

Rancang Bangun Bilah Berbahan Expanded Polystyrene (EPS) Foam untuk Kecepatan Angin Rendah pada Produk Horizontal Axial Wind Turbine

Rosmawan Arwinda Setyaningrum

Program Studi Teknik Elektro
Institut Teknologi Sumatera, Indonesia
rosmawan.13117028@student.itera.ac.id

Dean Corio

Program Studi Teknik Elektro
Institut Teknologi Sumatera, Indonesia
dean.corio@el.itera.ac.id

Abstract – The increasing use of electrical energy is inversely proportional to the diminishing fossil energy sources. New and Renewable Energy is one of the alternative energy that is being developed now. One of the energy used in the utilization of new and renewable energy is wind energy. In this study, we will discuss the manufacture of blades made from Expanded Polystyrene (EPS) Foam which is intended for wind turbines at low wind speeds. The use of this material is used and is able to form a blade with a weight of ± 300 gram. This blade uses an Inverse Tapper type blade, which is a blade with an enlarged geometry at the tip, this geometry has a large surface so that it can receive more wind so that it can rotate at low wind speeds. The design and manufacture of blades is carried out using Aeolus ASP software which is open source on several analysis features and serves to determine the performance of the blades as well as to analyze aerodynamics and optimization of the shape of the blades designed to use Blade Element Momentum (BEM). This blade is capable of producing a voltage of 12.09 V. In the process of making the blade using wire cut to create geometry with National Advisory Committee for National Aeronautics (NACA) 4412 airfoil. The blade uses layers of balsa wood and monocoque plastic sheets, and uses wood plywood as the base of the blade.

Keywords : blade, inverse taper, low wind speed, wind energy



Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.

I. PENDAHULUAN

Dewasa ini sumber Energi Baru Terbarukan menjadi solusi alternatif untuk pemenuhan kebutuhan listrik yang semakin meningkat. Banyak sumber pembangkit EBT yang telah diteliti, salah satunya adalah Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) [1]. Hal yang diteliti pada PLTB ini diantaranya adalah meningkatkan performa [2], efisiensi [3], menyesuaikan dengan lingkungan [4], bilah [5], dan teknik pengontrolannya [6]. Secara jenis turbinnya PLTB ini juga terdiri dari *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) [7], *Vertical Axis Wind Turbine*

(VAWT). HAWT mempunyai efisiensi yang tinggi [8], bisa digunakan untuk menghasilkan energi yang besar dengan kecepatan angin lebih tinggi dan ukuran pembangkit lebih besar [9], *power regulation* dengan kontrol sudut dan *pitch* pada kecepatan angin tinggi [10], peluang penelitiannya masih banyak seperti; harga instalasi yang relatif tinggi [11], *nacelle* nya berat dan perlu tiang yang kuat sebagai penyangga, membutuhkan kabel panjang untuk menghubungkan keluaran generator di atas tiang sampai ke sistem kontrol yang ada dibawahnya, memerlukan *control yaw* [12]. VAWT mempunyai harga instalasi yang relatif rendah serta gampang di *maintenance* karena *gearbox* dan generator relatif dekat dengan tanah, dapat beroperasi independen berdasarkan arah angin, cocok digunakan pada *rooftop* yang memiliki angin cukup kuat dan tidak membutuhkan tiang yang tinggi [13]. VAWT mempunyai efisiensi konversi yang rendah, fluktuasi torka yang besar, rentan terhadap guncangan karena sistem mekanik [14].

HAWT memanfaatkan efek gaya angkat sebagai gaya penggerak turbin, karena itu kecepatan linier bilah dapat lebih besar daripada kecepatan angin [15]. HAWT dalam aplikasinya sering menggunakan penerapan bilah ideal, yaitu berjumlah tiga buah bilah sehingga gaya terdistribusi seimbang [16]. Selain itu hal yang berpengaruh terhadap turbin angin jenis ini adalah penentuan titik optimal, dimana titik ini akan mempengaruhi sudut *pitch*. Semakin besar sudut *pitch* pemasangan maka turbin angin akan lebih mudah mengalami *cut in speed* [17].

Material bilah turbin angin sangat berpengaruh terhadap masa jenis dan gaya angkatnya. Banyak peneliti terkonsentrasi untuk menguji dan menentukan jenis material yang dapat menghasilkan gaya maksimal pada kecepatan angin tertentu. Sebelumnya Multazam telah meneliti dan membandingkan pembuatan bilah dengan material pinus dan material fiber, pada penelitian tersebut didapatkan nilai efisiensi lebih tinggi jika menggunakan material kayu pinus, karena putaran turbin dipengaruhi oleh masa jenis dari material yang digunakan pada bilah [18].

Rancang Bangun Bilah Berbahan Expanded Polystyrene (EPS) Foam untuk Kecepatan Angin Rendah pada Produk Horizontal Axial Wind Turbine

Panjang bilah juga mempengaruhi luas daerah sapuan yang akan dikonversi menjadi energi mekanik pada turbin, dimana semakin optimal panjang bilah maka daya mekanik yang didapatkan semakin besar [19].

Aerodinamis pada desain bilah juga menentukan optimalnya gaya dan daerah sapuan, selain itu berat juga mempengaruhi jumlah energi yang dapat dikonversi [20] dan mempengaruhi stabilitas angin [21]. Bilah yang berat memerlukan gaya awal yang besar, sehingga sulit untuk digunakan pada daerah dengan kecepatan angin relatif rendah. Pada kecepatan angin rendah perlu didesain bilah yang ringan dan tahan terhadap iklim, sehingga pada paper ini diusulkan pembuatan bilah dengan material *Expanded Polystyrene Foam* (EPF) material ini menjadi berbeda dengan penelitian sebelumnya, selain *massa*-nya ringan juga mudah dibentuk, sehingga dapat meningkatkan kinerja bilah. Tipe bilahnya adalah *inverse taper* dimana geometri tipe ini memiliki bentuk melebar pada bagian ujung bilah sehingga volume angin dapat lebih banyak menerpa bagian tersebut dan bilah mampu berputar pada kecepatan angin rendah [22].

II. TEORI DASAR

A. Energi Angin

Energi angin merupakan potensial sebagai energi berkelanjutan karena ketersediannya tidak terbatas dan ramah lingkungan. Energi angin dapat dimanfaatkan sebagai gaya dorong untuk memutar bilah turbin angin sehingga menghasilkan energi listrik. Energi yang dikonversi dapat dihitung menggunakan Persamaan 1 [23]. Dimana P adalah daya angin (watt), nialinya sebanding terhadap peralihan ρ kerapatan udara (kg/m^3) pada daerah pengujian, A luas daerah sapuan (m^2) dan V kecepatan angin (m/s).

$$P = \frac{1}{2} AV^3 \rho \quad (1)$$

B. Tip Speed Ratio

Tip Speed Ratio (TSR) merupakan perbandingan kecepatan ujung bilah terhadap kecepatan angin yang menerpa bilah sehingga berputar. Nilai TSR akan mempengaruhi turbin angin, Persamaan 2 digunakan untuk menghitung nilai TSR [22]. Dengan λ adalah *Tip Speed Ratio*, r adalah *Tip speed ratio* parsial yang berbanding terbalik dengan R sebagai jari-jari parsial (m), serta λ_R merupakan TSR yang digunakan.

$$\lambda = \frac{r}{R} \times \lambda_R \quad (2)$$

C. Coefficient Power (CP)

Coefficient Power adalah nilai kemampuan bilah dalam menangkap energy angin. Jika nilai C_p 60% maka maksudnya adalah 60% enegi angin yang mengenai daerah sapuan bilah akan diteruskan ke generator dan dikonversi menjadi listrik. Nilai C_p

adalah *Coefficient Power*, dan a merupakan induksi aksial dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3 [24].

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (3)$$

D. Airfoil

Airfoil merupakan bentuk geometris dari bilah yang menyebabkan aerodinamis pada permukaan bilah. Aerodinamis di desain dengan disain tertentu sehingga bilah mampu terangkat dengan konsep gaya angkat (*Lift Force*) dan gaya hambat (*Drag Force*) [25].

E. Lift Force

Lift Force adalah gaya yang tegak lurus terhadap aliran udara, gaya ini terjadi akibat adanya perubahan tekanan udara karena aliran udara yang melewati bagian terluar *airfoil*. Hal ini menyebabkan tekanan pada bagian bawah lebih besar dari pada bagian permukaan atas dari bilah sehingga menimbulkan gaya angkat dan dapat membuat bilah terangkat. F_L merupakan gaya angkat, C_L adalah koefisien *lift*, A luas permukaan yang dilewati udara, ρ merupakan desitas udara serta V merupakan kecepatan aliran udara. Gaya tersebut dapat dihitung menggunakan Persamaan 4 berikut [26].

$$F_L = \frac{1}{2} \times C_L \times A \times \rho \times V^2 \quad (4)$$

F. Drag Force

Drag Force adalah gaya hambat yang dihasilkan akibat adanya aliran fluida yang memiliki arah berlawanan. Gaya ini dapat dengan Persamaan 5 [27]. Dengan F_D merupakan gaya hambat, C_D adalah koefisien *drag*, A luas permukaan yang dilewati udara, ρ merupakan desitas udara serta V merupakan kecepatan aliran udara.

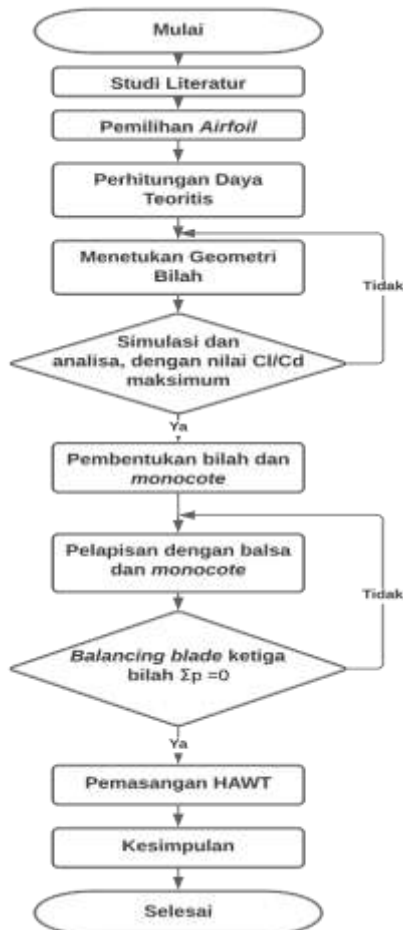
$$F_D = C_D \times A \times \frac{\rho \times V^2}{2} \quad (5)$$

III. METODE PENELITIAN

Perancangan serta pembuatan bilah dilakukan dengan menggunakan *software Aeolus ASP* yang bersifat *open source* pada beberapa fitur analisis dan berfungsi untuk mengetahui kinerja dari bilah [28]. *Software Aeolus ASP* digunakan untuk mengetahui performa dari bilah yang di rancang, digunakan untuk menganalisis aerodinamis dan optimasi dari bentuk bilah yang dirancang Selain itu digunakan juga *Blade Element Momentum* (BEM), yaitu metode pemodelan untuk mengevaluasi karakteristik aliran angin yang berinteraksi dengan turbin [29]. Metode BEM ini juga berfungsi untuk menganalisa parameter airfoil yang digunakan pada perancangan bilah untuk mengetahui nilai C_l/C_d pada penampang bilah. Perancangan menggunakan material EPF, lembaran kayu balsa, serta *monocote* sebagai pelapis kulit terluar, material EPF dibentuk menggunakan *wire cutting* untuk membentuk pola *airfoil*.

Rancang Bangun Bilah Berbahan Expanded Polystyrene (EPS) Foam untuk Kecepatan Angin Rendah pada Produk Horizontal Axial Wind Turbine

Diagram alir pada Gambar 1 merupakan proses pembuatan bilah mulai dari perancangan sampai implementasi. Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan *research gap* turbin angin, terutama untuk aplikasi pada daerah dengan rata-rata kecepatan angin rendah. Perhitungan daya teoritis dilakukan untuk mendapatkan ukuran dari generator, panjang bilah dan tinggi tiangnya, setelahnya dilakukan simulasi untuk mendapatkan nilai maksimum perbandingan c_l terhadap c_d nya. Hasil ini dijadikan parameter acuan untuk membangun bilah pada turbin angin.



Gambar 1. Diagram alir metodologi penelitian

Berikut beberapa perancangan dan simulasi yang dilakukan dalam menganalisa kinerja dari bilah yang dibuat.

A. Pemilihan Parameter Bilah

Perhitungan pada Tabel 1 dilakukan untuk mengetahui besaran parameter dasar yang dibutuhkan dalam sebuah perancangan bilah.

Tabel 1. Parameter awal perancangan.

We	η_b	η_g	η_c	K	Wa	V	A	R
600	0,3	0,8	0,8	0,192	3125	12	3,0	0,50

Tabel 1 terdapat beberapa parameter yang menjadi acuan awal penentuan nilai yang kita inginkan dalam perancangan. Parameter tersebut diantaranya

kapasitas daya listrik (We) yang diinginkan yaitu sebesar 600 watt. Dalam turbin terdapat parameter lain yang dilakukan perhitungan yaitu efisiensi, terdapat beberapa efisiensi sistem diantaranya efisiensi kontroler (η_c) dan efisiensi generator (η_g), efisiensi bilah (η_b), efisiensi transmisi (K), kemudia parameter awal lainnya adalah luas permukaan bilah (A), jari jari bilah (R) daya angin (Wa), kecepatan maksimal angin (V). Daya listrik yang diinginkan yaitu sebesar 600watt disesuaikan dengan spesifikasi generator yang digunakan. Dalam beberapa literatur disebutkan efisiensi pada turbin angin memiliki nilai maksimal daya mekanik sebesar 59.5% yang dapat diekstrak [30].

B. Perhitungan Geometri Bilah

Performa bilah dipengaruhi juga oleh geometrinya, terutama aerodinamis dan daya angkatnya. Dalam perancangan dilakukan pembagian elemen bilah dengan tujuan mempermudah proses manufacture. Bilah dibagi menjadi 10 elemen menggunakan tipe *inverse taper* dan TSR 3,5. Perhitungan parameter bilah diperlihatkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter perhitungan geometri bilah HAWT

n	r	λr	Cr	Cl	α	ϕ	β	β
1	0,1	0,7	0,12	3,1	2,37	36,6	34,3	13,1
	0	0	0	6		7	0	0
2	0,1	1,0	0,12	2,0	0,9	29,7	28,8	12,5
	4	1	7	6		9	9	6
3	0,1	1,3	0,13	1,4	-0,19	24,7	24,9	12,0
	9	2	5	9		3	2	1
4	0,2	1,6	0,14	1,1	-	20,9	21,6	11,4
	3	3	2	4	0,63	8	2	6
					5			
5	0,2	1,9	0,15	0,9	-0,99	18,1	19,1	10,9
	8	4	0	1		4	3	2
6	0,3	2,2	0,15	0,7	-1,3	15,9	17,2	10,3
	2	6	7	5		4	1	7
7	0,3	2,5	0,16	0,6	-1,5	14,1	15,6	9,82
	7	7	5	3		9	9	
8	0,4	2,8	0,17	0,5	-1,7	12,7	14,4	9,28
	1	8	2	4		7	7	
9	0,4	3,1	0,18	0,4	-1,9	11,6	13,5	8,73
	6	9	0	6		1	1	
1	0,5	3,5	0,18	0,4	-2,08	10,6	12,7	8,18
0			7	1		3	1	

Tabel 2 merupakan perhitungan parameter untuk merancang geometri bilah. Parameter yang perlu dihitung adalah nilai chord (Cr) yaitu lebar dari bilah. Panjang chord pada setiap elemen (n). Pada nilai elemen pertama kita akan menentukan jarak untuk penghubung antara hub bilah dengan bilah yang disebut pangkal, sebesar 10 cm. Kemudian parameter lainnya adalah koefisien lift (Cl), alpha (α), jari jari parsial (r), flow angle (ϕ) pada setiap elemen. Nilai flow angle ditentukan dengan Persamaan 6 berikut [31].

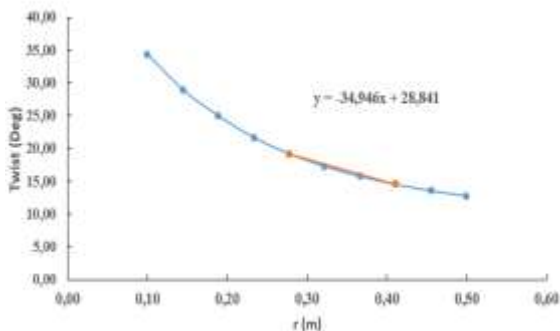
$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda r}, \quad (6)$$

Kemudian dilakukan perhitungan sudut puntir dari bilah dengan menggunakan Persamaan 7 dengan substitusi nilai Persamaan 6 [32].

$$\beta = \phi - \alpha, \quad (7)$$

Rancang Bangun Bilah Berbahan Expanded Polystyrene (EPS) Foam untuk Kecepatan Angin Rendah pada Produk Horizontal Axial Wind Turbine

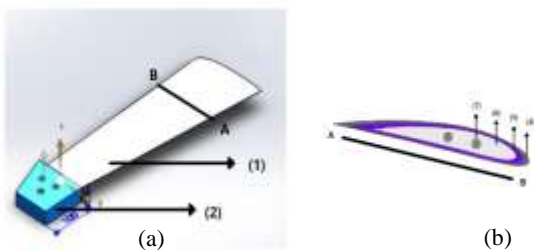
Nilai koefisien *lift* yang didapat pada elemen pertama adalah 3,16. Dengan menggunakan jumlah bilah (B) sebanyak 3. Nilai *flow angle* pada elemen pertama sebesar 36,67. Nilai *twist* pada elemen pertama adalah 34, 30, nilai tersebut didapatkan dari selisih antara nilai *flow angle* dan sudut serang. Penentuan sudut puntir akan mempengaruhi hasil flow optimal yang dihasilkan dan meningkatkan efisiensi dalam proses manufacture. Puntiran yang sangat tajam akan membuat lengkungan yang membuat bilah retas saat proses manufacture. Pada perancangan, penentuan linearisasi dilakukan pada titik optimal yaitu titik 75% [22]. Grafik diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik linearisasi pada titik 75% NACA 4412.

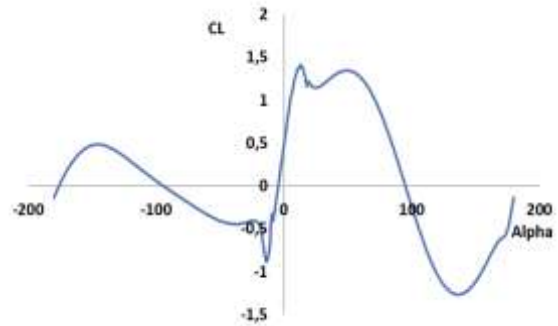
C. Simulasi Bilah dengan Qblade

Pada simulasi dibuat titik koordinat pada setiap elemen bilah untuk mendesain geometrinya. Gambar 3 merupakan geometri yang akan disimulasikan.



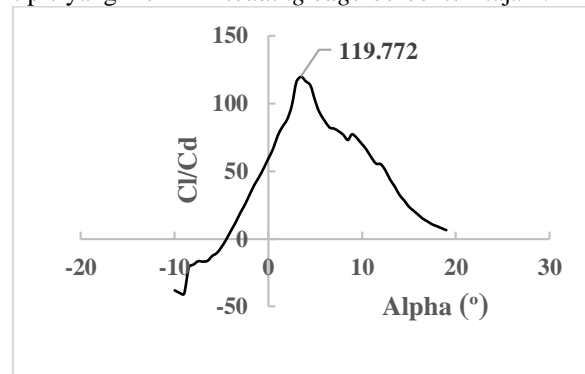
Gambar 3. Desain bilah inverse taper NACA 4412. (a) Bilah dengan dudukannya (b) Tampak melintang bilah

Gambar 3 merupakan desain dari bilah yang telah dirancang dengan pangkal bilah (2) dan bagian badan bilah (1), (a) dan (b) merupakan bagian dalam dari badan bilah yang tersusun dari 3 lapisan, lapisan pertama merupakan foam (6), lapisan kedua lembaran kayu balsa (5) dan yang terluar adalah plastik monocote (4) dengan bagian tengah menggunakan aluminium tube (7) bagian tulang dari bilah agar lebih kuat saat berputar. Gambar 4 merupakan hasil polar *ekstrapolation*.



Gambar 4. Hasil ekstrapolasi airfoil.

Ekstrapolation merupakan proses untuk menemukan nilai karakteristik aerodinamik yaitu nilai *cl* dan nilai *cd* pada *angle of attack* dengan nilai maksimum dan minimumnya. Proses ekstrapolasi yang dilakukan adalah dengan menerapkan kurva hasil polar *Xfoil* ke kurva *stall polar* pada pelat tipis utuh (360° *angel of attack*) dengan melakukan asumsi nilai *angle of attack* pada airfoil bernilai sama dengan pelat tipis yang memiliki *leading edge* berbentuk tajam.



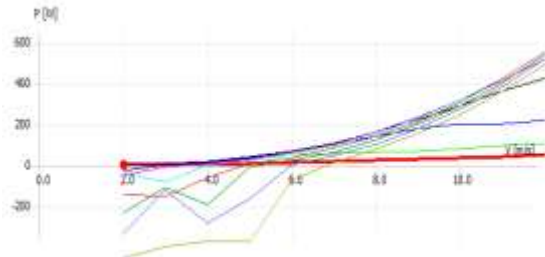
Gambar 5. Grafik perbandingan antara Cl/Cd terhadap alpha.

Gambar 5 merupakan perbandingan *Cl/Cd* terhadap *alpha* dengan nilai maksimal sebesar 119,772 menggunakan bilangan Reynolds 595. Secara teori nilai ini mendekati NACA 4412 dengan bilangan Reynolds 500 dan perbandingan *Cl/Cd* terhadap *alpha* maksimum bernilai 101. Pada pemilihan airfoil besar nilai *Cl/Cd* sangat berpengaruh karena nilai ini menjadi salah satu patokan bahwa airfoil yang digunakan mampu membuat bilah berputar, atau dengan kata lain daya angkatnya lebih besar dari pada gaya seret airfoil.

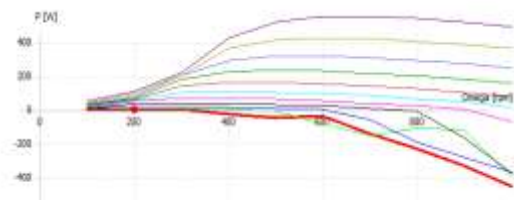
Pada Gambar 6 merupakan perbandingan antara daya keluaran terhadap kecepatan sudut dan Gambar 7 perbandingan daya terhadap rpm, kecepatan angin diatur dengan range 2 m/s sampai 12 m/s dapat dilihat pada garis yang memiliki beberapa warna diantaranya merah = 2m/s, hijau stabilo = 3 m/s, biru tua = 4 m/s, hitam = 5m/s, ungu muda = 6m/s, biru stabilo = 7m/s, coklat = 8m/s, hijau tua = 9m/s, biru muda = 10m/s, hijau daun = 11m/s, ungu tua = 12m/s. Daya tertinggi yang didapatkan pada kecepatan angin 12 m/s adalah 550 watt. Daya keluaran sebanding dengan nilai rpm, dimana semakin besar rpm maka daya yang dihasilkan

Rancang Bangun Bilah Berbahan Expanded Polystyrene (EPS) Foam untuk Kecepatan Angin Rendah pada Produk Horizontal Axial Wind Turbine

juga akan semakin besar. Pada titik maksimum naiknya rpm justru menyebabkan daya keluaran menurun. Hasil simulasi *Nonlinear Lifting Simulation* ditunjukkan pada Gambar 8 tampak depan (a), tampak samping (b), tampak atas (c). Konsep *Nonlinear Lifting* adalah pendekatan yang memprediksi koefisien aerodinamis dalam sudut serang dengan melihat distribusi aliran fluida tiga dimensi yang dihasilkan dari bilah [33].



Gambar 6. Grafik daya terhadap kecepatan.

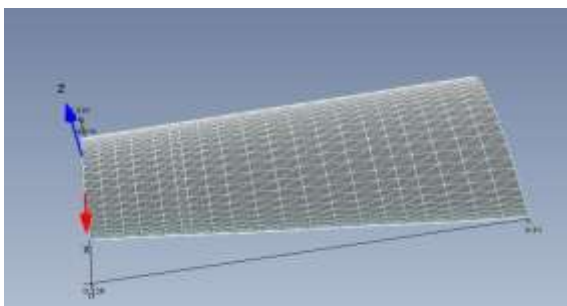


Gambar 7. Grafik power terhadap RPM.



Gambar 8. Hasil simulasi nonlinear lifting simulation.

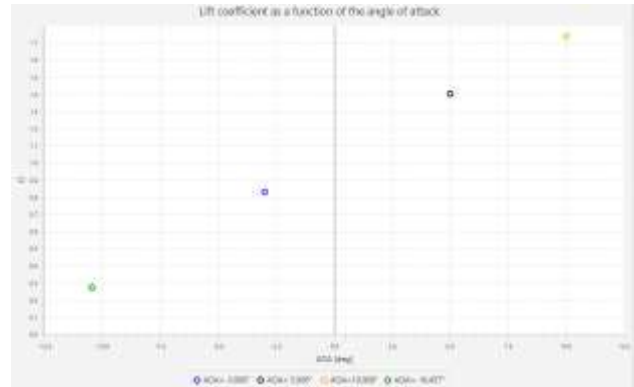
D. Simulasi Bilah dengan Aero Aeolus
Optimasi dengan simulasi ini dilakukan untuk melihat bentuk geometri rancangan bilah yang akan di implementasikan. Hasil simulasinya diperlihatkan pada Gambar 9.



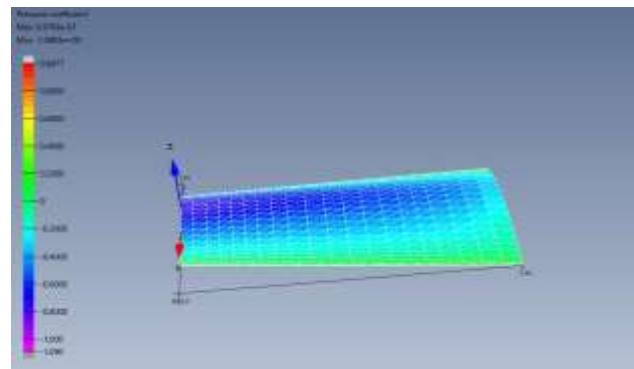
Gambar 9. Bentuk geometri yang terbentuk pada aeolus aero

Gambar 10 memperlihatkan hasil nilai Cl atau koefisien angkat bilah akan bernilai saat *angle of*

attack bernilai -10° Cl yang didapat adalah 0.27, pada *angle of attack* -3° Cl yang didapat adalah 0.83, serta pada *angle of attack* 10° Cl yang didapat adalah 1.73. *Angle of attack* mempengaruhi koefisien lift yang di dapat dengan nilai yang sebanding.



Gambar 10. Grafik Cl terhadap angle of attack



Gambar 11. Kontur tekanan statis pada bilah.



Gambar 12. Implementasi bilah yang telah terpasang pada Hub

Gambar 11 menampilkan distribusi tekanan statis bilah saat dioperasikan, tekanan positif (warna biru), dan sisi bawah bilah adalah tekanan negatif (warna hijau). Tekanan kontur yang terdistribusi memiliki nilai negatif atau nilai tekanan yang tidak terlalu tinggi, nilainya berkisar antara -0,8 sampai 0,4.

Rancang Bangun Bilah Berbahan Expanded Polystyrene (EPS) Foam untuk Kecepatan Angin Rendah pada Produk Horizontal Axial Wind Turbine

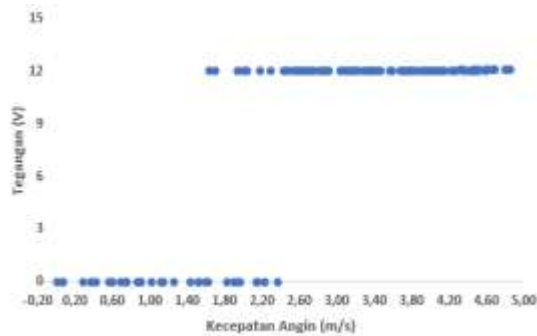
Pada bagian tengah memiliki tekanan yang rendah, nilai rendah pada bagian tengah tersebut baik karena mengurangi kemungkinan kerusakan pada bagian tengah bilah. Tekanan tertinggi terdapat pada bagian ujung bilah. Kontur tekanan maksimum terletak di bagian pangkal bilah sebagai indikasi desain bilah sudah baik. Distribusi tekanan maksimum terjadi di ujung depan bilah yang akan menghasilkan gaya angkat tinggi dan gaya seret rendah yang merupakan indikasi pembangkitan daya tinggi.

E. Implementasi bilah

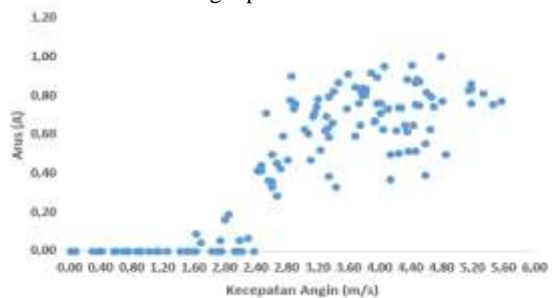
Hasil implementasi bilah HAWT ditunjukkan pada Gambar 12. Bobot bilah hasil implementasi adalah ± 300 gram. Bobot ini cukup ringan, sehingga bilah dapat beroperasi maksimal saat pengujian. Pada implementasi digunakan *axial flux* generator. Penggunaan *gear box* diperuntukkan dalam melipatgandakan kecepatan turbin angin menjadi puluhan dan mentransmisikannya ke pembangkit listrik.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses pengujian bilah dilakukan untuk melihat daya terbangkitkan, tegangan dan arus terhadap kecepatan angin yang ada di PT Lentera Bumi Nusantara. Pengujian turbin angin ini dilakukan selama 11 jam, yaitu mulai dari pukul 07.00 sampai dengan pukul 18.00 WIB dengan sampel data yang diambil adalah setiap 5 menit. Pengujian dilakukan dengan mengukur arus dan tegangan hasil keluaran pada bagian kontroler dengan menggunakan multimeter.



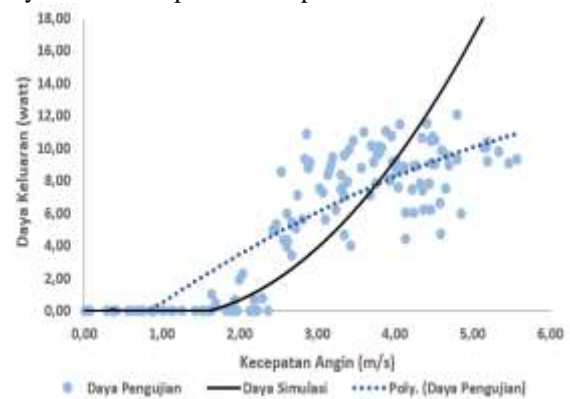
Gambar 13. Hasil tegangan keluaran terhadap kecepatan angin pada HAWT.



Gambar 14. Grafik arus keluaran terhadap kecepatan angin pada HAWT.

Kecepatan angin dengan rata-rata tinggi terjadi dari pukul 07.00 sampai 13.00. berdasarkan hasil pengukuran kecepatan angin tertinggi terjadi pada

pukul 13.00 dengan nilai kecepatan 5,57 m/s dan mampu menghasilkan tegangan sebesar 12,08 V. Hasil tegangan keluaran stabil pada kecepatan angin 2,43 m/s. Hasil pengukuran ini disajikan pada Gambar 13. Hasil keluaran didapat dengan melakukan pengukuran pada hasil keluaran kontroler yang digunakan. Jika dilihat pada grafik tersebut tegangan memiliki nilai yang stabil yaitu berada pada kisaran 12 V, hal ini disebabkan karena keluaran dari kontrol menyesuaikan spesifikasi pengecasan aki yaitu pada tegangan 12 V, dalam keadaan ini, hasil keluaran dengan input aki yang digunakan, sehingga aki bisa lebih awet. Gambar 14 memperlihatkan profil arus hasil pengukuran, dimana nilai tertinggi adalah 1 A dengan kecepatan angin sebesar 4,8 m/s. Sedangkan daya keluaran diperlihatkan pada Gambar 15.



Gambar 15. Grafik daya keluaran simulasi dan pengujian pada HAWT

Gambar 15 menunjukkan perbandingan daya keluaran antara simulasi dan pengujian, pada kecepatan angin kurang dari 4 m/s hasil daya terbangkitkan pada eksperimen lebih besar dari pada simulasi. Setelah besar dari 4 m/s hasil keluaran lebih kecil dibanding eksperimen. Untuk profil daya lebih besar dari 5,67 m/s belum bisa ditampilkan karena pada saat proses pengambilan data kecepatan angin maksimal hanya 5,67 m/s. Bilah sudah berfungsi dengan baik pada kecepatan angin rendah dan bisa menghasilkan torka untuk memutar generator pada kecepatan angin rendah.

Tabel 3. Spesifikasi bilah dengan material *Fiber* dan Pinus

Material	Fiber	Pinus	EPS
Jumlah bilah	3	3	3
Generator	PMG	PMG	AFPMG
<i>Airfoil</i>	NACA	NACA	NACA
	2410	2410	4412
<i>Cut in Wind Speed</i>	2 m/s	2 m/s	2 m/s
Diameter Bilah	0.8 m	0.8 m	0,5 m
Vout Minimum	1,96 V	2,50 V	12 V
Vout Maximum	11,48 V	12,15 V	12,08 V

Tabel 3 menunjukkan spesifikasi bilah bermaterial fiber dan pinus. Pada penelitian sebelumnya perancangan dilakukan untuk melihat tegangan yang dihasilkan dengan membandingkan

Rancang Bangun Bilah Berbahan Expanded Polystyrene (EPS) Foam untuk Kecepatan Angin Rendah pada Produk Horizontal Axial Wind Turbine

material. Jika dilihat hasil keluaran dengan menggunakan bahan fiber masih berada di bawah nilai standar yang diinginkan yaitu sebesar 12 volt sesuai dengan keinginan hasil output permanent magnet generator dan converter yang telah didesain untuk menghidupkan/mengoperasikan beban listrik. Bilah dengan material kayu pinus mampu menghasilkan tegangan diatas 12 V pada kecepatan 14m/s, jika dibandingkan dengan bilah yang dirancang dalam penelitian ini, bilah mampu menghasilkan tegangan 12 v pada kecepatan angin 2m/s turbin angin mampu menghasilkan tegangan yang besar pada kecepatan angin yang rendah.

V. KESIMPULAN

Pembuatan bilah berbahan *expanded polystyrene* (EPS) foam untuk kecepatan angin rendah pada produk *horizontal axial wind turbine* telah mampu berputar pada kecepatan angin rendah, karena menggunakan material yang ringan. Hasil tegangan keluaran terbesar pada pengujian adalah 12,09 V dan arus tertinggi sebesar 1 A. Perbandingan daya keluaran perancangan dan pengujian memiliki nilai yang berbeda, walaupun demikian hasil pengujian pada kecepatan angin rendah lebih baik dibandingkan dengan simulasi.

VI. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas pendanaan oleh Institut Teknologi Sumatera melalui program Hibah Penelitian ITERA Smart dengan No.SK: B/323/IT9.C1/PT.01.03/2019

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mirza, R. S. Lubis and M. Gapy, "Pemanfaatan Alternator Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)," *KITEKTRO: Jurnal Online Teknik Elektro*, vol. 4, no. 4, 2019.
- [2] M. Nuryogi and Subiyanto, "Performa Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Terhubung Grid Pada Pembebanan Dinamis," *Edu Elekrika Journal*, pp. 64-70, 2019.
- [3] N. Priyaningsih and N. Yuniarti, "Analisis Efisiensi Generator Pada Wind Turbine," *Jurnal Edukasi Elektro*, vol. 1, no. 2, pp. 157-168, 2017.
- [4] Sudiarti and F. A. Dani, "Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Angin di Pantai Blimbingsari Kabupaten Banyuwangi," *Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro*, vol. 5, no. 2, 2021.
- [5] A. I. Firmansyah and Zulkarnain, "Perancangan Bilah Turbin Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLT-Angin) Kapasitas 100 KW Menggunakan Studi Aerodinamika," *Ketenagalistrakan Dan Energi Terbarukan*, vol. 11, no. 2, pp. 151-158, 2012.
- [6] A. Mashar, D. Sodiq, L. Irian and I. Ramadhan, "Kontrol Kecepatan Turbin Angin Dengan Daya Sendiri," *Industrial Research Workshop and National Seminar*, pp. 159-164, 2021.
- [7] F. Aryanto, I. M. Mara and M. Nuarsa, "Pengaruh Kecepatan Angin dan Variasi Jumlah SUDU Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Poros Horizontal," *Dinamika Teknik Mesin*, vol. 3, no. 1, pp. 50-59, 2013.
- [8] Farhan and N. Fuathur, "Analisa Performansi Desain Screw Turbine Dengan Modifikasi Penambahan Flaps Sebagai Energi Alternatif Menggunakan Metode Computational Fluid Dynamics," *Institut Teknologi Sepuluh November*, 2021.
- [9] A. Prasetyo, D. Notosudjono and H. Soebagja, "Studi Potensi Penerapan dan Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin Di Indonesia," *Teknologi Energi Terbarukan*, 2017.
- [10] D. Aftika and A. Musyafa, "Rancang Bangun Blade Pitch Angle Control Prototype Turbin Angin Berbasis Interval Fuzzy Logic Type II," *Jurnal Teknik POMITS*, vol. 1, no. 1, pp. 1-6, 2012.
- [11] T. A. Adlie, Fazri and Z. Efendi, "Analisa Biaya Pembuatan Turbin Angin Sumbu Horizontal Di Wilayah Pesisir Kota Langsa," *Jurnal Ilmiah JURUTERA*, vol. 2, no. 2, pp. 1-7, 2016.
- [12] A. Sudrajat, F. Hidayanti, V. V. R. Repi and D. Widjayahakim, "Perancangan Sistem Kontrol Otomatis Turbin," *Jurnal Ilmiah GIGA*, vol. 23, no. 2, pp. 83-90, 2020.
- [13] B. Junaidin, "Perancangan Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) Skala Kecil," *Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi, ANGKASA*, vol. 9, no. 2, pp. 29-38, 2017.
- [14] F. Mahmuddin, S. Klara, M. U. Pawara and A. Y. Akhir, "Studi Performa Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) Sebagai Pembangkit Energi Listrik Pada Floating Platform," *Seminar Sains dan Teknologi Kelautan*, pp. 9-17, 2018.
- [15] R. Syahyuniar, Y. Ningsih and Herianto, "Rancang Bangun Blade Turbin Angin Tipe Horizontal," *Jurnal Elemen*, vol. 5, no. 1, 2018.
- [16] T. A. Adlie, T. A. Rizal and Arjuanda, "Perancangan Turbin Angin Sumbu Horizontal 3 Sudu Dengan Daya Output 1 KW," *Jurnal JURUTERA*, vol. 2, no. 2, pp. 72-75, 2015.
- [17] S. W. Buana, P. Yunesti, G. B. Persada and Muhyi Abdul, "Desain turbin angin horisontal untuk area kecepatan angin rendah dengan airfoil S826," *Journal of Science and Applicative Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 86-90, 2020.
- [18] D. Corio, R. Arwinda S, E. Liguna, M. Azhari, K. Kananda, and S. Istiphara, "Rancang Bangun Turbin Angin Axial Flux Permanent Magnet Generator Aplikasi pada Daerah Berkecepatan Angin Rendah", *Jurnal Ecotipe*, vol. 9, no. 1, pp. 8-18, Jan. 2022.
- [19] Z. Abidin and H. Syamsuri, "Uji Eksperimental Pengaruh Length Blade Pada Daya Putar Sistem Konversi Energi Turbin Angin Vertikal," *Jurnal Media Teknologi*, vol. 5, no. 1, 2018.
- [20] I. M. A. Sayoga, I. K. Wiratama, I. M. Mara and A. D. Catur, "Pengaruh Variasi Jumlah Blade Terhadap Aerodinamik Performan Pada Rancangan Kincir Angin 300 Watt," *Dinamika Teknik Mesin*, vol. 4, no. 2, 2014.

Rancang Bangun Bilah Berbahan Expanded Polystyrene (EPS) Foam untuk Kecepatan Angin Rendah pada Produk Horizontal Axial Wind Turbine

- [21] A. Raj, G. R.B, S. J.B, C. Datta S. and K. P.B, "Study of Output Parameters of Horizontal Axis Wind Turbines using Experimental Test Setup," *IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems*, 2016.
- [22] B. Augustiantyo and R. Setiawan, "Optimasi Desain Bilah dengan Metode Linearisasi Chord dan Twist terhadap Performa Turbin Angin Sumbu Horizontal," *Jurnal Media Mesin*, vol. 22, no. 2.
- [23] S. Widyanto, S. Wisnugroho and M. Agus, "Pemanfaatan Tenaga Angin Sebagai Pelapis Energi Surya Pada Pembangkit Listrik Tenaga Hybrid Di Pulau Wangi-Wangi," in *Seminar Nasional Sains dan Teknologi 2018*, Jakarta, 2018.
- [24] D. Oktavianto, U. Budiarto and Kiryanto, "Analisa Pengaruh Variasi Bentuk Sudu, Sudut Serang dan Kecepatan Arus Pada Turbin Arus Tipe Sumbu Vertikal Terhadap Daya yang Dihasilkan Oleh Turbin," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 5, no. 2, 2017.
- [25] Y. Wahyudi, M. Agung and Muhsin, "Pengaruh Distribusi Tekanan Terhadap Gaya Lift Airfoil NACA 23012 Pada Berbagai Variasi Angle Of Attack," *Jurnal Mechanical Engineering*, 2021.
- [26] H. Wibowo, "Pengaruh Sudut Serang Airfoil Terhadap Distribusi Tekanan dan Gaya Angkat," *Jurnal Dinamika Vokasi Teknik Mesin*, vol. 1, no. 1, 2017.
- [27] A. N. Hasmi, Alamsyah and A. D. Pratama, "Analisis Perbandingan Kinerja Drag Force dan Lift Force antara Rudder Konvensional dan Rudder Fish Tail Menggunakan CFD," *Jurnal Inovasi Sains dan Teknologi Kelautan*, vol. 1, no. 1, pp. 11-17, 2021.
- [28] D.-I. U. Schuster, "Aeolus," Aeolus Aero GmbH, 2009. [Online]. Available: <https://www.aeolus-aero.com/>. [Accessed 29 December 2021].
- [29] J. Ledoux, S. Riffo and J. Salomon, "Analysis of the Blade Element Momentum Theory," *SIAM Journal on Applied Mathematics, Society for Industrial and Applied Mathematics*, 2021.
- [30] F. M. Bere, V. A. Koehuan and J. U. Jasron, "Analisis Performansi Turbin Angin Poros Horizontal Model Double Rotor Contra Rotating dengan Posisi Rotor Saling Berhimpitan," *Lontar : Jurnal Teknik Mesin UNDANA*, vol. 02, no. 01, pp. 15-22, 2015.
- [31] M. Hatta and A. Martin, "Perancangan Bilah Tipe Inverse Tapper Pada Turbin Angin berdasarkan Kondisi Angin Di Pekanbaru," *Jorn FTEKNIK*, vol. 4, no. 1, 2017.
- [32] Ismail, E. Pane and Triyanti, "Optimasi Perancangan Turbin Angin Vertikal Tipe Daerrieus Untuk Penerangan Di Jalan Tol," *Seminar Nasional Sains dan Teknologi 2017*, 2017.
- [33] A. R. D. Carvalho and P. P. d. C. Brito, "Nonlinear Lifting Line Implementation and Validation for Aerodynamic and Stability Analysis," *Cilamce 2017*, 2017.