

ANALISIS 4 *AIRFOIL* BILAH *TAPERLESS* TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN SUMBU HORIZONTAL MENGGUNAKAN *SOFTWARE Q-BLADE*

¹Fajar Hidayatullah, ²Deri Teguh Santoso

^{1,2}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang

¹1710631150078@student.unsika.ac.id, ²deri.teguh@ft.unsika.ac.id

INFO ARTIKEL

Diterima : 31 Agustus 2021

Direvisi : 10 Oktober 2021

Disetujui : 21 Oktober 2021

Kata Kunci :

Airfoil, energi, turbin angin, koefisien daya (Cp), NACA, *Qblade*

ABSTRAK

Energi angin menjadi salah satu energi baru terbarukan yang berkembang pesat di dunia saat ini. Indonesia memiliki potensi angin yang cocok digunakan untuk pembangkit listrik dengan daya keluaran antara 100-500 watt. Turbin angin mengalami kemajuan yang sangat baik sebagai sumber energi yang lebih handal dan ramah lingkungan. Untuk mengoptimalkan energi angin diperlukan rancangan bilah dan pemilihan *airfoil* yang dapat menghasilkan performa turbin angin yang baik. Metode penelitian yang digunakan adalah metode simulasi menggunakan *Qblade* dan *Microsoft Excel*. Adapun metode ini dibagi dalam 3 tahap yaitu tahap pertama adalah tahap perancangan untuk menentukan jari-jari bilah dan nilai *twist* yang digunakan dengan jenis bilah *taperless*. Tahap kedua melakukan simulasi dan analisis hasil rancangan menggunakan *Qblade*. Tahap ketiga validasi rancangan untuk mengetahui *coefficient performance* (Cp), daya, dan torsi masing-masing bilah. Berdasarkan hasil perancangan bilah jenis *taperless* memiliki panjang jari-jari 0,8 m dan nilai *twist* optimasi yang digunakan setiap bilah NACA 4412; 4415; 6412; 6415 pada elemen 0 yaitu 12,67°; 11,07°; 13,24°; 12,98° hingga elemen 10 yaitu 6,50°; 7,20°; 9,17°; 9,21° dengan *coefficient power* (Cp) sebesar 53% pada TSR 4,5-5. Dari keempat *airfoil* yang digunakan daya tertinggi dihasilkan diantara 1130,91-1141,22 watt pada kecepatan putar 600-650 rpm dan torsi 16-17 Nm. Untuk pemilihan *Airfoil* bilah turbin angin NACA 4412 dan NACA 4415 memiliki hasil performa lebih baik daripada NACA 6412 dan NACA 6415.

I. PENDAHULUAN

Permintaan energi nasional terus meningkat seiring dengan pertumbuhan ekonomi dan meningkatnya populasi manusia sedangkan di Indonesia penyediaan energi masih di dominasi oleh energi fosil [1]. Mengingat inovasi teknologi berbasis listrik terus berkembang di berbagai sektor dan pengembangan kendaraan listrik semakin pesat, akan tetapi energi listrik Indonesia masih terbatas. [2]. Keterbatasan energi listrik dan tingginya ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Meskipun sumber bahan bakar fosil sangat besar, penggunaan bahan bakar fosil menyebabkan efek besar pada iklim dan lingkungan. sudah waktunya untuk mencari energi yang ramah lingkungan dan pemanfaatan energi baru dan terbarukan (EBT) [3]. Untuk memenuhi kebutuhan energi faktor ramah lingkungan dan ketersediaan sumber energi yang berkelanjutan perlu diperhatikan [4].

Energi baru terbarukan merupakan energi yang dihasilkan dari sumber alami dan dapat diperbarui yang dapat memenuhi kebutuhan energi masa depan. Beberapa negara dapat memanfaatkan dan mengimplementasikan energi tersebut salah satunya Indonesia. Salah satu energi terbarukan yang berkembang pesat didunia saat ini adalah energi angin [5]. Selama satu dekade terakhir, teknologi yang terkait dengan penggunaan angin telah meningkat secara signifikan. Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral [6], kecepatan angin di Indonesia berkisar antara 3m/s-6m/s yang banyak di temukan pada pesisir selatan Jawa, Sumatera, dan pulau-pulau di Indonesia bagian timur. Energi ini dianggap berlimpah lestari dan ramah lingkungan dan ketersediannya juga menjangkau

segala penjuru kawasan di permukaan bumi agar kelak menjadi andalan pasokan energi nasional.

Menurut kecepatan dan kapasitas pembangkit listrik, turbin angin dibagi menjadi dua tipe yaitu turbin angin skala kecil dengan kapasitas daya dibawah 100 kW dan turbin skala besar dengan kapasitas daya di atas 100 kW. Kapasitas ini yang membedakan kebutuhan kecepatan minimal awal (*cut-in wind speed*) yang diperlukan. Untuk skala besar beroperasi pada *cut-in wind speed* 5m/s sedangkan skala kecil hanya membutuhkan *cut-in wind speed* 3 m/s, maka dari itu Indonesia berpotensi untuk memanfaatkan turbin angin skala kecil [7].

Turbin angin merupakan alat konversi energi angin menjadi energi mekanik. Industri turbin angin memiliki kemajuan yang sangat baik di seluruh dunia yang menominasikan angin sebagai sumber energi yang lebih handal dan lebih murah dalam waktu dekat. Pemerintah menargetkan penggunaan energi baru terbarukan (EBT) sebesar 23% hingga tahun 2025 sedangkan penggunaan PLTB masih 9,7% [4]. Salah satu daerah yang telah menggunakan turbin angin dengan skala mikro berada di Desa Ciheras yang dikembangkan oleh PT. Lentera Bumi Nusantara. Turbin angin yang dikembangkan didesain untuk TSR 7 dengan kecepatan angin mencapai 12m/s [8]. Potensi angin dipantai ciheras memiliki potensi yang cukup baik dimana kecepatan angin yaitu berkisar diantara 3 – 12 m/s [3]. Turbin angin skala mikro memiliki kelebihan dari pada turbin angin skala besar yaitu harga dan operasional rendah, proses pemasangan dan perawatan yang lebih mudah, mudah diterima di lingkungan masyarakat, dampak dan beban terhadap lingkungan kecil [7].

Bilah merupakan bagian komponen yang berinteraksi langsung dengan angin yang menjadi elemen penting pada suatu sistem turbin angin. Seperti angin, bilah memiliki pengaruh yang signifikan terhadap daya luaran turbin angin, beberapa penelitian telah dilakukan tentang optimasi bilah turbin angin. Oleh karena itu, untuk mengoptimalkan energi angin yang bisa di ekstrak oleh bilah diperlukan bentuk desain bilah yang optimal. Berdasarkan jenisnya bilah terbagi menjadi tiga yaitu *taper*, dimana panjang *chord* mengecil dari pangkal ke ujung, *taperless*, dimana panjang *chord* dari pangkal sampai ujung sama dan *inverttaper* adalah kebalikan dari bilah *taper*. Keunikan dari bilah jenis *taperless* ialah memiliki efisiensi yang lebih baik pada kecepatan angin sedang.

Beberapa teori telah banyak dikembangkan untuk merancang bilah turbin angin sumbu horizontal dan memprediksi performa bilah yang dikenal sebagai *blade element theory*, *momentum theory* dan *Blade Element Momentum* (BEM). Teori ini adalah cara cepat untuk menyelesaikan masalah analisis dan memberikan hasil yang akurat dalam kondisi stabil [9]. Untuk memprediksi efisiensi dari sebuah turbin angin menggunakan metode pendekatan *Blade Element Momentum* (BEM) yang digunakan pada *Qblade*. Simulasi pada *Qblade* menggunakan pendekatan iterasi dan verifikasi simulasi BEM seperti terowongan angin dan menganalisa bilah dari sudut pandang dua dimensi. Oleh karena itu, baling-baling HAWT modern didesain menggunakan metode ini [10].

Beberapa penelitian terdahulu telah banyak dilakukan di antaranya Nuraini, dkk (2019) dalam penelitiannya membandingkan bilah jenis *taper* dan *taperless* dengan *airfoil* NACA 4412. Hasil dari penelitian mendapatkan bahwa bilah jenis *taperless* lebih optimal dari bilah jenis *taper* [11]. Adapun penelitian yang dilakukan Nishizawa (2011) menyatakan bahwa implementasi turbin angin yang cocok di daerah perkotaan yang kecepatan anginnya berkisar di antara 3-7 m/s adalah turbin angin skala mikro, dikarenakan turbin angin ini memiliki *tip speed ratio* (TSR) yang kecil sehingga ketika turbin angin bekerja tidak terlalu menimbulkan kebisingan [12]. Kemudian penelitian yang dilakukan Sari (2019) mengenai desain bilah *taperless* dilaporkan bahwa penerapan bilah *taperless* untuk kecepatan angin di Tasikmalaya yang berkisar antara 7-12 m/s sangat cocok digunakan pada turbin angin dengan nilai C_p maksimum 0.5 [13]. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Augustiantyo (2021) bahwa *Twist* dan *Chord* pada bilah sangat mempengaruhi desain dan performa turbin angin itu sendiri [14].

Bilah sumbu horizontal dipertimbangkan karena jenis turbin angin ini digunakan secara komersial di seluruh dunia dan jenis turbin angin lainnya seperti turbin angin sumbu vertikal belum terlalu umum. Tujuan penelitian bermaksud untuk mendesain bilah jenis *taperless* dengan variasi 4 *airfoil* dengan menggunakan perangkat lunak *Microsoft Excel* sebagai pengolahan data dan di Analisa menggunakan *Qblade* untuk mengetahui performa bilah yang terjadi pada turbin angin kapasitas 500 watt.

II. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode simulasi dengan bantuan perangkat lunak *Microsoft*

Excel dan *Qblade*. Adapun metode ini dibagi menjadi beberapa tahap, antara lain: Tahap I Perancangan geometri bilah untuk mencari jari-jari bilah dan nilai *Twist* dengan *Microsoft Excel* dalam bentuk tabel. Tahap II adalah tahap simulasi dan analisis hasil perancangan menggunakan *Qblade*, pada tahap ini diharapkan diperoleh hasil *coefficient performance* dan *tip speed ratio* (TSR) dalam bentuk grafik. Tahap III adalah validasi rancangan untuk mengetahui daya dan torsi yang dihasilkan terhadap kecepatan putar bilah untuk mengetahui performa dari masing-masing bilah.

2.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk memahami mekanisme kerja dan konsep Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dan menentukan metode yang tepat dalam merancang, memprediksi performa turbin angin. Studi literatur dilakukan melalui *ebook*, *paper* penelitian, *artikel* di internet, dan modul perancangan bilah.

2.2 Perancangan Geometri Bilah

Efisiensi sistem menjadi parameter awal untuk perancangan bilah. Dengan asumsi bilah dan komponennya dengan mengalikan efisiensi sistem maka persamaan untuk efisiensi sistem turbin angin adalah:

$$K = \eta_b \times \eta_t \times \eta_g \times \eta_c \quad (1)$$

Dimana:

- K = Efisiensi sistem
- η_b = Efisiensi bilah
- η_t = Efisiensi transmisi
- η_g = Efisiensi generator
- η_c = Efisiensi kontroler

Selanjutnya menentukan daya angin yang dibutuhkan dengan kapasitas daya listrik yang diinginkan sebesar 500W menyesuaikan dengan generator yang di gunakan. Setelah didapatkan nilai efisiensi turbin angin maka dapat diketahui daya angin yang dibutuhkan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_a = \frac{P_{el}}{K} \quad (2)$$

Dimana:

- P_{el} = Kapasitas daya generator (W)
- P_a = Daya angin yang dibutuhkan (W)
- K = Efisiensi sistem

Setelah mendapatkan nilai daya angin yang dibutuhkan maka kita dapat menentukan panjang jari-jari bilah yang akan digunakan. Sebelum menentukan jari-jari bilah terlebih dahulu mencari luas sapuan bilah. Luas sapuan adalah area yang dilewati angin dan mendorong bilah. Luas sapuan dapat dicari menggunakan persamaan 3 setelah luas sapuan diketahui maka jari-jari bilah dapat di tentukan menggunakan persamaan 4.

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

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (4)$$

Dimana:

- A = luas sapuan bilah (m^2)
- R = jari-jari bilah (m)
- V_{max} = kecepatan angin maksimal (m/s)

ANALISIS 4 AIRFOIL BILAH TAPERLESS TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN SUMBU HORIZONTAL MENGGUNAKAN SOFTWARE Q-BLADE

Setelah jari-jari bilah didapatkan selanjutnya menentukan jari-jari parsial dengan membagi bilah menjadi 10 elemen yang bertujuan untuk menghitung keakuratan dalam perancangan. Untuk menghitung jari-jari parsial dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$r = 0,17 + \left[\left(\frac{R - 0,17}{n} \right) x(\text{elemen}) \right] \quad (5)$$

r = jari-jari parsial (m)
R = jari-jari yang digunakan (m)
n = jumlah elemen

Setelah membagi bilah menjadi 10 elemen selanjutnya menentukan nilai *tip speed ratio* (TSR) yang digunakan. TSR merupakan angka perbandingan antara kecepatan di ujung bilah dengan kecepatan angin. Nilai TSR akan berpengaruh terhadap performa turbin angin, pada tabel I dapat dilihat perbandingan nilai *tip speed ratio* terhadap jumlah bilah, dan fungsi penggeraknya yang dipaparkan oleh Piggot H. dalam bukunya "Windpower Workshop" pada tahun 1997.

TABEL I
NILAI TIP SPEED RATIO TERHADAP PENGGERAK [15]

Tip speed ratio	Jumlah Bilah	Penggerak
1	6 - 20	Slow pumps
2	4 - 12	Faster pumps
3	3 - 6	Dutch 4-bladed
4	2 - 4	Slow generators
5 - 8	2 - 3	Generators
8 - 15	1 - 2	Fastest possible

TSR parsial merupakan perbandingan kecepatan angin di setiap elemen bilah yang berbeda-beda terhadap kecepatan angin. Persamaan untuk TSR parsial adalah:

$$\lambda_r = \frac{r}{R} \cdot \lambda \quad (6)$$

Dimana:

λ_r = TSR parsial
r = jari-jari parsial
R = jari-jari yang digunakan
 λ = *tip speed ratio* yang di gunakan yaitu 7

Selanjutnya menentukan nilai dari *coefficient lift* yang nanti digunakan untuk mencari nilai alpha pada tiap elemen bilah. Dengan persamaan 7 kita dapat menentukan berapa nilai *coefficient lift* untuk tiap elemen bilah.

$$C_l = \frac{16\pi \cdot R \cdot \left(\frac{R}{r}\right)}{9\lambda^2 \cdot B \cdot C_r} \quad (7)$$

Dimana:

C_l = *coefficient lift*
B = jumlah bilah
 C_r = lebar bilah

Setelah nilai C_l didapatkann selanjutnya kita menentukan nilai sudut aliran udara yang digunakan ntuk mendapatkan

sudut puntir pada tiap jari-jari bilah. Menentukan sudut alir pada setiap elemen bilah dengan persamaan sebagai berikut:

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_r} \quad (8)$$

Dimana:

ϕ = sudut alir
 λ_r = TSR parsial

Setelah sudut alir ditentukan, sudut puntir untuk semua variasi jari-jari bilah dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\beta = \phi - \alpha \quad (9)$$

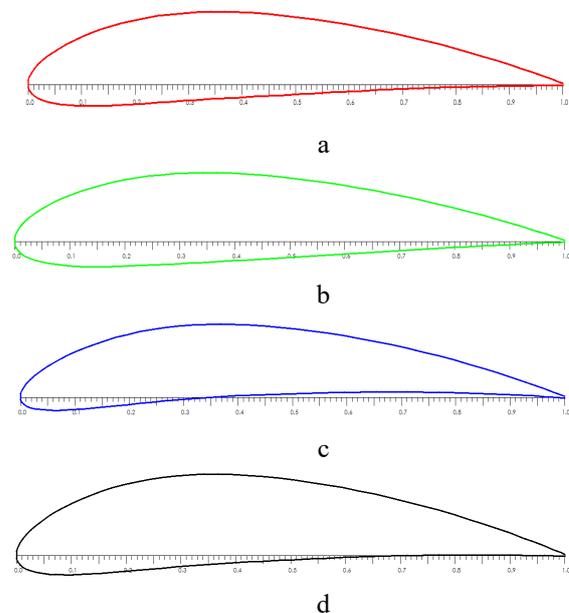
Dimana:

β = sudut puntir/*twist*

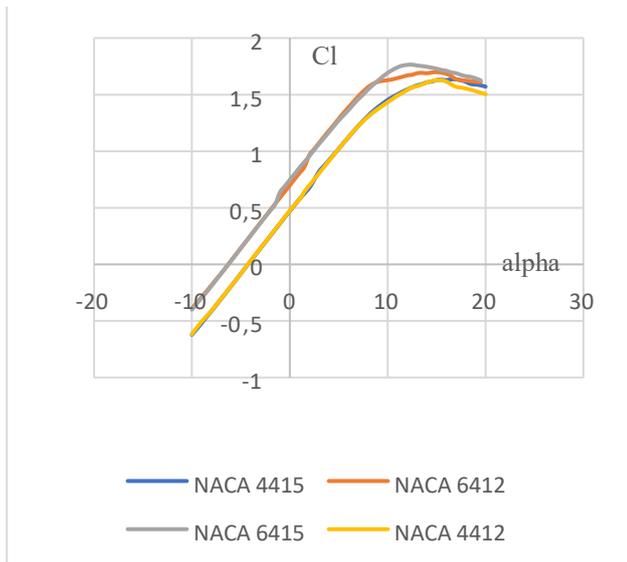
Setelah geometri bilah didapat, selanjutnya dilakukan proses optimasi bilah dengan cara linearisasi sudut puntir dari setiap elemen bilah menggunakan *Microsoft Excel*. Nilai puntiran tersebut sangat mempengaruhi dalam perancangan bilah karena hingga tahap ini akan mendapatkan puntiran yang sangat ekstrim. Hasil linearisasi sudut puntir dapat mempengaruhi nilai C_p dan TSR bilah tersebut. Bilah perlu dilakukan linearisasi karena dapat memudahkan proses manufaktur bilah. dan Simulasi rancangan Bilah di *Qblade*

2.3 Simulasi pada *Qblade*

Pada tahap ini dilakukan simulasi menggunakan perangkat lunak *Qblade* terhadap hasil perancangan untuk mengetahui karakteristik setiap bilah terhadap performa turbin angin. Data yang disajikan yaitu *coefficient performance* (C_p), Torsi (T), dan Daya (P) dalam bentuk grafik. Gambar 1 merupakan model *airfoil* dari NACA yang akan digunakan.



Gambar 1 Model airfoil semua variasi: a. NACA 4412, b NACA 4415, c. NACA 6412, d. NACA 6415



Gambar 2 Kurva karakteristik Cl vs alpha semua variasi

Dari gambar 2 memperlihatkan grafik perbandingan *coefficient lift* (Cl) terhadap sudut α semua variasi *airfoil*. Grafik Cl vs alpha didapat dari simulasi karakteristik *airfoil* pada *Qblade*. Setiap kenaikan nilai alpha, nilai Cl akan naik mencapai titik optimum. Dengan mengetahui nilai besar sudut alpha (α) dan (Cl) menjadi parameter awal dalam perancangan geometri bilah.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini turbin angin yang digunakan yaitu TSD 500W dengan kapasitas daya 500W. pada tahap perancangan bilah, kapasitas generator berpengaruh terhadap ukuran dan dimensi bilah. Tabel II memperlihatkan parameter awal perancangan bilah untuk mencari jari-jari yang digunakan. Dari hasil perhitungan menggunakan persamaan 4 kita dapat menentukan panjang jari-jari bilah yang digunakan yaitu 0.8m pada kecepatan maksimum 12m/s dengan jenis bilah *taperless*.

TABEL II
PARAMETER AWAL PERANCANGAN BILAH

Kapasitas daya listrik	Efisiensi					Daya Angin	V max	Luas Sapuan	Jari - jari (R)	Jari-jari yang digunakan
	Bilah	Transmisi	Generator	Controller	Sistem					
500	0.3				0.24	2057.6		1.94	0.79	
	0.4	1	0.9	0.9	0.32	1543.2	12	1.46	0.68	0.80

Selanjutnya membagi bilah menjadi 10 elemen untuk mempermudah dalam proses pembuatan. Data geometri awal semua bilah dapat dilihat pada bagian lampiran. Kemudian dilakukan linearisasi 75% pada titik ke 7 atau ke 8. Tujuan dari linearisasi dilakukan untuk mempermudah proses pembuatan dan dapat mempengaruhi performa dari bilah. Hasil dari linearisasi setiap bilah dapat dilihat pada tabel III-VI yang mana pada bagian *twist* semua bilah *airfoil* NACA cukup ekstrim. Metode linearisasi dilakukan dengan *Microsoft Excel*, karena yang akan digunakan adalah persamaan yang dikeluarkan oleh trendline grafik tersebut.

TABEL III
LINEARISASI SUDUT PUNTIR NACA 4412

Elemen	Jari-jari parsial (m)	Twist (°)	Twist Optimasi (°)
0	0.17	15.96	12.67
1	0.23	13.82	12.06
2	0.30	12.24	11.44
3	0.36	10.92	10.82
4	0.42	10.05	10.20
5	0.49	9.34	9.59
6	0.55	8.80	8.97
7	0.61	8.35	8.35
8	0.67	7.74	7.74
9	0.74	7.74	7.12
10	0.80	7.46	6.50

TABEL IV
LINEARISASI SUDUT PUNTIR NACA 4415

Elemen	Jari-jari parsial (m)	Twist (°)	Twist Optimasi (°)
0	0.17	15.96	11.07
1	0.23	13.92	10.69
2	0.30	12.02	10.30
3	0.36	10.88	9.91
4	0.42	9.96	9.53
5	0.49	9.27	9.14
6	0.55	8.75	8.75
7	0.61	8.36	8.36
8	0.67	7.98	7.98
9	0.74	7.71	7.59
10	0.80	7.44	7.20

Berdasarkan Tabel III, IV, V, VI didapatkan nilai sudut puntir hasil linearisasi pada NACA 4412; 4415; 6412; 6415 pada elemen 0 yaitu 12,67°; 11,07°; 13,24°; 12,98° hingga elemen 10 yaitu 6,50°; 7,20°; 9,17°; 9,21°. Setelah dilakukan linearisasi pada sudut puntir selanjutnya dianalisa menggunakan perangkat lunak *Qblade* untuk mengetahui hasil simulasi C_p terhadap TSR tersebut.

ANALISIS 4 AIRFOIL BILAH TAPERLESS TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN SUMBU HORIZONTAL MENGGUNAKAN SOFTWARE Q-BLADE

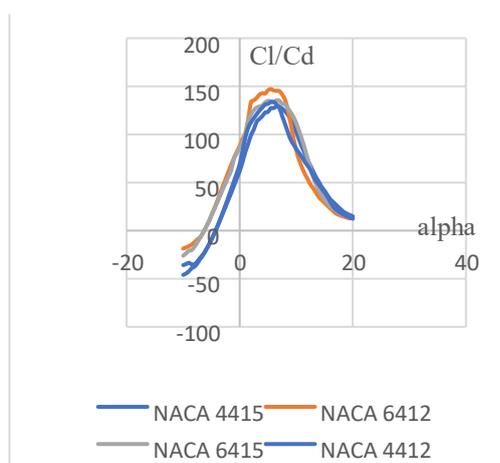
TABEL V
LINEARISASI SUDUT PUNTIR NACA 6412

Elemen	Jari-jari parsial (m)	Twist (°)	Twist Optimasi (°)
0	0.17	17.98	13.24
1	0.23	15.79	12.84
2	0.30	14.19	12.43
3	0.36	13.02	12.02
4	0.42	12.05	11.62
5	0.49	11.34	11.21
6	0.55	10.80	10.80
7	0.61	10.39	10.39
8	0.67	9.99	9.99
9	0.74	9.71	9.58
10	0.80	9.42	9.17

TABEL VI
LINEARISASI SUDUT PUNTIR NACA 6415

Elemen	Jari-jari parsial (m)	Twist (°)	Twist Optimasi (°)
0	0.17	17.86	12.98
1	0.23	15.72	12.61
2	0.30	14.17	12.23
3	0.36	12.95	11.85
4	0.42	12.02	11.48
5	0.49	11.29	11.10
6	0.55	10.77	10.72
7	0.61	10.34	10.34
8	0.67	9.97	9.97
9	0.74	9.73	9.59
10	0.80	9.39	9.21

A. Simulasi dan analisis performa setiap bilah.



Gambar 3 Kurva karakteristik Cl/Cd vs alpha semua variasi

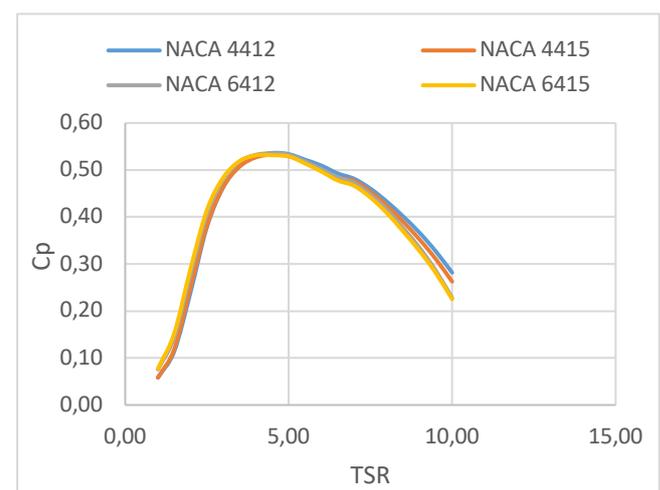
Dari kurva Cl/Cd terhadap alpha pada gambar 3 kita dapat menentukan nilai *coefficient lift* (Cl) optimum.. Nilai didapatkan dari hasil simulasi menggunakan *QBlade v0.963*. sebuah *airfoil* memiliki fenomena *stall* ketika aliran pada sudut alpha yang tinggi, biasanya lebih besar dari 15° [16].

Setelah perancangan geometri semua variasi *airfoil* bilah selesai selanjutnya dilakukan simulasi rotor menggunakan *QBlade* dengan metode *Blade Element Momentum* (BEM). Dalam penelitian ini jenis *airfoil*, sudut serang, dan *chord* adalah variabel optimasi sedangkan kecepatan angin, jumlah bilah, dan jari-jari bilah dianggap sebagai konstanta. Parameter yang digunakan saat simulasi di perlihatkan pada Tabel VII.

TABEL VII
PARAMETER SIMULASI Q-BLADE

Variabel-Variabel	Nilai
Iterasi	100
Densitas Udara	1225 Kg/m ³
Viskositas Dinamik	1,64x10 ⁻⁵ Ns/m ²

Semua percobaan simulasi BEM dilakukan pada kecepatan angin 12m/s. Perbedaan TSR dipengaruhi oleh kecepatan putar turbin angin. Berdasarkan hasil simulasi bahwa seluruh variasi *airfoil* bilah memiliki Cp 53,% pada TSR 4,5-5. Gambar 4 menunjukkan hasil distribusi performa bilah pada TSR Berbeda.

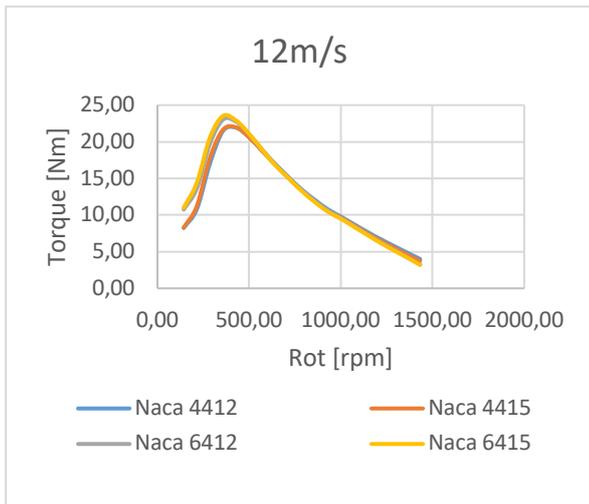


Gambar 4 Grafik Cp vs TSR semua variasi

Dalam pengaplikasiannya menurut buku “Windpower Workshop” yang di tulis oleh Piggot H. pada tahun 1997 bahwa bilah tidak dapat mengekstrak energi yang terkandung pada massa udara yang melewati rotor lebih dari 59,3%. Atau yang dikenal dengan koefisien betz. Bahkan bilah *airfoil* yang dirancang terbaik akan kehilangan 10% atau lebih dari energi angin yang bisa di konversi menjadi energi kinetik. Karena mengalami rugi-rugi yang berasal dari

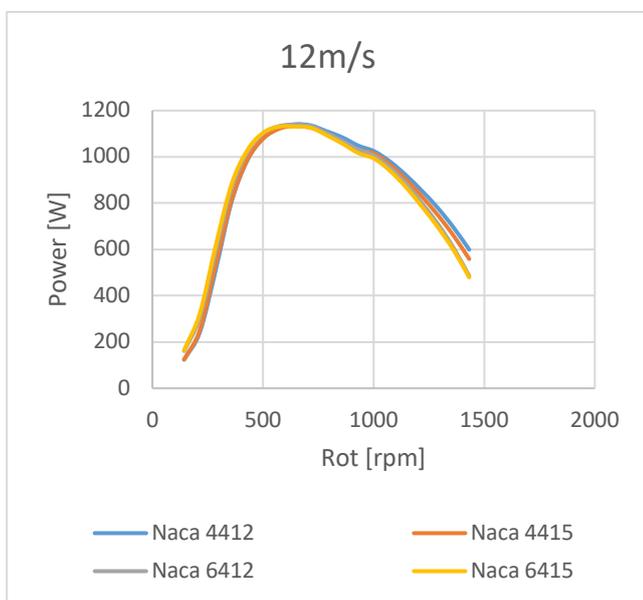
sistem seperti loss dari generator, loss kontroler serta komponen lainnya [15].

Dalam pemilihan tipe bilah yang perlu diperhatikan adalah C_p dan *tip speed ratio* (TSR). C_p merupakan tingkat efisiensi dari bilah, semakin besar efisiensinya maka semakin besar juga kemampuan suatu turbin untuk mengkonversi energi. TSR adalah perbandingan kecepatan ujung bilah terhadap angin, maka semakin besar TSR akan semakin besar putarannya [8]. Nilai torsi sebanding dengan nilai TSR, apabila TSR yang dimiliki rendah maka nilai torsi juga rendah. Jika kecepatan putar lebih kecil dibandingkan kecepatan angin, maka bilah akan mengalami fenomena *stall* dan performa akan turun drastis.



Gambar 5 Grafik torsi vs rpm

Gambar 5 memperlihatkan hasil Torsi dari kecepatan maksimal setiap variasi terhadap kecepatan putar. Torsi tertinggi berada pada bilah dengan *airfoil* NACA 6412 dan torsi terkecil berada pada bilah dengan *airfoil* NACA 4412.



Gambar 6. Grafik power vs rpm semua variasi

Gambar 6 merupakan hasil simulasi daya terhadap kecepatan putar. Berdasarkan grafik di atas, pada kecepatan angin 12m/s daya tertinggi yang dihasilkan 4 variasi *airfoil* bilah diantara 1130,91 watt – 1141,22 watt pada kecepatan putar 600-650 rpm dan Torsi yang dihasilkan 16-17 Nm. Secara keseluruhan hasil simulasi semua *airfoil* bilah membutuhkan kecepatan awal yang kecil untuk berputar yaitu 3-4m/s pada kecepatan putar 150-200rpm dengan torsi 2-2,5 Nm.

Bilah dengan jenis *taperless* memiliki karakteristik lebih efektif digunakan ketika kecepatan angin rendah dan sedang. Daya yang dihasilkan dipengaruhi oleh luas sapuan udara dimana karakteristik bilah *taperless* memiliki panjang *chord* bernilai sama dari pangkal hingga ujung, sehingga energi angin yang di ekstrak dan di konversi menjadi energi kinetik lebih besar.

B. Perbandingan hasil simulasi *airfoil*

TABEL VIII
PERBANDINGAN HASIL SIMULASI AIRFOIL

	NACA 4412	NACA 4415	NACA 6412	NACA 6415
Cl/Cd	133.6	129.06	147.11	135.5
Daya Maks (watt)	1141.2	1133.2	1139.5	1130.9
Torsi Maks (Nm)	21.92	21.96	23.02	23.54

Pada Tabel VIII dapat kita ketahui perbandingan setiap bilah, perbandingan ini untuk melihat pengaruh nilai Cl/Cd dengan torsi yang bekerja pada bilah. Pada bilah skala kecil performa yang dihasilkan dengan jenis bilah yang sama tidak berpengaruh secara signifikan. Nilai Cl/Cd tertinggi yaitu NACA 6412. Semakin tinggi nilai Cl/Cd memiliki gaya dorong yang tinggi terhadap angin relatif. Tebalnya bilah dan besarnya *chamber* menjadi faktor yang mempengaruhi nilai Cl/Cd, dengan *chamber* yang besar dan ketebalan yang kecil maka nilai Cl/Cd terhadap alpha akan tinggi, untuk nilai daya setiap *airfoil* relatif sama, daya maksimal belum tentu berada pada torsi maksimal. Nilai torsi berbanding terbalik dengan nilai Cl/Cd, semakin besar *chamber*, torsi yang dibutuhkan juga besar. Dari hasil simulasi didapatkan bahwa pemilihan *airfoil* bilah turbin angin NACA 4412 dan NACA 4415 memiliki performa yang lebih baik dari NACA 6412 dan NACA 6415.

IV. KESIMPULAN

Berikut dapat diambil kesimpulan pada penelitian yang telah dilakukan, adalah hasil perancangan bilah *Taperless* memiliki panjang jari-jari 0,8 m, dan nilai *Twist* optimasi yang digunakan setiap bilah yaitu NACA 4412, 4415, 6412, 6415 pada elemen 0 yaitu 12,67°; 11,07°; 13,24°; 12,98° hingga elemen 10 yaitu 6,50°; 7,20°; 9,17°; 9,21°. Kemudian hasil simulasi Qblade didapatkan nilai *coefficient performance* (C_p) yaitu 53% pada TSR 4,5-5 untuk 4 variasi *airfoil* bilah. Dari hasil simulasi daya dan torsi terhadap rpm pada kecepatan angin 12 m/s daya tertinggi dihasilkan di antara 1130,91-1141,22 watt pada kecepatan putar 600-650 rpm dengan torsi 16-17Nm. Hasil simulasi dan analisis

ANALISIS 4 AIRFOIL BILAH TAPERLESS TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN SUMBU HORIZONTAL MENGGUNAKAN SOFTWARE Q-BLADE

performa 4 variasi *airfoil* bilah didapatkan *airfoil* NACA 4412 dan NACA 4415 yang menghasilkan performa lebih baik dari NACA 6412 dan NACA 6415. Dari perbandingan 4 *arfoil* dengan jenis bilah sama tidak memiliki pengaruh yang signifikan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Lentera Bumi Nusantara atas fasilitas dan pengalaman selama melakukan penelitian ini. Penulis juga berterima kasih kepada Tim LBN selaku pembimbing lapangan atas diskusi dan bimbingannya yang bermanfaat.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] Kompas Media, "Kebutuhan Energi Terus Meningkatkan, ini langkah yang disiapkan," 2020. [Online]. Available: <https://www.msn.com/id-id/ekonomi/ekonomi/kebutuhan-energi-terus-meningkat-ini-langkah-yang-disiapkan-pemerintah-ar-BB1bibV4>. [Accessed 8 Maret 2021].
- [2] BPPT, Outlook Energi Indonesia, Jakarta: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, 2018.
- [3] A. Bachtiar and W. Hayattul, "Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Angin PT. Lentera Angin Nusantara (LAN) Ciheras," *Jurnal Teknik Elektro ITP*, Vols. 7, 2018, pp. 35-45.
- [4] F. Fauzi and A. Hermanto, "Analisis Kelayakan Ekonomi dan Finansial Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) dengan menggunakan Software Visual Basic For Applications (VBA)," *Barometer*, vol. 6, no. 2, pp. 335-342, 2021.
- [5] E. Liun, "POTENSI ENERGI ALTERNATIF DALAM SISTEM KELISTRIKAN INDONESIA," in *Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir IV*, Jakarta, 2011.
- [6] KESDM, Rencana Strategis Kementerian ESDM Tahun 2015-2019, 2015.
- [7] E. Musyarofah, "Rancang Bangun Sudu Inverse Taper pada Small Wind Turbine dengan Tipe Airfoil SG6042," Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2020.
- [8] LAN, *Pengenalan Teknologi Pemanfaatan Energi Angin*, Tasikmalaya, Jawa Barat, 2014.
- [9] M. Mohammadi, A. Mohammadi and S. Farahat, "A New Method for Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) Blade Optimization," *Int. Journal of Renewable Energy Development*, Vols. 5, 2016, pp. 1-8.
- [10] D. Marten, *Qblade Guidelines v 0.6*, Berlin: TU, 2012.
- [11] A. Nuraini and dkk, "Analisis Perbandingan Bilah Turbin Angin Jenis Taper dengan Taperless pada Turbin Angin Skala Mikro di PT. Lentera Bumi Nusantara," *Prosiding Semnas Mesin PNJ*, pp. 138-146, 2019.

- [12] Y. Nishizawa, *An Experimental Study of the Shapes of Rotor for Horizontal-Axis Small Wind Turbines*, Japan: InTech, 2011.
- [13] N. H. Sari and W. G. Laksmana, "Perancangan bilah tipe taperless pada kincir angin: studi kasus di PT. Lentera Bumi Nusantara Tasikmalaya," *Dinamika Teknik Mesin*, vol. 9, no. 2, pp. 104-109, Juli 2019.
- [14] B. Augustiantyo, R. Setiawan and Oleh, "Optimasi Desain Bilah Dengan Metode Linearisasi Chord dan Twist terhadap Performa Turbin Angin Sumbu Horizontal," *Jurnal Media Mesin*, vol. 22, no. 2, pp. 97-110, 2021.
- [15] H. Piggot, *Windpower Workshop*, Wales: Centre for Alternative Technology, 1997.
- [16] F.-B. Hsiao, C.-J. Bai and W.-T. Chong, "The Performance Test of Three Different Horizontal Axis Wind turbine (HAWT) Blade Shapes Using Experimental and Numerical Methods," *Energies*, Vols. 6, 2013, pp. 2784-2803.

LAMPIRAN DATA GEOMETRI BILAH SEMUA AIRFOIL

NACA 4412						
Elemen	Jari-jari parsial (m)	TSR Parsial (m)	Cl	Alpha	Flow Angle (°)	Twist (°)
0	0.17	1.49	1.19	6.65	22.61	15.96
1	0.23	2.04	0.87	3.60	17.42	13.82
2	0.30	2.59	0.68	1.83	14.07	12.24
3	0.36	3.14	0.56	0.85	11.77	10.92
4	0.42	3.69	0.48	0.05	10.10	10.05
5	0.49	4.24	0.42	-0.50	8.84	9.34
6	0.55	4.80	0.37	-0.95	7.85	8.80
7	0.61	5.35	0.33	-1.29	7.06	8.35
8	0.67	5.90	0.30	-1.32	6.42	7.74
9	0.74	6.45	0.27	-1.86	5.88	7.74
10	0.80	7.00	0.25	-2.04	5.42	7.46

NACA 4415						
Elemen	Jari-jari parsial (m)	TSR Parsial (m)	Cl	Alpha	Flow Angle (°)	Twist (°)
0	0.17	1.49	1.19	6.65	22.61	15.96

NACA 4415						
Elemen	Jari-jari parsial (m)	TSR Parsial (m)	Cl	Alpha	Flow Angle (°)	Twist (°)
1	0.23	2.04	0.87	3.50	17.42	13.92
2	0.30	2.59	0.68	2.05	14.07	12.02
3	0.36	3.14	0.56	0.89	11.77	10.88
4	0.42	3.69	0.48	0.14	10.10	9.96
5	0.49	4.24	0.42	-0.43	8.84	9.27
6	0.55	4.80	0.37	-0.90	7.85	8.75
7	0.61	5.35	0.33	-1.30	7.06	8.36
8	0.67	5.90	0.30	-1.56	6.42	7.98
9	0.74	6.45	0.27	-1.83	5.88	7.71
10	0.80	7.00	0.25	-2.02	5.42	7.44

NACA 6415						
Elemen	Jari-jari parsial (m)	TSR Parsial (m)	Cl	Alpha	Flow Angle (°)	Twist (°)
0	0.17	1.49	1.19	4.75	22.61	17.86
1	0.23	2.04	0.87	1.70	17.42	15.72
2	0.30	2.59	0.68	-0.10	14.07	14.17
3	0.36	3.14	0.56	-1.18	11.77	12.95
4	0.42	3.69	0.48	-1.92	10.10	12.02
5	0.49	4.24	0.42	-2.45	8.84	11.29
6	0.55	4.80	0.37	-2.92	7.85	10.77
7	0.61	5.35	0.33	-3.28	7.06	10.34
8	0.67	5.90	0.30	-3.55	6.42	9.97
9	0.74	6.45	0.27	-3.85	5.88	9.73
10	0.80	7.00	0.25	-3.97	5.42	9.39

NACA 6412						
Elemen	Jari-jari parsial (m)	TSR Parsial (m)	Cl	Alpha	Flow Angle (°)	Twist (°)
0	0.17	1.49	1.19	4.63	22.61	17.98
1	0.23	2.04	0.87	1.63	17.42	15.79
2	0.30	2.59	0.68	-0.12	14.07	14.19
3	0.36	3.14	0.56	-1.25	11.77	13.02
4	0.42	3.69	0.48	-1.95	10.10	12.05
5	0.49	4.24	0.42	-2.50	8.84	11.34
6	0.55	4.80	0.37	-2.95	7.85	10.80
7	0.61	5.35	0.33	-3.33	7.06	10.39
8	0.67	5.90	0.30	-3.57	6.42	9.99
9	0.74	6.45	0.27	-3.83	5.88	9.71
10	0.80	7.00	0.25	-4.00	5.42	9.42