuan jari-jari tiap elemen bilah dihitung dengan membagi panjang total bilah menjadi 10 elemen. TSR parsial ( $\lambda_r$ ) merupakan *tip speed ratio* setiap elemen bilah yang didapatkan dengan persamaan (7). *Flow angle* ( $\phi$ ) adalah sudut datangnya aliran angin pada setiap elemen bilah. Besarnya *flow angle* bergantung pada nilai TSR parsial. Parameter-parameter tersebut digunakan untuk menentukan *twist* ( $\beta$ ) dan lebar bilah ( $c$ ).

Optimasi linearisasi 75% dilakukan pada *twist* dan lebar bilah untuk didapatkan

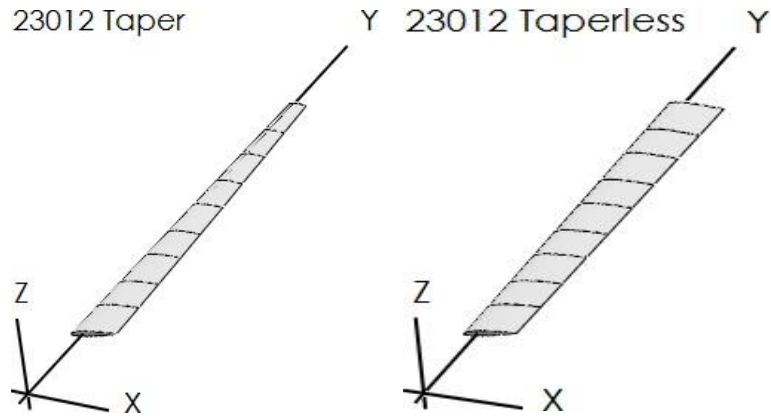
persamaan linear pada nilai *twist* dan lebar bilah yang lebih akurat sebagai pemodelan bilah. Pada lampiran tampak bahwa elemen 7 dan 8 merupakan titik acuan untuk optimasi linearisasi. Hal ini disebabkan letak 75% pada jari-jari bilah berada dititik acuan dan ideal untuk pembuatan pelurusan. Persamaan *twist linear* ( $\beta$ ) pada *airfoil* NACA 4412 dengan  $\beta = -0,9404x + 8,2767$ , *airfoil* NACA 4415 dengan  $\beta = -0,9404x + 7,7767$ , *airfoil* NACA 23015 dengan  $\beta = -0,9404x + 4,2767$ , dan *airfoil* NACA 23012 dengan  $\beta = -0,9404x + 4,776$ , dimana  $x$  sebagai nilai setiap elemen bilah. Gambar 2 menunjukkan bentuk pemodelan bilah setelah dilakukan optimasi linearisasi 75%.



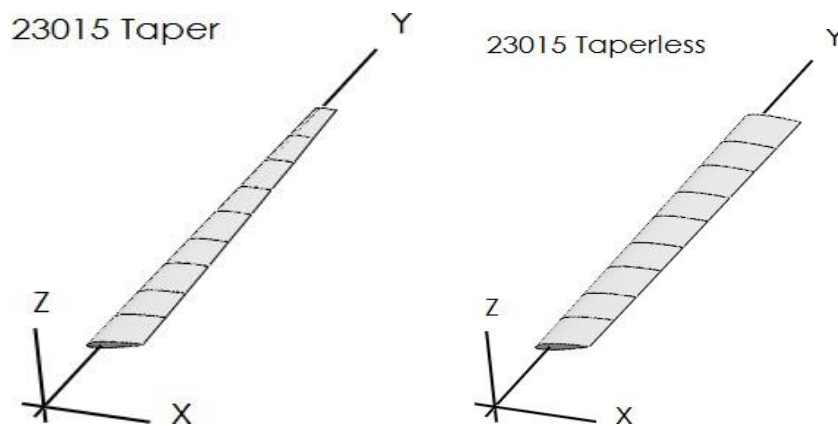
Gambar 2. Model bilah NACA 4412 pada simulasi Qblade



Gambar 3. Model bilah NACA 4415 pada simulasi Qblade



Gambar 4. Model bilah NACA 23012 pada simulasi Qblade



Gambar 5. Model bilah NACA 23015 pada simulasi Qblade

Jenis bilah *taper* dan *taperless* memiliki geometri bilah yang sama, perbedaan yang mendasar pada kedua model tersebut adalah lebar bilah (*chord*). Jenis *taper* memiliki lebar bentuk ujung bilah yang cenderung semakin kecil sedangkan jenis

*taperless* memiliki lebar ujung bilah yang tetap.

Lebar bilah (*chord*) dan *twist* menunjukkan perbedaan geometri dari tiap seri *airfoil* NACA. Tabel 3 menunjukkan besar *chord* dan *twist* hasil perhitungan.

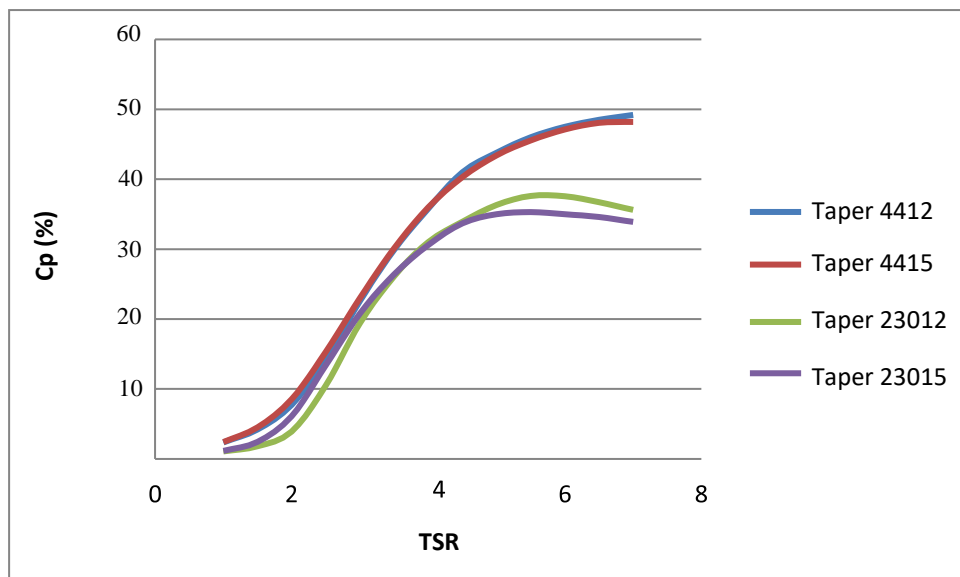
Tabel 3. Nilai *Chord* dan *Twist* setiap Seri Airfoil

<i>Airfoil</i> NACA	<i>Chord</i>	<i>Twist</i>
4412	0.0988	30.69
4415	0.0955	30.19
23012	0.0946	27.19
23015	0.0893	26.69

Seri *airfoil* NACA 4412 memiliki nilai *chord* dan *twist* terbesar dari keempat seri, sementara *airfoil* NACA 23015 memiliki nilai terkecil. Perbedaan nilai *chord* disebabkan oleh besar kecilnya *coefficient lift* pada masing-masing seri, sementara besarnya nilai *twist* dipengaruhi besar *flow angle* terhadap sudut serang ( $\alpha$ ).

### Simulasi Bilah

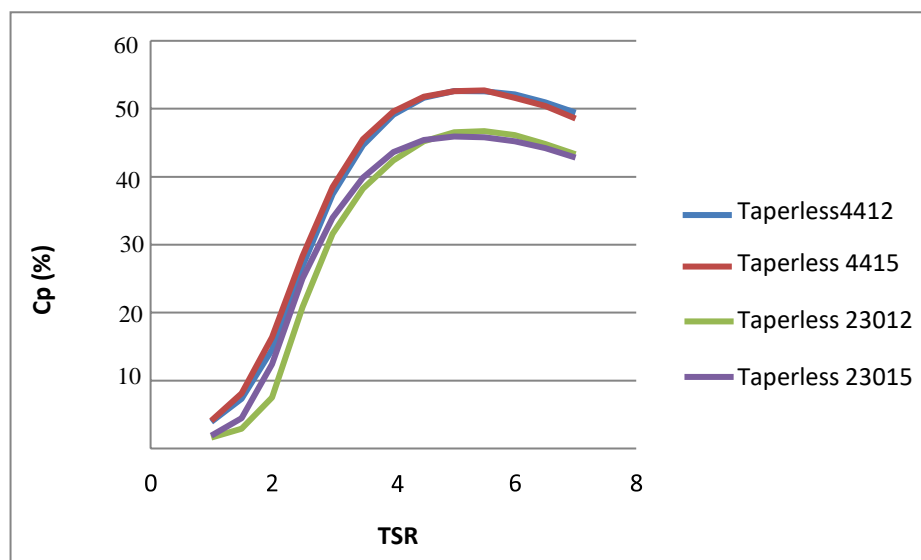
Simulasi bilah dimulai dengan melakukan simulasi parameter *Blade Element Momentum* (BEM), dengan melakukan simulasi tersebut didapatkan hasil berupa grafik TSR (*Tip Speed Ratio*) terhadap  $C_p$  (*Coefficient power*).



Gambar 6. Perubahan nilai Cp-TSR bilah *taper*

Gambar 6 menunjukkan perubahan nilai Cp terhadap TSR pada bilah berbentuk *taper*. Berdasarkan grafik tersebut terlihat bahwa efisiensi bilah *airfoil* NACA 4412 dan 4415 lebih tinggi dari efisiensi bilah *airfoil*

NACA 23012 dan 23015. Pada saat TSR bernilai 7, bilah *airfoil* NACA 4412 dan NACA 4415 memiliki efisiensi sebesar 49%, efisiensi bilah *airfoil* NACA 23012 sebesar 36% sedangkan efisiensi bilah *airfoil* NACA 23015 sebesar 34%.



Gambar 7. Perubahan nilai Cp-TSR bilah *taperless*

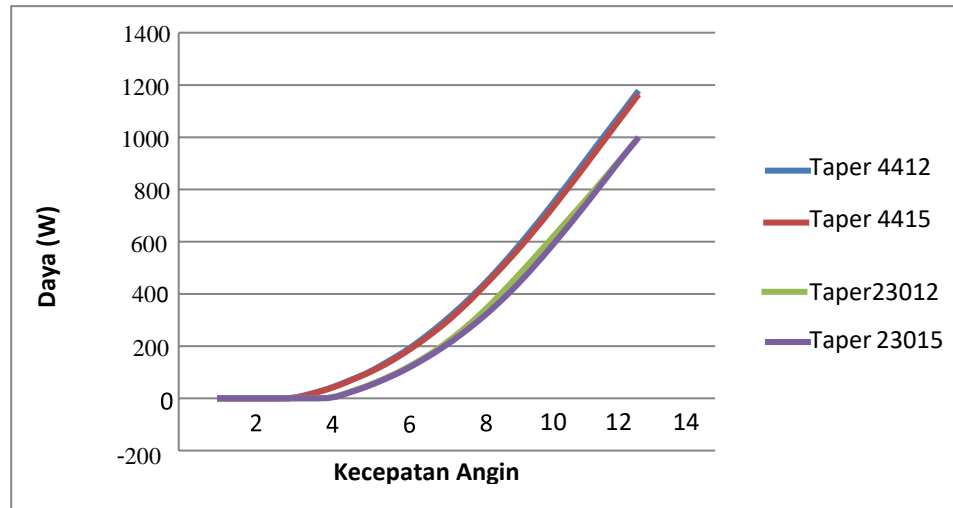
Gambar 7 menunjukkan perubahan nilai Cp terhadap TSR pada bilah berjenis *taperless*. Pada saat TSR bernilai 7, bilah *airfoil* NACA 4412 dan 4415 menunjukkan efisiensi sebesar 49% sedangkan bilah *airfoil*

NACA 23012 dan NACA 23015 memiliki efisiensi sebesar 43%. Berdasarkan hasil tersebut terlihat bahwa jenis bilah *airfoil* NACA 4412 dan 4415 memiliki efisiensi yang tinggi dari jenis bilah *airfoil* NACA

23012 dan 23015.

Performa desain bilah dapat dilihat dengan melakukan simulasi pengujian daya,

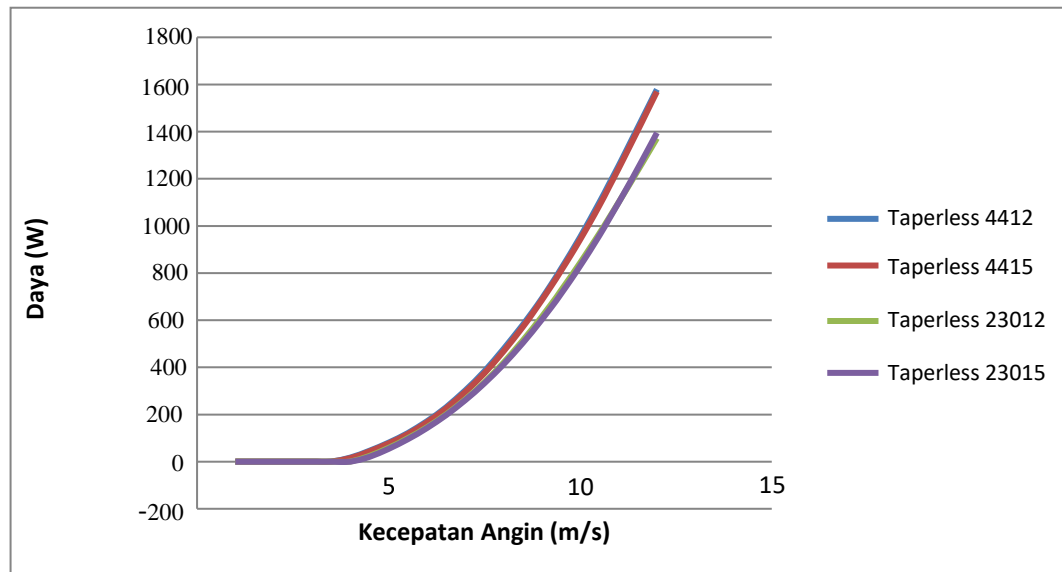
yang diasumsikan menggunakan kecepatan maksimum generator 500 rpm dan kecepatan angin dari 1-12 m/s untuk masing-masing tipe bilah *airfoil*.



Gambar 8. Grafik simulasi daya pada bilah jenis *taper*

Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 8 dengan hasil daya dari jenis bilah *taper*. Bilah *taper* jenis NACA 4412 dan NACA 4415 menghasilkan daya awal sebesar 2,6 W dan 1,98 W pada kecepatan angin 3 m/s. Bilah dengan *taper* jenis NACA 23012 dan 23015 menghasilkan daya pada kecepatan angin 4 m/s sebesar 3,86 W dan 2,53 W. Seiring bertambahnya kecepatan angin semua bilah menghasilkan daya yang semakin besar. Bilah *taper* jenis NACA 4412 dan 4415 menghasilkan kenaikan daya yang lebih besar bila dibandingkan dengan bilah *taper* jenis *airfoil* NACA 23012 dan 23015. Daya yang dihasilkan pada kecepatan angin maksimum 12 m/s untuk bilah *taper* NACA 4412 adalah 1178.6 W, bilah *taper* NACA 4415 adalah 1164 W, bilah *taper* NACA 23012 adalah 999 W, dan 999.85 W untuk bilah *taper* NACA 23015.

Pada bilah berjenis *taperless*, hasil simulasi disajikan pada Gambar 9. Bilah *taperless* jenis NACA 4412 dan 4415 menghasilkan daya awal sebesar 16,78 W dan 14,33 W pada kecepatan angin 4 m/s. Bilah *taperless* jenis NACA 23012 dan 23015 mulai menghasilkan daya di kecepatan 4,5 m/s sebesar 23,8 W dan 20,3 W. Daya pada bilah jenis NACA 4412 dan 4415 mengalami kenaikan yang sangat signifikan seiring bertambahnya kecepatan angin, sedangkan jenis NACA 23012 dan 23015 menghasilkan daya yang lebih kecil. Daya yang dihasilkan pada kecepatan 12 m/s dari masing-masing bilah *taperless* adalah 1579 W untuk NACA 4412, 1569.5 W untuk NACA 4415, 1371.4 W untuk NACA 23012, dan 1395 W untuk NACA 23015,



Gambar 9. Grafik simulasi daya pada bilah jenis *taperless*

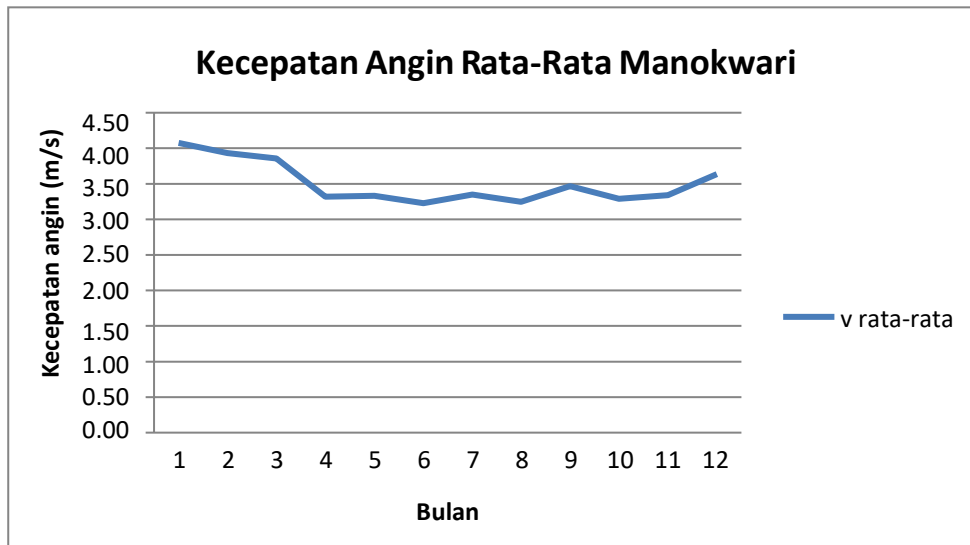
Dari simulasi pengujian daya secara keseluruhan *airfoil* NACA 4412 menunjukkan hasil yang lebih baik dalam menghasilkan daya bila dibandingkan seri lainnya baik dalam jenis *taper* maupun *taperless*. Bilah jenis NACA 4415 juga menghasilkan daya yang tidak jauh berbeda dari NACA 4412. Bilah jenis NACA 23012 dan 23015 menghasilkan daya yang lebih rendah dibandingkan dengan kedua NACA seri 4. Selain disebabkan oleh perbedaan *coefficient lift* yaitu 1,13 pada NACA 4412, 1,17 pada NACA 4415, 1,18 pada NACA 23012, dan 1,25 pada NACA 23015, bentuk profil *airfoil* juga memberikan pengaruh.

Jenis *taper* menghasilkan daya yang lebih sedikit bila dibandingkan dengan jenis *taperless*. Hal ini disebabkan oleh bentuk bilah yang berbeda, sehingga luas sapuan bilah menjadi berbeda. Perbedaan tersebut mempengaruhi penyerapan energi angin menjadi energi kinetik. Jenis *taperless* dengan nilai *chord* yang sama memiliki jangkauan sapuan yang lebih luas. Di sisi lain, meskipun luas sapuannya relatif kecil, jenis *taper* memiliki keunggulan lebih mudah berputar dalam kecepatan angin rendah.

### Kecepatan Angin Manokwari

Data kecepatan angin harian selama 8 tahun (2008-2015) yang diperoleh dari NOAA dirata-ratakan untuk mendapatkan gambaran kecepatan angin di Manokwari. Pada Gambar 10 ditunjukkan kecepatan angin Manokwari pada setiap bulan selama 8 tahun.

Kecepatan angin rata-rata yang tertinggi di Manokwari sebesar 4,1 m/s berlangsung pada bulan Januari. Kecepatan angin rata-rata yang terendah terjadi selama bulan Juni sebesar 3,2 m/s. Jadi kecepatan angin rata-rata di Manokwari sebesar 3,5 m/s. Kecepatan angin cenderung menurun dari bulan Januari sampai Maret dengan penurunan yang signifikan pada bulan April sampai Agustus. Pada bulan September, kecepatan angin mengalami kenaikan meskipun cenderung menurun kembali pada bulan berikutnya. Periode bulan November dan Desember, kecepatan angin menunjukkan peningkatan. Pola kecepatan angin ini memiliki keterkaitan dengan rentang waktu terjadinya intensitas hujan tertinggi pada bulan Desember hingga Februari (MAPI, 2016).



Gambar 10. Kecepatan rata-rata angin tiap bulan selama 8 tahun

**Simulasi Daya pada Kecepatan Angin Manokwari**

Daya dapat dihasilkan dari kecepatan angin dengan melakukan pemilahan kecepatan angin yang memenuhi syarat minimum untuk memutar bilah. Berdasarkan uji performa bilah, pada kecepatan minimum bilah 3,5 m/s NACA seri 4412 dan 4415

mulai menghasilkan daya demikian juga pada NACA seri 23012 dan 23015 dengan kecepatan angin 4,1 m/s. Menurut Santosa *et al* (2014) angin efektif untuk memutar bilah umumnya dimulai pada jam 09.00 - 18.00 ( $\pm$  9 jam). Rata-rata kecepatan angin setiap bulan berdasarkan waktu efektif selama 9 jam ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Kecepatan Rata-rata Angin per Bulan di Manokwari selama 9 jam

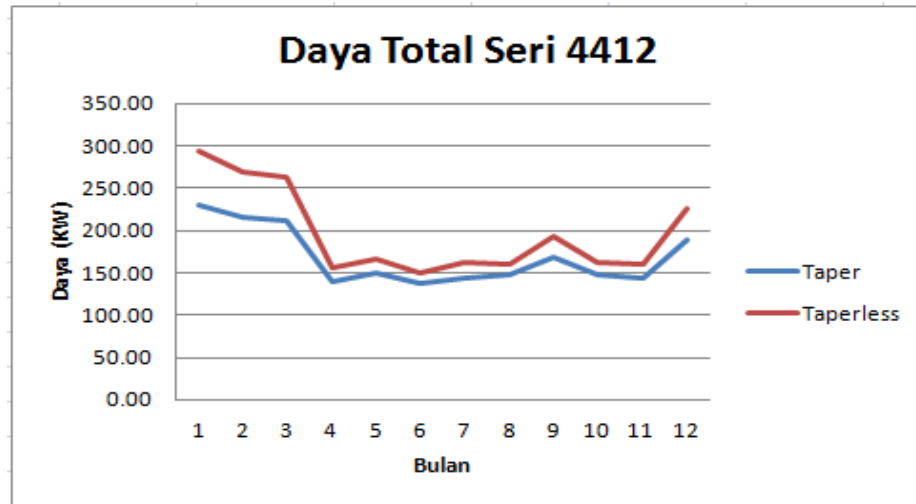
Bulan	V rata-rata (m/s)
Januari	10,87
Februari	10,49
Maret	10,29
April	8,85
Mei	8,89
Juni	8,61
Juli	8,94
Agustus	8,66
September	9,25
Oktober	8,78
November	8,91
Desember	9,7
Rata-rata	9,35

Kecepatan angin di Manokwari berdasarkan Tabel 4 berkisar antara 8,61

m/s sampai 10,87 m/s dan rata-rata kecepatan anginnya sebesar 9,35 m/s. Rata-rata

kemunculan potensi angin yang memenuhi syarat batas bilah untuk berputar setiap bulannya adalah 26 hari. Dengan memasukkan rata-rata kecepatan angin

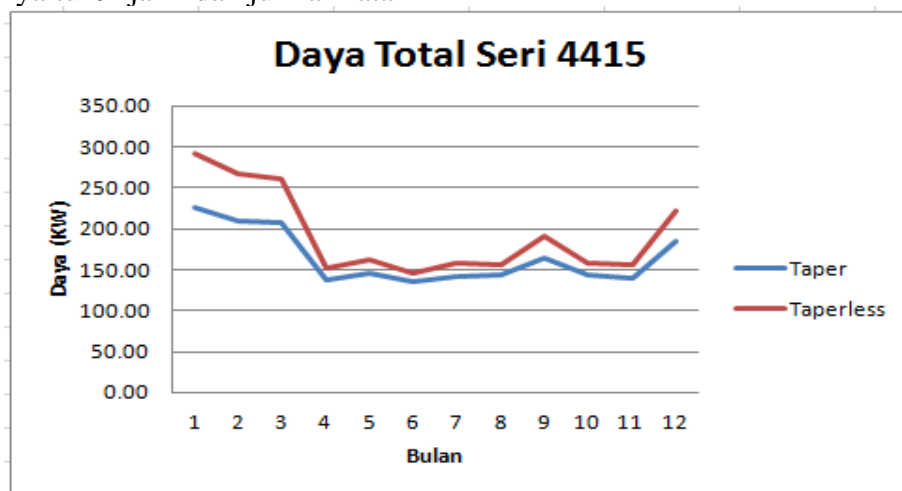
tersebut ke dalam simulasi maka dihasilkan daya. Gambar 11 menunjukkan perbandingan simulasi daya dari bilah jenis *taper* dan *taperless* untuk NACA seri 4412.



Gambar 11. Perbandingan daya yang dihasilkan NACA 4412 *taper* dan *taperless* pada kecepatan angin Manokwari

Jenis bilah *taper* dapat menghasilkan daya rata-rata tiap detik sebesar 720,04 W sedangkan bilah *taperless* sebesar 842,5 W. Dengan mengalikan daya yang dihasilkan terhadap lama angin efektif dalam sehari yaitu 9 jam dan jumlah rata-

rata kemunculan potensi kecepatan angin rata-rata 9,35 m/s sebanyak 26 hari, maka total daya rata-rata per bulan yang dapat dihasilkan bilah *taper* sebesar 168,38 kW dan *taperless* sebesar 196,93 kW.



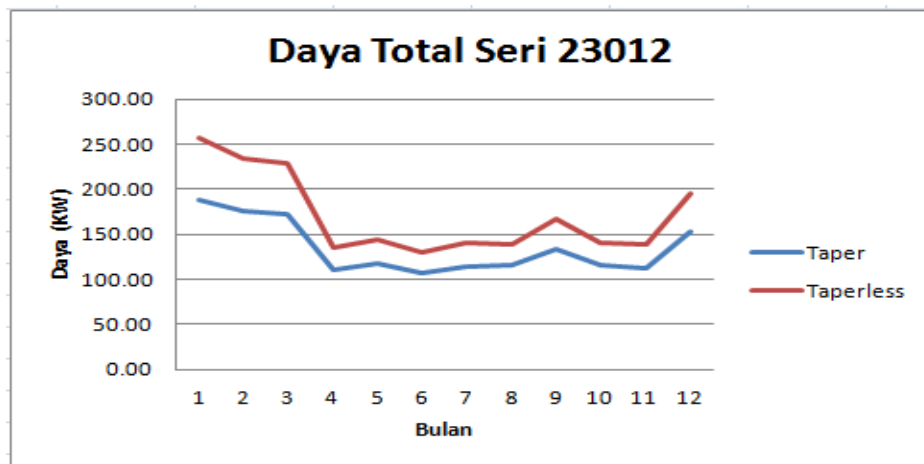
Gambar 12. Perbandingan daya NACA 4415 *Taper* dan *Taperless* terhadap kecepatan angin Manokwari

Gambar 12 merupakan grafik jumlah daya yang dihasilkan bilah NACA 4415 jenis *taper* dan *taperless*. Daya rata-rata tiap detik yang dihasilkan bilah *taper* adalah 704,73 W dan bilah *taperless* sebesar 824,56

W. Dengan mengalikan daya yang dihasilkan terhadap lama angin efektif dalam sehari yaitu 9 jam dan jumlah rata-rata kemunculan potensi kecepatan angin rata-rata 9,35 m/s sebanyak 26 hari, maka rata-rata total daya

tiap bulan yang dapat dihasilkan bilah *taper* sebesar 164,8 KW dan *taperless* sebesar 192,73KW.

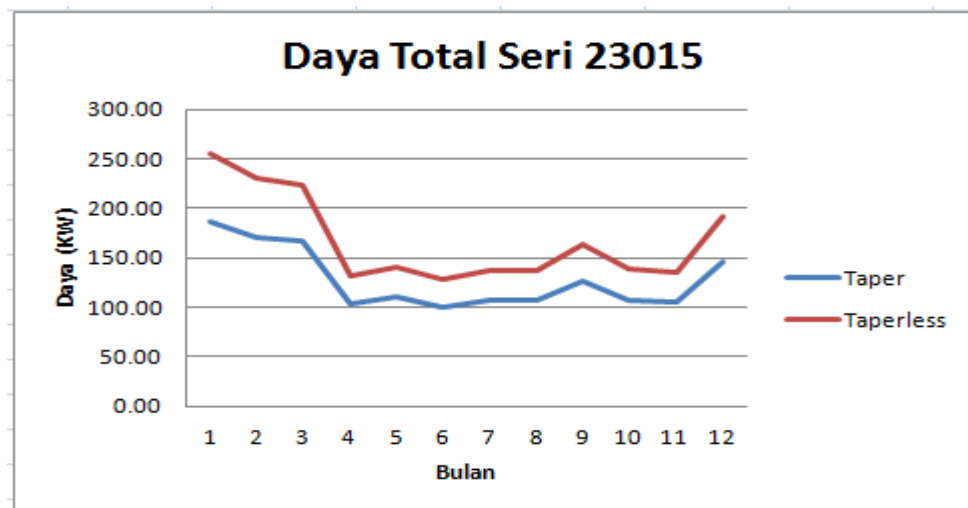
Pada NACA seri 23012 dan 23015 didapatkan besar daya yang ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Perbandingan daya yang dihasilkan NACA 23012 *Taper* dan *Taperless* pada kecepatan angin Manokwari

Gambar 13 menunjukkan bahwa bilah NACA 23012 jenis *taper* mampu menghasilkan daya rata-rata per detik sebesar 577,08 W sedangkan jenis *taperless* sebesar 719,12 W. Rata-rata daya total tiap bulan yang dapat dihasilkan dari masing-masing bilah dengan mengalikan daya per detik

terhadap lama angin efektif dalam sehari selama 9 jam dan jumlah rata-rata kemunculan potensi kecepatan angin 9,35 m/s sebanyak 26 hari sebesar 134,93 kW untuk bilah *taper* dan 170,88 kW untuk bilah *taperless*



Gambar 14. Perbandingan daya yang dihasilkan NACA 23015 *Taper* dan *Taperless* pada kecepatan angin Manokwari

Bilah NACA 23015 jenis *taper* dan *taperless* menghasilkan daya rata-rata per

detik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14 sebesar 548,47 W dan 719,12 W. Dengan mengalikan hasil daya tersebut terhadap lama

angin efektif dalam sehari yaitu 9 jam dan jumlah rata-rata kemunculan potensi kecepatan angin rata-rata 9,35 m/s sebanyak 26 hari, maka daya total rata-rata tiap bulan yang dihasilkan bilah *taper* sebesar 128,22 kW dan bilah *taperless* sebesar 168,08 kW.

Berdasarkan hasil simulasi bilah keseluruhan, bilah *airfoil* NACA 4412 jenis *taper* dan *taperless* menghasilkan daya yang lebih besar dibanding seri lainnya. Menurut Dahlan (2015) dan Tukan (2015) bilah seri NACA 4412 merupakan tipe terbaik dalam perancangan bilah pada kecepatan 1 sampai 12 m/s. Daya rata-rata yang dicapai kedua bilah tersebut pada kecepatan 12 m/s yaitu 1549,88 W dan 3978,23 W. Panjang bilah NACA 4412 menurut Tukan (2015) sebesar 1,5 m dengan efisiensi yang dicapai 40%. Menurut Dahlan (2015) bilah NACA 4412 yang dirancang dengan panjang 1 m memiliki efisiensi mencapai 52%. Nilai efisiensi memiliki kemungkinan untuk menurun menurut Dahlan (2015), dimana secara teoritis rancangan bilah NACA 4412 memiliki efisiensi sebesar 52% namun pada saat pembuatan dan uji coba efisiensinya sebesar 36%.

Bilah jenis *taperless* pada seri 4412, 4415, 23012, dan 23015 menghasilkan daya yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan jenis *taper* pada seri yang sama. Jenis *taperless* dengan seri 4412 merupakan bilah terbaik untuk kecepatan angin di Manokwari. Hal ini didukung dengan bentuk bilah *taperless* yang luasan sapuannya lebih lebar dibandingkan jenis *taper* sehingga daya yang dihasilkan jauh lebih besar. Besarnya luasan sapuan ini disebabkan oleh nilai *chord* yang sama dari pangkal hingga ujung bilah pada bilah berjenis *taperless*.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan dari penelitian ini:

1. Simulasi perancangan bilah *taper* dan *taperless* yang terbaik didapat dengan menggunakan *airfoil* NACA 4412 dan NACA 4415 yang memiliki efisiensi masing-masing sebesar 49%.

2. Seri NACA 4412 jenis *taper* menghasilkan daya total rata-rata per bulan sebesar 168,38 kW dan *taperless* sebesar 196,93 kW. Bilah NACA 4415 jenis *taper* menghasilkan daya 164,8 kW sedangkan bilah *taperless* sebesar 192,73 kW untuk jumlah kemunculan yang sama.

Saran untuk meningkatkan hasil penelitian:

1. Diperlukan pengambilan data kecepatan angin secara langsung untuk memperoleh gambaran kecepatan angin setiap jam sehingga dapat ditentukan waktu efektif angin secara akurat.
2. Perlu dilakukan variasi kecepatan sudut sehingga diperoleh hasil yang lebih detail.

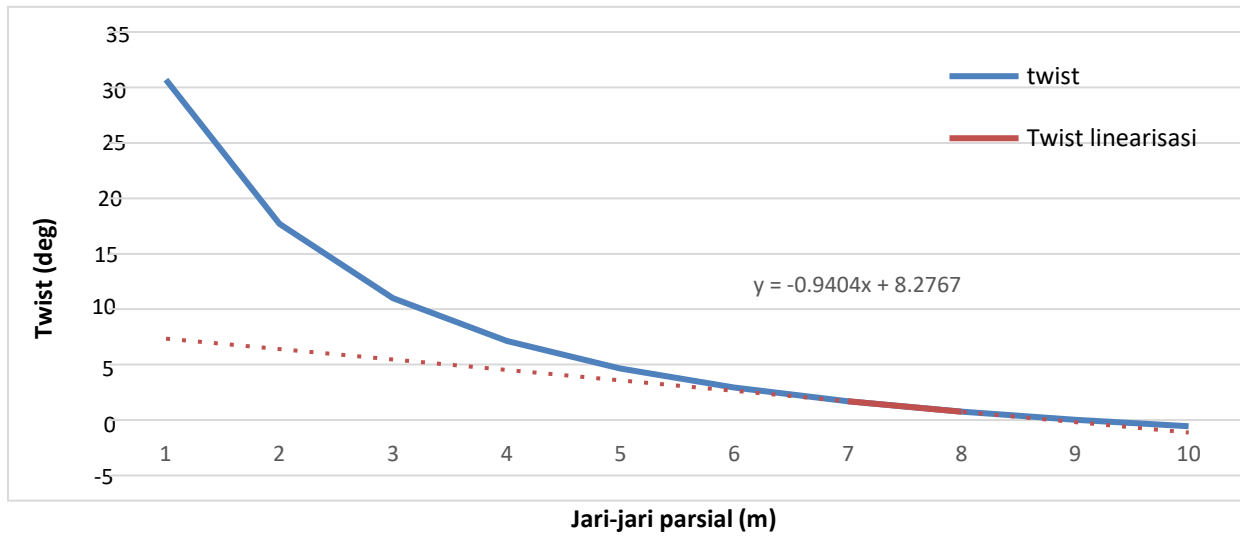
## DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pusat Statistik. 2021. “Manokwari dalam Angka”. BPS Kabupaten Manokwari. Manokwari
- Dahlan, B. 2015. “Rancang Bangun Baling-Baling Kincir Angin Menggunakan Modifikasi NACA 4412 dan 4415 Dari Bahan Kayu Mahoni (*Swietenia macrophylla*) dan Pinus (*Pinus merkusii*)”. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya
- Daryanto, Y. 2007. “Kajian Potensi Angin Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu”. Balai PPTAGG-UPT-LAGG. Yogyakarta
- DESDM. 2005. “Rasio Cadangan Dibanding Produksi Minyak Bumi di Indonesia dalam Kurun Waktu 18 Tahun”. Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Herlambang, Y.D. 2013. “Kaji Eksperimental Turbin Angin Multiblade Tipe Sudut Flate Plate sebagai Penggerak Mula Pompa Air”. PoliteknikNegeri Semarang
- Hidayat, M. F. 2014. Analisa Aerodinamika Airfoil NACA 0012 dengan ANSYS Fluent. Jurnal Kajian Teknologi, 10 (2).

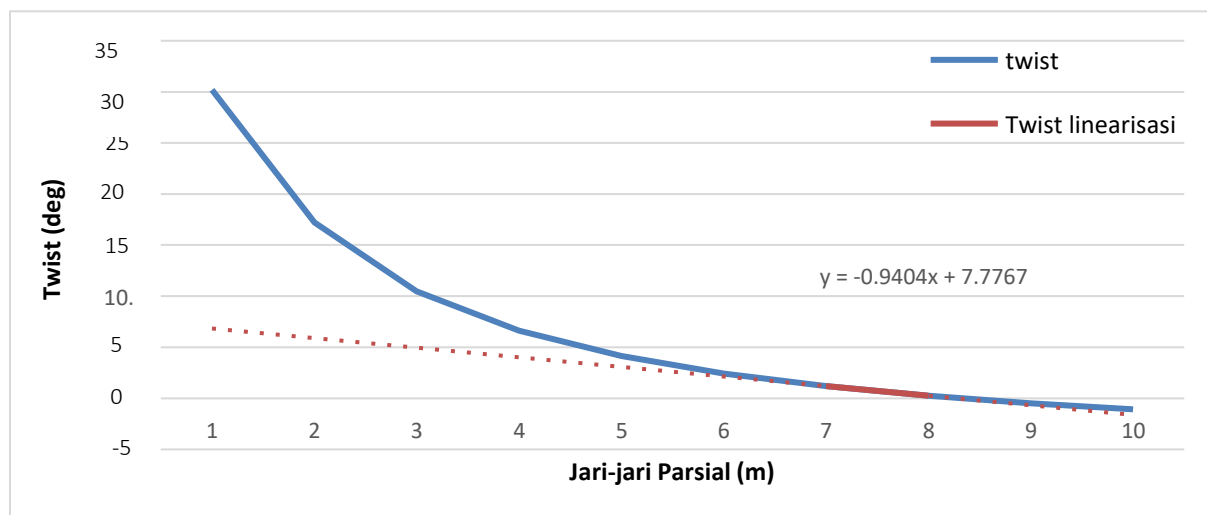
- MAPI. 2016. “Perubahan iklim di Indonesia”. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya  
<https://mapipu.weebly.com/perubahan-iklim-di-indonesia> (23 Desember 2016)
- Marten, D. 2013. “Qblade Guidelines v0.6”. [QBlade@outlook.com](mailto:QBlade@outlook.com) TU Berlin
- Mittal, N. 2001. “Investigation of Performance Characteristics of a Novel VAWT. Thesis. UK: Departement of Mechanical Engineering University of Strathclyde
- NOAA. “National Climatic Data Center”. <https://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/dataproduct> (13 Mei 2016)
- Rehiara, A.B. 2010. “Desain Pembangkit Listrik Tenaga Kincir Angin Pada Daerah Pesisir Pantai Utara Kabupaten Manokwari”. Universitas Papua. Manokwari
- RWE npower renewables. 2009. “Wind Turbine Power Calculatios”. Germany
- Syahrul. 2008. “Prospek Pemanfaatan Energi Angin sebagai Energi Alternatif di Daerah Pedesaan”. UNM
- Tim LAN. 2014. “Pengenalan Teknologi Pemanfaatan Energi Angin”. Lentera Angin Nusantara (Tidak dipublikasikan).
- Tim LAN. 2015. “Draft Tutorial Bilah-Confidential”. Lentera Angin Nusantara (Tidak dipublikasikan).
- Tim LAN. 2015. “Kunci Sukses Perancangan Bilah Kincir Angin Tipe HAWT”. Lentera Angin Nusantara (Tidak dipublikasikan).
- Tukan, T.T. 2015. “Peramalan Kecepatan Angin Kota Manokwari Menggunakan Jaringan Saraf Tiruan untuk Perancangan Baling-Baling Kincir Angin Airfoil Tipe NACA 4412, 4415, Dan 4418”.

**LAMPIRAN**

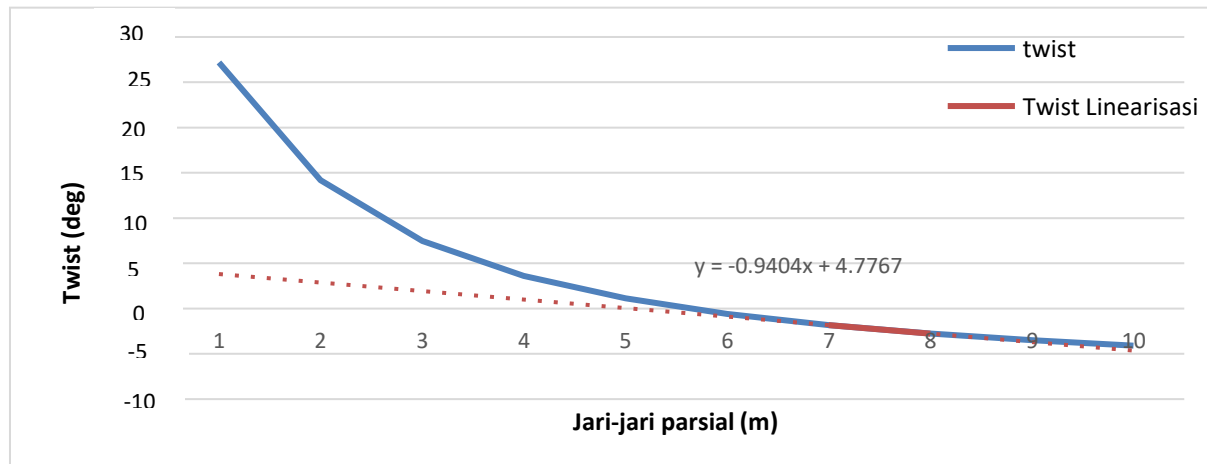
**a) Optimasi *twist linier* 75% NACA4412**



**b) Optimasi linier 75% NACA 4415**



**c) Optimasi linier 75% NACA 23012**



**d) Optimasi linier 75% NACA 23015**

