

Rancang Bangun Turbin Angin *Axial Flux Permanent Magnet Generator* Aplikasi pada Daerah Berkecepatan Angin Rendah

Dean Corio¹, Rosmawan Arwinda S², Ega Liguna³, Munir Azhari⁴, Kiki Kananda⁵, Swadexi Istiqphara⁶
^{1,2,3,4,5,6} Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Sumatera
*dean.corio@el.itera.ac.id¹

INTISARI

Seiring dengan meningkatnya konsumsi energi listrik, ketersediaan sumber energi fosil semakin berkurang. Pembentukan energi fosil membutuhkan proses yang panjang, sehingga peneliti dan akademisi mencoba mengembangkan sumber energi alternatif dengan memanfaatkan Energi Baru dan Terbarukan (EBT), salah satunya energi angin. Penelitian ini berfokus pada desain dan implementasi turbin angin. Turbin angin yang dirancang adalah jenis turbin angin dengan sumbu horizontal yang dirancang menggunakan generator listrik tipe *fluks aksial generator magnet permanen*. *Housing generator* didesain menggunakan material besi, dan bilah yang digunakan tipe *inverse taper* yang terbuat dari *styrofoam* yang kemudian dilapisi dengan lembaran kayu balsa dan *monocote*. Sistem kendali yang digunakan adalah *Wind Charge Controller (WCC)* dengan spesifikasi tegangan *break* 30V. Desain turbin angin ini memberikan daya luaran yang baik di daerah kecepatan angin rendah 2,5 m/s. Daya keluaran turbin 14.28W dengan tegangan keluaran rata-rata 29.78V, arus 0.46A. Efisiensi turbin angin dapat dicapai hingga 88,92%.

Kata kunci: *Axial Flux Permanent Magnet Generator*, Energi Terbarukan, Generator Magnet Permanen, *Inverse Taper*, Turbin Angin Horizontal

ABSTRACT

Along with the increasing consumption of electrical energi, the availability of fossil energi sources is decreasing. The formation of fossil energi requires a long process, so researchers and academics try to develop alternatif energi sources by utilizing New and Renewable Energi (EBT), one of them is wind energi. This study focuses on the design and implementation of wind turbines. The wind turbine designed is a type of wind turbine with a horizontal axis that is designed using an electric generator of the axial flux type permanent magnet generator. The housing of the generator is designed using iron material, and the blades used are of the inverse taper type made of styrofoam which is then covered with sheets of balsa wood and monocot. The control system used is a Wind Charge Controller (WCC) with a brake voltage specification of 30V. This wind turbine design provides a good output in the low wind speed area of 2.26 m/s. Output power of turbine 14.28W with an average output voltage of 29.78V, current 0.46A. Wind turbine efficiency can be achieved up to 88.92%.

Keywords : *Axial Flux Permanent Generator, Horizontal Wind Turbine, Inverse Taper, Permanent Magnet Generator, Renewable Energy*

I. PENDAHULUAN

Seiring dengan peningkatan konsumsi energi listrik, ketersediaan sumber energi fosil semakin berkurang. Sedangkan pembentukan energi fosil membutuhkan proses waktu yang lama, sehingga para peneliti dan akademisi mencoba mengembangkan alternatif sumber energi dengan memanfaatkan Energi Baru Terbarukan (EBT). Salah satu EBT yang dikembangkan adalah angin menjadi pembangkit listrik tenaga angin. Angin dapat dikonversi menjadi

energi listrik dengan menangkap potensialnya menggunakan baling-baling yang dapat menghasilkan energi kinetik pada turbin. Turbin ini dihubungkan dengan generator sehingga menghasilkan energi listrik. Pada aplikasinya, turbin angin dibedakan menjadi dua, yaitu turbin angin dengan poros *horizontal* dan turbin angin dengan poros *vertical*[1], [2].

Beberapa wilayah di Indonesia memiliki wilayah yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi terbarukan sebagai energi alternatif yaitu dengan menggunakan PLTS dan PLTB. Indonesia yang berada

di jalur khatulistiwa memiliki keuntungan dari dua energi alternatif ini yaitu memiliki panas yang cukup untuk menghasilkan energi PLTS di semua wilayah Indonesia. Namun untuk PLTB, wilayah yang memiliki angin yang tinggi hanya di pinggir pantai dan semakin jauh dari pantai maka kecepatan angin menjadi semakin berkurang. Oleh karena itu, Untuk optimalisasi energi PLTB di Indonesia agar dapat di implementasikan pada wilayah yang lebih luas meskipun cukup jauh dari pantai, diperlukan turbin angin PLTB yang mampu bekerja pada kecepatan angin yang rendah yaitu 0.5 – 5 m/s. Pada manuskrip ini akan membahas terkait perancangan dan implementasi turbin angin agar dapat di implementasikan untuk daerah yang memiliki kecepatan angin rendah.

Beberapa penelitian terkait turbin angin telah dilakukan. Pada [3] telah membahas perancangan turbin angin dengan poros horizontal dengan metode *Horizontal Axis Rotor Performance Optimization (HARP-Opt)*. HARP-Opt ini dimaksudkan untuk mengoptimalkan kinerja rotor pada saat kondisi stabil, konfigurasi rotor dirancang menggunakan parameter kecepatan rotor dan konfigurasi bilahnya. Beberapa bagian penting yang ada pada pembangkit listrik tenaga angin tipe horizontal adalah; *generator, nacelle, blade, shaft, tower, dan gear box*[4]. Jika Generator yang digunakan berbeda, maka sistem turbin angin akan memberi pengaruh kinerja yang berbeda. Umumnya Generator yang digunakan adalah *radial flux permanent magnet generator (RFPMG)* dan *axial flux permanent magnet generator (AFPMG)*[5] di mana fluks magnetik yang dihasilkan arahnya sejajar (aksial) terhadap poros[6]. Generator ini sesuai jika diaplikasikan pada daerah yang memiliki kecepatan angin rendah, dapat menghasilkan daya dengan tingkat efisiensi yang lebih tinggi karena tidak adanya rugi-rugi daya pada kumparan rotor[7], [8].

Turbin angin dengan sumbu horizontal memiliki tiga jenis bilah yang biasa digunakan, yaitu *taper, taperless, dan inverse taper*. *Inverse taper* yang merupakan jenis bilah yang mampu menghasilkan torsi besar, sehingga dapat lebih mudah berputar meskipun pada kecepatan angin yang rendah[9]. Turbin angin dengan torsi yang besar membuat putaran menjadi pelan, sehingga diperlukan *tip speed ratio (TSR)* yang rendah[10].

Perancangan bilah menggunakan *software* QBlade [11] yang merupakan sebuah *software open source*. Dalam memproses simulasi di QBlade terdapat dua metode, yaitu *Blade Element Momentum (BEM)* dan *Double Multiple Streamtube (DMS)*[12]. BEM digunakan untuk memproses simulasi turbin angin dengan sumbu horizontal, sedangkan DMS digunakan untuk memproses simulasi turbin angin dengan sumbu vertikal. Pada QBlade pengguna dapat melakukan desain custom airfoil dan perhitungannya menggunakan panel *method code XFOIL* yang telah terintegrasi dalam QBlade. Proses simulasi dengan menggunakan QBlade meliputi beberapa tahapan, yaitu *airfoil design, Xfoil direct analysis, polar exploration, rotor blade design*[13]. Pada perancangan bilah ini, pemilihan material juga berpengaruh terhadap kinerja bilah, sehingga agar bilah ringan dan tidak membutuhkan torsi yang besar untuk berputar digunakan bahan material styrofoam[14]. Sebagai bingkai styrofoam digunakan kayu balsa dan dilapisi *monocote* sehingga lebih kokoh dan tahan terhadap air hujan dan debu. Bilah dan daerah sapuannya akan menjadi dasar untuk menentukan besarnya daya yang dapat dikonversi oleh sistem[15].

Dari beberapa kajian literatur tersebut, maka pada penelitian ini digunakan generator *axial flux permanent magnet generator (AFPMG)* yang akan digunakan sebagai generator turbin angin. Dengan menggunakan AFPMG diharapkan dapat menghasilkan pembangkit listrik dengan efisiensi yang tinggi. Sehingga dapat dimanfaatkan sebagai PLTB pada daerah dengan kecepatan angin rendah.

II. LANDASAN TEORI

A. Daya Angin

Daya angin merupakan jumlah energi angin yang dapat dihasilkan. Kecepatan angin dan daerah sapuan akan mempengaruhi besarnya daya angin. Daya angin dapat dihitung menggunakan rumus pada Persamaan (1)[16].

$$W = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

di mana

- W = daya angin (W)
- ρ = kerapatan udara (kg/m³)
- A = luas daerah sapuan (m²)
- V = kecepatan angin (m/s)

B. Efisiensi Daya Generator

Generator adalah sebuah alat pembangkit listrik yang terdiri atas dua bagian utama, yaitu bagian rotor dan stator. Rotor terdiri atas magnet permanen dan stator terdiri atas beberapa kumparan kawat konduktor. Generator mengubah energi gerak yang dapat dihitung sebagai daya masukan dengan menggunakan Persamaan (1) menjadi daya listrik sebagai daya luaran. Perbandingan antara daya masukan dan luaran disebut sebagai efisiensi dari generator. Efisiensi yang dimaksud dapat dihitung menggunakan Persamaan (2) [17]

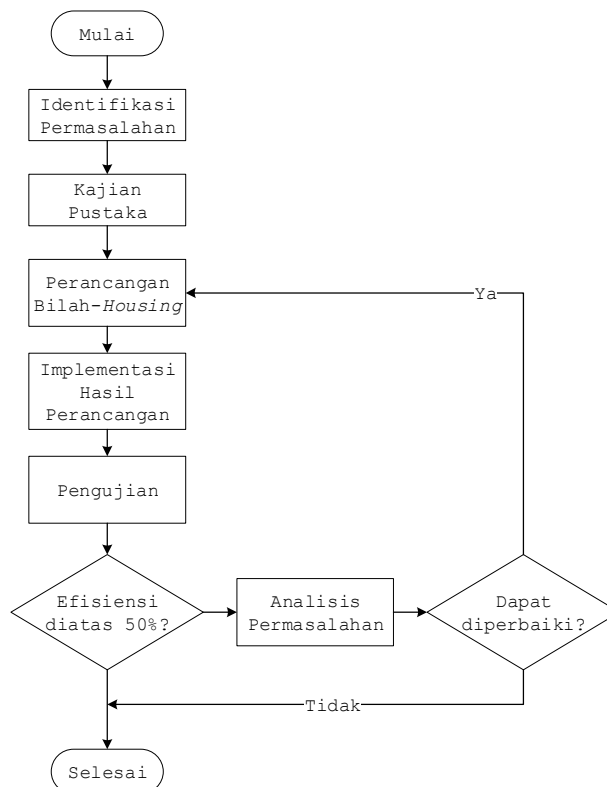
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2)$$

di mana

- η = efisiensi (%)
- P_{in} = daya masuk (W)
- P_{out} = daya keluar (W)

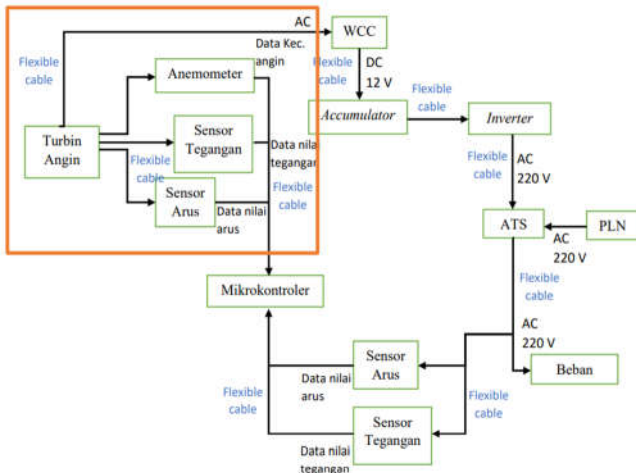
III. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini terdapat beberapa kegiatan penelitian yang dilakukan. Kegiatan tersebut dimulai dari studi literatur untuk melakukan kajian penelitian terkait turbin angin dengan menggunakan AFPMG. Kemudian kegiatan selanjutnya adalah dilakukan perancangan bilah dan *housing* untuk turbin angin AFPMG, dan selanjutnya dilakukan implementasi turbin angin AFPMG berdasarkan hasil rancangan yang telah dibuat. Untuk menguji apakah hasil rancangan dan implementasi memiliki hasil yang baik yaitu hasil yang memiliki efisiensi di atas 50% maka dilakukan pengujian AFPMG yang telah dibuat. Berikut merupakan diagram alir metodologi penelitian yang dilakukan oleh penulis dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Metode penelitian

Pada sistem yang diusulkan ini terdapat perancangan dan implementasi sistem pemantauan turbin angin AFPMG berbasis *Web Monitoring* yang bertujuan untuk melengkapi kelengkapan sistem kerja *Horizontal Axial Wind Turbine* (HAWT). Turbin angin berfungsi sebagai sumber daya pada HAWT *web monitoring* ini. Pada produk HAWT berbasis *web monitoring* terdapat tiga sub sistem utama, yaitu turbin angin, kontroler, dan sistem *monitoring* seperti yang ditunjukkan dalam diagram blok pada Gambar 2. Penelitian ini berfokus pada turbin angin yang ditunjukkan dalam kotak jingga pada Gambar 2.



Gambar 2. HAWT

Pada subsistem turbin angin diperlukan beberapa spesifikasi agar HAWT dapat bekerja, yaitu listrik yang dihasilkan dari konversi disimpan menggunakan *accumulator* dan digunakan sebagai sumber daya alternatif selain listrik PLN. Spesifikasi yang dimaksud adalah sebagai berikut:

1. Menggunakan generator jenis aksial.
2. Memiliki bilah sebanyak tiga buah berjenis *inverse taper*.
3. Mulai bekerja (*cut in*) pada kecepatan angin 2,5 m/s.

A. Perancangan Bilah

Perancangan bilah menggunakan beberapa parameter yang digunakan, salah satunya adalah menentukan jenis *airfoil* yang akan digunakan[18]. Pada manuskrip ini digunakan *airfoil* NACA 4412 yang dirancang menggunakan perangkat lunak Qblade. Selain itu dibutuhkan parameter awal, yang ditentukan dengan dua cara, yaitu berdasarkan asumsi dan berdasarkan perhitungan. Data parameter awal dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Pada Tabel 1 nilai kapasitas daya listrik dan efisiensi bilah (η), generator (η_g), serta *controller* (η_c) yang digunakan berdasarkan literatur[19], sedangkan untuk efisiensi sistem (K) dihitung menggunakan Persamaan 3.

$$K = \eta_b \times \eta_g \times \eta_c \quad (3)$$

Tabel 1. Penentuan kapasitas daya dan efisiensi subsistem turbin angin

Kapasitas daya listrik (W_e)	Efisiensi			
	Bilah (η_b)	Generator (η_g)	Controller (η_c)	Sistem (K)
Watt	%	%	%	%
600	0,3	0,8	0,8	0,1920

Tabel 2. Perhitungan daya angin, kecepatan angin maksimal, luas sapuan bilah dan jari-jari bilah

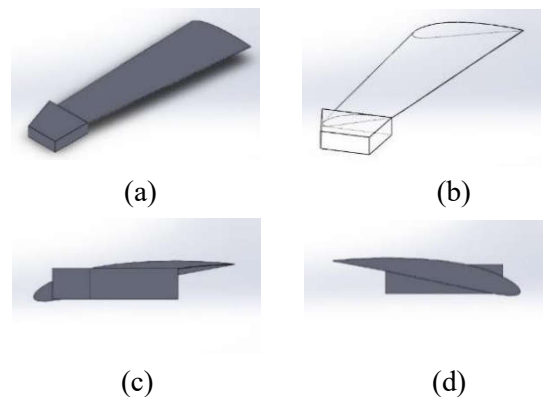
Daya Angin (W_a)	Kec. Angin Maks (V_{max})	Luas Sapuan Bilah (A)	Jari-jari (R)
Watt	(m/s)	(m^2)	(meter)
3125	12	1,25	0,55

Kemudian pada Tabel 2 nilai kecepatan angin maksimal (V_{max}) dan jari jari (R) ditentukan, sedangkan untuk nilai daya angin (W_a) dan luas sapuan bilah (A) dihitung dengan menggunakan rumus pada Persamaan 4 dan 5.

$$W_a = \frac{W_e}{K} \quad (4)$$

$$A = \frac{2 \times W_a}{\rho \times V_{max}^3} \quad (5)$$

Dari parameter tersebut dapat dirancang bilah seperti terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Desain bilah *inverse taper*: (a) tampak 3D; (b) tampak garis dalam; (c) tampak depan; (d) tampak belakang

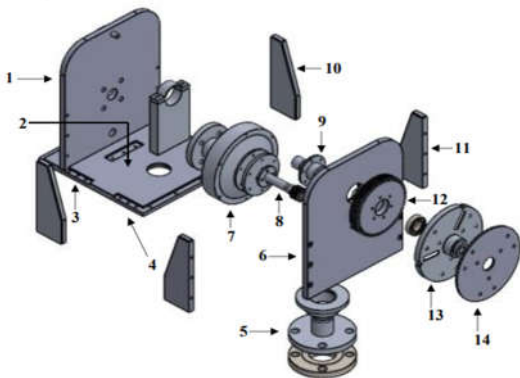
B. Perancangan Turbin Angin dan Housing

Perancangan turbin angin terbagi menjadi dua sub-bagian, yaitu menentukan generator elektrik yang akan digunakan dan melakukan perancangan desain housing untuk generator elektrik. Penelitian ini menggunakan generator elektrik berjenis aksial dengan spesifikasi daya 600 W dapat dilihat pada Gambar 4.

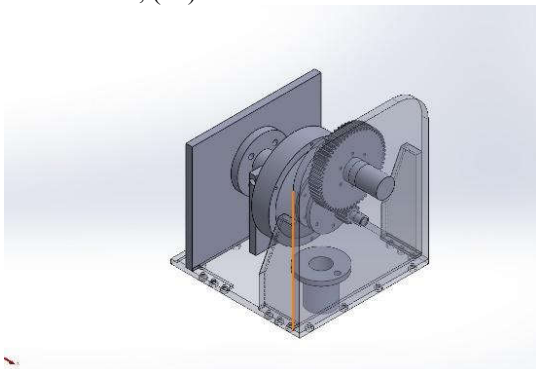


Gambar 4. Generator aksial

Dalam perancangan *housing* generator ini, jenis material yang digunakan adalah besi, dikarenakan memiliki kekuatan yang kuat dan harganya yang lebih terjangkau meskipun kekurangannya adalah berat. Perancangan *housing* generator ini dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6. Dalam gambar tersebut terdapat beberapa bagian *housing*, seperti *base*, *shaft*, dan *flange*.



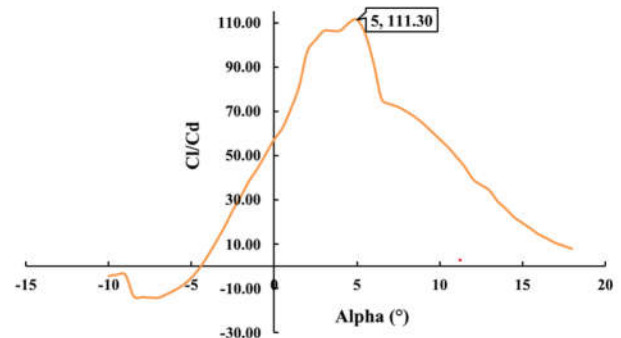
Gambar 5. Komponen *housing*: (1) *housing base* belakang; (2) *housing base* bawah; (3, 4, 10 dan 11) penopang *housing base*; (5) poros *housing*; (6) *housing base* depan; (7) generator; (8) *shaft* pinion; (9) *shaft* bilah; (12) *gear*; (13) *flange* bilah; (14) hub bilah



Gambar 6. *Housing full*

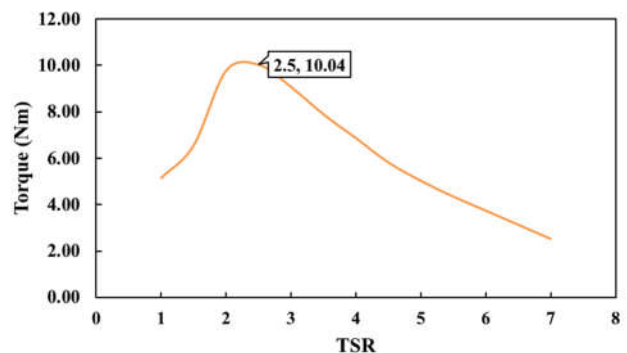
C. Simulasi QBlade

Hasil perancangan bilah disimulasikan menggunakan perangkat lunak QBlade untuk melihat parameter nilai Cl/Cd . Nilai Cl/Cd yang tinggi artinya bilah tersebut memiliki pengaruh gaya angkat yang lebih besar daripada gaya dorong sehingga bilah dapat berputar. *Coefficient lift* (Cl) merupakan koefisien gaya angkat, sedangkan *drag coefficient* (Cd) merupakan gaya dorong. Dalam hasil simulasi pada Gambar 7 dapat dilihat bahwa bilah mempunyai nilai Cl/Cd terhadap α tertinggi 111 pada sudut serang 5° yang membuat sirkulasi udara pada bilah ini mengalir lebih banyak pada permukaan bawah bilah dan mengakibatkan gaya yang dihasilkan lebih besar.

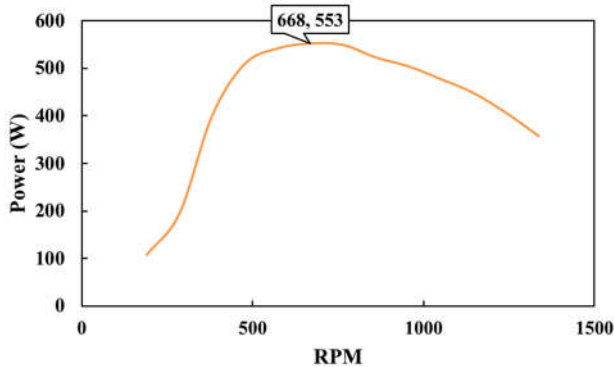


Gambar 7. Grafik Cl/Cd terhadap α

Simulasi rotor dengan menggunakan metode BEM pada perangkat lunak QBlade dengan parameter jumlah pengulangan sebanyak 1000 kali, viskositas dinamik sebesar $1,647 \times 10^{-5} \text{Ns/m}^2$, dan densitas udara sebesar $1,225 \text{Kg/m}^3$. Dari hasil simulasi menghasilkan grafik perbandingan torsi terhadap *tip speed ratio* (TSR) yang dapat dilihat pada Gambar 8 dan grafik *power* terhadap kecepatan sudut (rpm) pada Gambar 9.



Gambar 8. Grafik torsi terhadap TSR



Gambar 9. Grafik *power* terhadap kecepatan sudut

Nilai torsi tertinggi yang dihasilkan bilah sebesar 10,04 Nm pada TSR 2,5. Kemudian daya maksimal yang dihasilkan oleh bilah adalah sebesar 553 W pada kecepatan putar 668 rpm dan daya minimum bilah sebesar 104 W pada kecepatan putar 191 rpm.

IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Implementasi Bilah

Dalam melakukan implementasi, bilah menggunakan bahan utama styrofoam yang dilapisi kayu balsa di bagian luarnya. Proses implementasi mengacu pada spesifikasi dan bentuk geometri bilah *inverse taper* yang dapat dilihat pada Tabel 3.

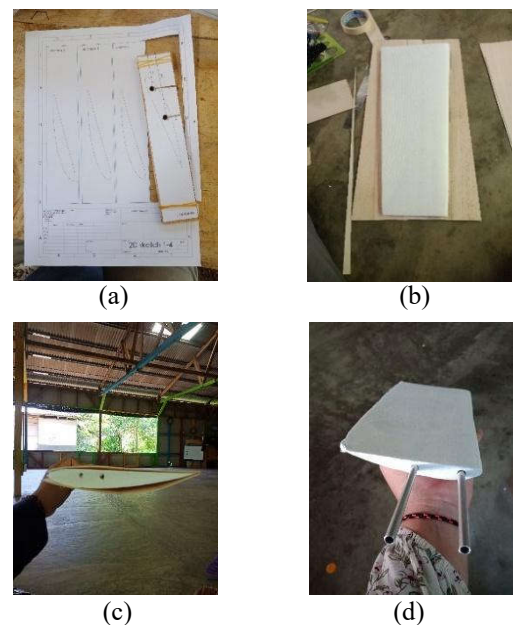
Tabel 3. Geometri bilah

Geometri Bilah <i>Inversetaper</i> NACA4412								
n	r (m)	λr	C_r (m)	Cl	α (°)	Φ (°)	β (°)	β (°)
1	0,15	1,09	0,120	0,64	2,37	28,34	25,97	12,49
2	0,19	1,41	0,127	0,46	0,9	23,51	22,61	11,94
3	0,24	1,74	0,135	0,36	-0,19	19,95	20,14	11,39
4	0,28	2,06	0,142	0,28	-0,645	17,26	17,89	10,85
5	0,33	2,38	0,150	0,23	-0,99	15,17	16,16	10,30
6	0,37	2,71	0,157	0,20	-1,3	13,52	1,00	9,76
7	0,42	3,03	0,165	0,17	-1,5	12,18	13,68	9,21
8	0,46	3,35	0,172	0,14	-1,7	11,07	12,77	8,66
9	0,51	3,68	0,180	0,13	-1,9	10,14	12,04	8,12
10	0,6	4	0,187	0,11	-2,08	9,36	11,44	7,57

n : elemen bilah α (°) : alpha
 r (m) : jari-jari parsial Φ (°) : flow angle
 λr : TSR parsial β (°) : twist
 Cr (m) : chord β (°) : twist linear
 Cl : *coefficient lift*

Tabel 4. Titik koordinat elemen 0 dan 1

0			1		
x	y	z	x	Y	Z
100	0,13	0	100	0,13	-47,78
95	1,47	0	95	1,47	-47,78
90	2,71	0	90	2,71	-47,78
80	4,89	0	80	4,89	-47,78
70	6,69	0	70	6,69	-47,78
60	8,14	0	60	8,14	-47,78
50	9,19	0	50	9,19	-47,78
40	9,8	0	40	9,8	-47,78
30	9,76	0	30	9,76	-47,78
25	9,41	0	25	9,41	-47,78
20	8,8	0	20	8,8	-47,78
15	7,89	0	15	7,89	-47,78
10	6,59	0	10	6,59	-47,78
7,5	5,76	0	7,5	5,76	-47,78
5	4,73	0	5	4,73	-47,78
2,5	3,39	0	2,5	3,39	-47,78
1,25	2,44	0	1,25	2,44	-47,78
0	0	0	0	0	-47,78



Gambar 10. Proses implementasi bilah: (a) pembuatan sketsa di *styrofoam*; (b) hasil *styrofoam* yang telah dipotong; (c) melapisi *styrofoam* dengan kayu balsa; (d) melapisi bilah dengan *monocote*

Untuk melakukan proses implementasi perlu dilakukan penentuan titik koordinat. Titik koordinat dibuat menjadi beberapa elemen agar bilah tetap presisi saat proses implementasi, terdapat titik koordinat untuk elemen 0 sampai dengan elemen 10. Titik koordinat untuk elemen 0 dan elemen 1 sebagian dapat dilihat pada Tabel 4. Kemudian, parameter yang telah didapat dari proses perancangan digunakan dalam proses implementasi yang dapat dilihat pada Gambar 10. Proses implementasi dilakukan dengan cara memotong styrofoam sesuai dengan desain geometri dan titik elemen yang telah ditentukan. Selanjutnya, styrofoam dilapisi dengan lembar kayu balsa dan monocote.

B. Hasil Implementasi Generator dan Housing Gdc



(a) (b)

Gambar 11. Proses *machining housing*: (a) pembuatan *shaft*; (b) pembuatan *flange*



(a) (b)



(c)

Gambar 12. Hasil implementasi *housing* dan generator: (a) hasil implementasi *flange*; (b) hasil implementasi *shaft*; (c) implementasi *housing* pada generator

Implementasi generator dan *housing* yang dilakukan adalah melakukan proses pencetakan (*machining*) menggunakan mesin *CNC milling* dan las bubut. Proses dan hasil implementasi dapat dilihat pada Gambar 11 sampai dengan Gambar 12.

C. Hasil Implementasi Turbin Angin AFPMG

Implementasi turbin angin dilakukan dengan menggabungkan seluruh bagian, yaitu bilah, generator, dan *housing* di atas meja yang dapat dilihat pada Gambar 13. Proses ini dilakukan untuk memverifikasi bahwa turbin angin dapat berputar sebelum dilakukan pemasangan pada tiang.



Gambar 13. Turbin angin AFPMG

Tiang yang digunakan merupakan tiang *triangle* dengan tinggi 5 meter di atas permukaan tanah. Proses pemasangan dilakukan dengan menggunakan katrol. Generator dan *housing* dinaikkan menggunakan katrol, sedangkan bilah dipasang saat generator dan *housing* telah terpasang pada tiang. Proses pemasangan dan implementasi dapat dilihat pada Gambar 14 dan Gambar 15.



Gambar 14. Proses pemasangan turbin angin pada tiang



Gambar 15. Implementasi turbin angin AFPMG pada tiang 5 meter

D. Pengujian

Setelah produk diimplementasikan, dilakukan pengujian terhadap kinerja dari turbin angin. Proses pengujian ini untuk meng-generate tegangan, arus, dan daya keluaran dari turbin angin terhadap kecepatan angin. Pengujian turbin angin ini dilakukan selama 11 jam, yaitu mulai dari pukul 07.00 sampai dengan pukul 18.00 WIB. Berikut merupakan hasil dari pengujian turbin angin AFPMG.

E. Pengujian Generator

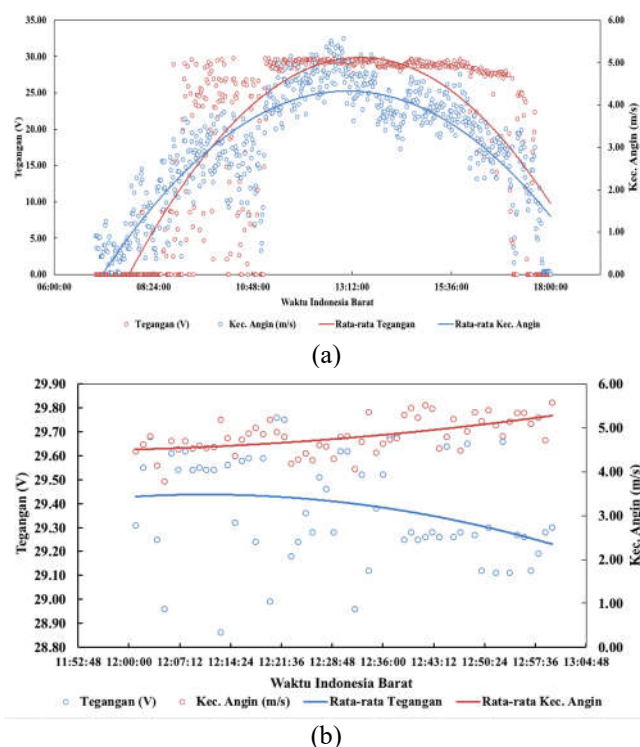
Pada pengujian ini generator diputar dengan menggunakan bor listrik kemudian dilakukan pengukuran terhadap kecepatan putar generator menggunakan tachometer dan tegangan keluaran generator setiap fasa menggunakan multimeter. Berikut hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil pengukuran generator

RPM	ω	V (UV)	V (UW)	V (VW)
46,15385	4,830769	8,7	9,2	8,8
92,30769	9,661538	16,9	16,58	15,8
184,6154	19,32308	35,02	35,6	33,54
230,7692	24,15385	44,81	46,1	44,57
276,9231	28,98462	56,32	56,3	56,53
323,0769	33,81538	65,2	66,7	66,8
369,2308	38,64615	74,5	74,7	74,2
415,3846	43,47692	83,2	83,7	82,5
461,5385	48,30769	90,4	90,4	92,3
538,4615	56,35897	108,8	109,3	109,5
615,3846	64,41026	124,8	124,7	127,4
692,3077	72,46154	136,9	128,4	136,2
769,2308	80,51282	154,3	154,9	151,7
846,1538	88,5641	169,3	168,7	165,7
923,0769	96,61538	187,5	187,4	189,5
1000	104,6667	204,3	201,9	202,7
1076,923	112,7179	218,7	220,2	219,9

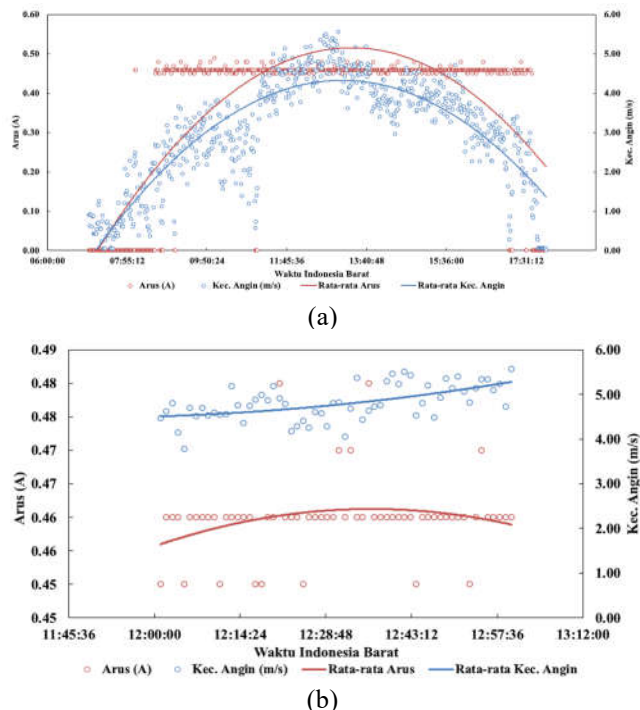
Dari hasil pengujian yang diperoleh pada kecepatan putar antara 46 rpm hingga 1000 rpm, generator dapat mengeluarkan tegangan hingga sebesar 220,2 V pada kecepatan putar 1076.923 rpm dan tegangan terendah yang dihasilkan sebesar 8,7 V pada kecepatan putar 46,15385 rpm. Tegangan antar fasa yang dihasilkan saat pengukuran memiliki selisih rata-rata sebesar 1%.

F. Tegangan dan Arus Keluaran Turbin Angin



Gambar 16. Grafik tegangan keluaran terhadap kecepatan angin: (a) grafik keseluruhan mulai dari pukul 07.00 hingga 18.00 WIB; (b) grafik saat pukul 12.01 hingga 13.00 WIB

Data tegangan dan arus keluaran turbin angin diambil setiap menit. Berikut merupakan data yang diperoleh, dapat dilihat pada Gambar 16 dan Gambar 17. Pada Gambar 16(a) merupakan grafik nilai tegangan dan Gambar 17(a) merupakan grafik arus yang diperoleh dibandingkan dengan kecepatan angin selama proses pengujian. Gambar 16(b) merupakan grafik nilai tegangan keluaran dan Gambar 17(b) merupakan grafik nilai arus keluaran terhadap kecepatan angin saat pukul 12.01 sampai dengan pukul 13.00 WIB.



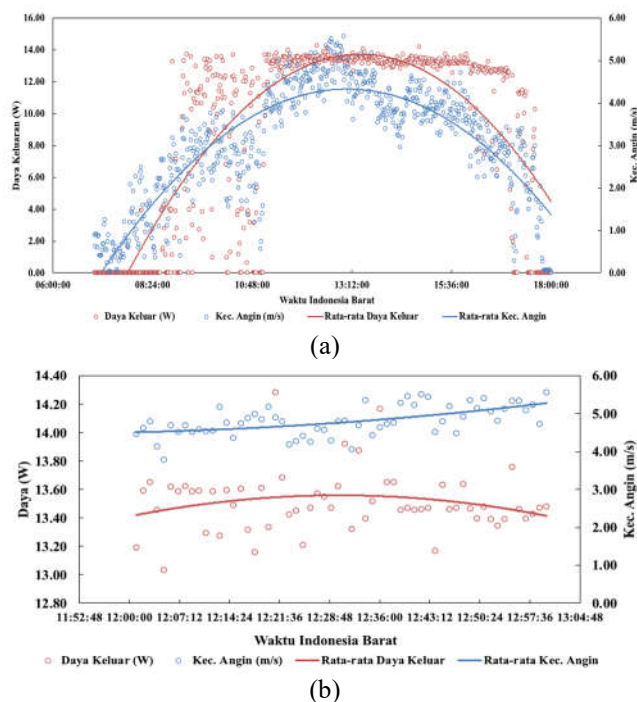
Gambar 17. Grafik arus keluaran terhadap kecepatan angin: (a) grafik keseluruhan mulai dari pukul 07.00 hingga 18.00 WIB; (b) grafik saat pukul 12.01 hingga 13.00 WIB

Berdasarkan hasil pengujian, nilai tegangan keluaran maksimum yang dapat dihasilkan adalah sebesar 29,78 V. Berdasarkan data pengujian, nilai tegangan keluaran pada kecepatan angin tinggi berkisar diantara 28 V sampai 29 V. Hal tersebut dikarenakan, kontrol yang digunakan melakukan pengereman generator saat tegangan keluaran mencapai 30 V, dapat dilihat dari Gambar 16, dimana tegangan pengukuran tidak mengalami peningkatan lagi saat mencapai kecepatan angin yang tinggi. Berdasarkan hasil pengujian, turbin angin ini membutuhkan kecepatan angin minimal 2.5 m/s untuk membuat bilah dapat bergerak dari kondisi diam. Hal tersebut dibuktikan saat rata-rata kecepatan angin dibawah 2.5 m/s, turbin angin tidak menghasilkan tegangan keluaran. Kemudian untuk nilai arus pada Gambar 17 dapat dilihat bahwa nilainya tidak berubah secara signifikan karena menggunakan beban konstan.

G. Daya Keluaran Turbin Angin

Proses pengujian ini dilakukan dengan cara menghitung daya keluaran turbin menggunakan hasil data tegangan dan arus keluaran turbin angin setiap

menit. Berikut merupakan hasil data yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 18. Pada Gambar 19(a) merupakan grafik keseluruhan dari nilai tegangan yang diperoleh terhadap kecepatan angin selama proses pengujian, sedangkan Gambar 19(b) merupakan grafik nilai tegangan keluaran terhadap kecepatan angin saat pukul 12.01 sampai dengan pukul 13.00 WIB.



Gambar 18. Grafik daya keluaran terhadap kecepatan angin: (a) grafik keseluruhan mulai dari pukul 07.00 hingga 18.00 WIB; (b) grafik saat pukul 12.01 hingga 13.00 WIB

Berdasarkan hasil pengujian nilai daya keluaran, kecepatan angin paling tinggi yang dihasilkan sebesar 14,28 W. Nilai daya keluaran dipengaruhi oleh tegangan, maka dapat dilihat pada Gambar 18 besar daya yang dikeluarkan juga dipengaruhi oleh kecepatan angin. Akan tetapi karena generator maksimal hanya mampu menghasilkan tegangan tidak lebih dari 30 V, sehingga daya yang dihasilkan tidak terlalu besar.

H. Efisiensi Turbin Angin

Proses pengujian efisiensi turbin angin dilakukan dengan cara membandingkan daya keluaran dan daya masukan. Daya masukan merupakan daya angin atau besar potensi energi angin dalam satu waktu. Dengan luas daerah sapuan bilah sebesar 1,25 m² dan kerapatan udara adalah 1,2 kg/m³, maka daya angin dan

efisiensinya dengan menggunakan Persamaan (1) dan (2) adalah $W=8.71\text{Watt}$ dan $\eta=88,92\%$. Nilai efisiensi ini dinyatakan baik karena hanya sebesar 11.08% daya yang hilang. Nilai efisiensi ini dapat dipengaruhi oleh jenis bilah dan generator elektrik yang digunakan pada penelitian ini. Efisiensi ini juga dapat dipengaruhi dari kontrol yang digunakan oleh turbin angin saat digunakan.

V. KESIMPULAN

Perancangan dan implementasi turbin angin *axial flux permanent magnet generator* untuk mendapatkan nilai koefisien desain bilah yang mampu beroperasi pada kecepatan angin rendah berhasil dilakukan. turbin angin AFPMG mampu bekerja pada kecepatan rendah dengan tegangan luaran dibuat konstan 30 V. hasil rancangan menunjukkan efisiensi Turbin angin AFPMG yang baik yaitu 88,92%. Daya luaran turbin angin AFPMG rata-rata 14,28 W dengan kecepatan angin terukur 2,5 m/s.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Kemendikbud melalui program Hibah Penelitian Dosen Pemula dengan Nomor SK: 8/E1/KPT/2020 dengan nomor kontrak 009/SPH/LT/DRPM/2020.

REFERENSI

- [1] A. Bachtiar and W. Hayyatul, "Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Angin PT. Lentera Angin Nusantara (LAN) Ciheras," *J. Tek. Elektro ITP*, vol. 7, no. 1, pp. 34–45, 2018, doi: 10.21063/jte.2018.3133706.
- [2] A. Raj, R. B. Gurav, J. B. Sankpal, D. S. Chavan, and P. B. Karandikar, "Study of output parameters of horizontal axis wind turbines using experimental test setup," *1st IEEE Int. Conf. Power Electron. Intell. Control Energy Syst. ICPEICES 2016*, pp. 363–368, 2017, doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853120.
- [3] K. A. Singh and M. R. Ahmed, "Design and Optimisation of a 20kW Horizontal Axis Wind Turbine using HARP-Opt," *2019 9th Int. Conf. Power Energy Syst. ICPEES 2019*, 2019, doi: 10.1109/ICPEES47639.2019.9105431.
- [4] T. F. Chan and L. L. Lai, "An axial-flux permanent-magnet synchronous generator for a direct-coupled wind-turbine system," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 1, pp. 86–94, 2007, doi: 10.1109/TEC.2006.889546.
- [5] G. Messina, E. T. De Bella, and L. Morici, "HTS Axial Flux Permanent Magnets Electrical Machine Prototype: Design and Test Results," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 2, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1109/TASC.2019.2892560.
- [6] C. P. Butterfield, "Axial Flux, Modular, Permanent-Magnet Generator with a Toroidal Winding for Wind Turbine Applications," no. July, 1998.
- [7] A. Ferreira, A. M. Silva, A. F. Costa, "Prototype of an Axial Flux Permanent Magnet Generator for Wind Energy Systems Applications Department of Electrical and Computer Engineering, FEUP Keywords," *2007 Eur. Conf. Power Electron. Appl.*, 2007.
- [8] M. R. Minaz and E. Akcan, "An Effective Method for Detection of Demagnetization Fault in Axial Flux Coreless PMSG with Texture-Based Analysis," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 17438–17449, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3050418.
- [9] T. Ferinando G. S. and M. Awaludin, "Meter Di Gedung C Fakultas Teknik Universitas Riau," pp. 2015–2018, 2015.
- [10] A. A. Nada and A. S. Al-Shahrani, "Shape Optimization of Low Speed Wind Turbine Blades using Flexible Multibody Approach," *Energy Procedia*, vol. 134, pp. 577–587, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.567.
- [11] D. Marten and G. Pechlivanoglou, "Integration of a WT Blade Design tool in XFOIL/XFLR5," *Proc. DEWEK*, no. April 2015, pp. 1–4, 2010.
- [12] R. Rq, H. Dqg, and E. Ko, "Scaled Horizontal Axis Wind Turbine Analysis," *5Th Int. Conf. Renew. Energy Res. Appl.*, vol. 5, pp. 3–8, 2016.
- [13] Mohammad Nachrul Irfan, "Analisa Performansi Mekanisme Passive Variable Pitch Untuk Turbin Hidrokinetik Sumbu Vertikal Tipe Darrieus Dengan Variasi Geometri Airfoil Berbasis Q-Blade," *2017*, vol. 1, no. 1, pp. 1–85, 2017.

- [14] M. A. Ikaningsih and W. Rosihan, "Penggunaan Styrofoam sebagai Material Bilah Turbin Angin," *Rotasi*, vol. 21, no. 1, p. 23, 2019, doi: 10.14710/rotasi.21.1.23-29.
- [15] M. Murshed, M. Y. Arafat, and M. Abdur Razzak, "Analysis of Air Foils and Design of Blades for a Low-Speed 250W Vertical Axis Wind Turbine Suitable for Coastal Areas of Bangladesh," *Ist Int. Conf. Adv. Sci. Eng. Robot. Technol. 2019, ICASERT 2019*, 2019, doi: 10.1109/ICASERT.2019.8934624.
- [16] T. Yeni Yusuf, "Analisa Kerja Turbin Angin Sederhana Dengan Dua Sudu Poros Horizontal," pp. 2–6, 2006.
- [17] Yudi Prasetyo, "Analisis Perbandingan Bahan Material Magnet Dalam Pemodelan Permanent Magnet Synchronous Generator (Pmsg) 12 Slot 8 Kutub Dengan Menggunakan Finite Elemen Method (Fem) Software," 2019.
- [18] S. D. Nikhade, S. C. Kongare, and S. A. Kale, "Design of an airfoil for low wind horizontal axis micro wind turbine," *2017 2nd Int. Conf. Conver. Technol. I2CT 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 850–853, 2017, doi: 10.1109/I2CT.2017.8226249.
- [19] N. H. Sari and W. G. Laksamana, "Perancangan bilah tipe taperless pada kincir angin: Studi kasus di PT. Lentera Bumi Nusantara Tasikmalaya," *Din. Tek. Mesin*, vol. 9, no. 2, p. 104, 2019, doi: 10.29303/dtm.v9i2.286.
- [20] A. Anam, I. W. Sujana, and G. Andri, "Pengaruh Parameter Efisiensi dan Daya Terhadap Kinerja Turbin Angin Vertikal Darrieus Tipe H Naca 4309 Energi angin merupakan energi stokastik yang berhembus pada waktu- waktu tertentu tetapi hal itu dapat diprediksi dengan suatu kemungkinan tertentu . Ke," *Tek. Mesin Inst. Teknol. Nas. Malang*, vol. 8, no. 2, pp. 1–7, 2018.