

## PEMODELAN DAN SIMULASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU SISTEM *ON-GRID* MENGGUNAKAN MATLAB SIMULINK

<sup>1</sup>Yosep Cristian\*, <sup>2</sup>Eva Magdalena Silalahi, <sup>3</sup>Bambang Widodo

<sup>1,2,3</sup>Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia,

<sup>1,2,3</sup>Jl. Mayjen Sutoyo No.2 Cawang, Jakarta Timur 13630, DKI Jakarta

<sup>2</sup>[eva.silalahi@uki.ac.id](mailto:eva.silalahi@uki.ac.id), <sup>3</sup>[bambang.widodo@uki.ac.id](mailto:bambang.widodo@uki.ac.id)

\*Corresponding author. <sup>1</sup>[yosep12christian@gmail.com](mailto:yosep12christian@gmail.com)

### Abstrak

Dalam penelitian ini, penulis menganalisis variabel penelitian berupa hasil daya mekanik turbin angin berdasarkan kecepatan angin bervariasi, serta hasil arus, tegangan dan daya generator sinkron magnet permanen berdasarkan kecepatan angin bervariasi. Pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hasil keluaran daya mekanik pada turbin angin, hasil daya dari generator, dan efisiensi dari sistem PLTB *On-Grid*. Metode yang digunakan pada penelitian ini menggunakan metode studi literatur dan metode asosiatif. Dimana metode studi literatur untuk mengumpulkan kajian pustaka tentang pembangkit listrik tenaga bayu, metode asosiatif untuk mengetahui hubungan dari beberapa variabel yang diteliti. Berdasarkan penelitian yang dilakukan pada simulasi, hasil *output* daya mekanik turbin angin pada kecepatan angin minimal (*cut-in*) 3.38 m/detik sebesar 27.68 W dan pada kecepatan angin maksimal (*rated*) mencapai 103.6 W, dan tegangan, arus dan daya yang dihasilkan generator saat kecepatan minimal yaitu 75.29 V, 2.81 A, dan 9.89 W, sedangkan pada saat kecepatan angin maksimal mencapai 75.37 V, 2.7 A, dan 77.54 W. Efisiensi maksimum yang dihasilkan PLTB *On-Grid* sebesar 75% pada kecepatan angin maksimal 7.63 m/detik.

**Kata Kunci:** daya listrik, generator sinkron magnet permanen, Matlab Simulink, on-grid, turbin angin

### Abstract

*In this study, the authors analyzed the variables of research in the form of wind turbine mechanical power results based on wind speed varies, as well as the results of current, voltage and power of permanent magnet synchronous generators based on wind speed varies. This study aims to determine the results of mechanical power output in wind turbines, the power output of generators, and the efficiency of On-Grid Power Plant Systems. The method used in this study uses literature study method and associative method. Where the method of literature study to collect literature on wind power plants, associative method to determine the relationship of several variables studied. Based on the research conducted on the simulation, the mechanical power output of wind turbine at minimum wind speed (*cut-in*) 3.38 m/sec is 27.68 W and at maximum wind speed (*rated*) reaches 103.6 W, and the voltage, current and power generated by the generator at minimum speed is 75.29 V, 2.81 A, and 9.89 W, while at maximum wind speed reaches 75.37 V, 2.7 A, and 77.54 W. The maximum efficiency generated by On-Grid PLTB is 75% at a maximum wind speed of 7.63 m/sec.*

**Keywords :** *electric power, permanent magnet synchronous generator, Matlab Simulink, on-grid, wind turbine*

## 1. PENDAHULUAN

Stabilitas energi perlu dijaga secara konsisten agar dapat memenuhi kebutuhan sehari-hari. Ada dua kategori sumber energi yaitu, terbarukan dan tidak terbarukan. Namun, meningkatnya permintaan energi tidak dapat dibandingkan dengan sumber energi tak terbarukan seperti bahan bakar fosil.

Menurut Arifin Tasrif, Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Indonesia, mengklaim bahwa cadangan energi bahan bakar fosil negara Indonesia dapat habis selama 15 tahun ke depan. Memanfaatkan sumber energi terbarukan, seperti tenaga angin, menjadi salah satu solusi dari krisis energi ini.

Sumber energi terbarukan, seperti tenaga angin, baik untuk lingkungan dan dapat digunakan tanpa batas waktu untuk menyediakan listrik. Menurut Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), dengan kecepatan angin rata-rata sekitar 3 m/detik hingga 4 m/detik, Indonesia memiliki potensi energi angin yang signifikan.

Turbin angin dapat digunakan dengan memanfaatkan tenaga angin untuk mengubah energi angin menjadi energi listrik. Meskipun pembangkit listrik tenaga angin memiliki keuntungan, terdapat pula masalah dalam kualitas daya listriknya, seperti penyimpangan tegangan, arus, dan frekuensi.

Berdasarkan Penelitian yang dilakukan Rudy Gianto pada Tahun 2022 yang berjudul **“Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Angin yang Berbasis DFIG untuk Analisis Aliran Daya”** yang menyimpulkan bahwa telah diajukan suatu konsep model PLTB berbasis DFIG untuk melakukan analisis terhadap aliran daya pada jaringan distribusi tenaga listrik. Model ini dibangun berdasarkan persamaan daya yang berkaitan dengan Pembangkit Listrik Tenaga Angin,

termasuk daya yang dihasilkan oleh turbin, daya pada rotor dan stator DFIG, serta daya keluaran keseluruhan dari pembangkit. Model tersebut dapat diterapkan dalam berbagai situasi operasional faktor daya DFIG, termasuk faktor daya satu, *leading*, dan *lagging*. Untuk menguji validitas model ini, sebuah studi kasus dilakukan dengan menerapkan model tersebut pada jaringan distribusi berkonfigurasi 69 bus<sup>[1]</sup>.

Pada Penelitian yang dilakukan Muslim Nuryogi dan Subiyanto pada Tahun 2019 dengan judul **“Perfoma Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Terhubung Grid Pada Pembebanan Dinamis”** yang menjelaskan Penelitian ini menggunakan *Power Simulator* (PSIM) untuk memodelkan dan mensimulasikan PLTB terhubung ke *grid* dengan rating daya 28 kW pada pembebanan dinamis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kinerja PLTB baik saat terkoneksi dengan *grid* dalam keadaan beban dinamis. Saat diuji pada beban dinamis, sistem menghasilkan daya maksimum yang lebih besar daripada beban yang disuplai, dan kelebihan daya dapat disalurkan ke *grid*. Tetapi, jika beban melebihi kapasitas daya yang dihasilkan oleh PLTB, jaringan listrik akan mengatasi kekurangan daya tersebut<sup>[2]</sup>.

Berdasarkan Penelitian yang dilakukan Rudy Gianto pada Tahun 2019 yang berjudul **“Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Angin Kecepatan Tetap Untuk Analisis Aliran Daya”** yang menjelaskan usulan model ini berdasarkan struktur setara dari generator induksi dalam keadaan baik yang digunakan dalam Pembangkit Listrik Tenaga Angin. Kemudian, model matematika tersebut dimasukkan ke dalam evaluasi aliran daya untuk menganalisis operasi keseluruhan sistem, termasuk juga Pembangkit Listrik Tenaga Angin. Hasil pengujian

mengonfirmasi validitas model pembangkit yang diusulkan, sehingga model ini bisa diterapkan untuk menggabungkan Pembangkit Listrik Tenaga Angin dalam analisis aliran daya dari sistem tenaga listrik<sup>[3]</sup>.

Pada Penelitian yang dilakukan Hilmansyah, Risty Jayanti Yuniar, Ramli pada Tahun 2017 dengan judul **“Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Kendali PI”** yang menyimpulkan bahwa pada generator induksi turbin angin dikontrol dalam penelitian ini dengan menggunakan kontrol PI (Proportional Integral). Kp (pengontrol proporsional) dan ki (pengontrol integral) adalah parameter yang digunakan. Melalui proses *trial and error* dan beberapa pengujian, nilai kp dan ki terbukti sesuai<sup>[4]</sup>.

Dan berdasarkan Penelitian yang dilakukan Subrata pada Tahun 2019 yang berjudul **“Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Angin 1 kW Berbantuan Simulink Matlab”** yang menyimpulkan bahwa melalui pemodelan, generator yang berputar pada putaran 53,53 Rpm dan menghasilkan torsi 3,176 Nm menghasilkan daya listrik sebesar 8,093 Watt dengan kecepatan angin rendah 1 m/s. Daya listrik yang dihasilkan meningkat menjadi 1000 Watt pada kecepatan generator 450 rpm dan torsi sebesar 31,5 Nm pada kecepatan angin maksimum 14 m/s. Ketika kecepatan angin pada beban berkisar antara 1 m/detik hingga 14 m/s, pemodelan *buck converter* dan *voltage regulator* menunjukkan bahwa tegangan rms beban mencapai rata-rata 220 volt dengan frekuensi 50 Hz, dan rata-rata Distorsi Harmonik Total (THD) sebesar 3,185%. Metode analisis dan simulasi bervariasi sebesar 1,352% dalam ketidaktepatan<sup>[5]</sup>.

Berdasarkan dari penelitian di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa pengujian

simulasi pemodelan pada suatu pembangkit listrik tenaga angin dengan terhubung ke jaringan *grid* perlu diperhatikan jenis turbin angin dan generator yang dapat mempengaruhi kinerja serta efisiensi pada pembangkit tersebut.

Dalam penelitian ini peneliti menggunakan Matlab Simulink untuk membuat pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu dan mensimulasikannya serta menganalisis dan mengambil data dari hasil uji coba pemodelan tersebut.

Maka dari itu, tujuan penelitian ini sebagai berikut :

1. Untuk memperoleh hasil daya turbin angin menggunakan kecepatan angin bervariasi.
2. Untuk mengetahui karakteristik turbin angin menggunakan kecepatan angin bervariasi.
3. Untuk memperoleh hasil tegangan, arus, dan daya pada generator menggunakan kecepatan angin bervariasi.
4. Untuk mengetahui faktor daya dan besarnya efisiensi dari sistem PLTB *On-Grid*.

## 2. KERANGKA TEORI

### 2.1. Energi Angin

Energi angin terbentuk oleh rotasi bumi dan pemanasan wilayah oleh matahari. Angin dihasilkan oleh energi matahari dan kemudian hilang karena turbulensi dan gesekan di permukaan bumi. Atmosfer bumi bisa dianggap sebagai saluran raksasa, sehingga jika energi digunakan di satu lokasi, tidak akan tersedia di tempat lain.

Dua tahap konversi energi digunakan untuk menggunakan energi angin. Rotor (baling-baling) pertama-tama didorong oleh aliran angin, yang membuatnya bergerak dengan kecepatan yang sama dengan angin. Kemudian, putaran rotor

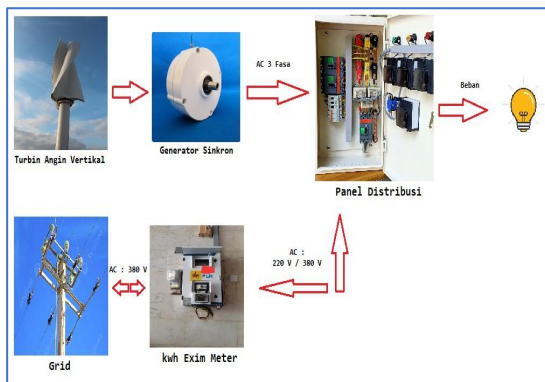
yang terpasang pada generator diubah menjadi arus listrik.

## 2.2. PLTB *On-Grid*

PLTB *On-Grid* merupakan sistem pembangkit listrik tenaga angin yang terhubung langsung dengan jaringan listrik seperti listrik PLN tanpa penyimpanan energi. Sistem PLTB *On-Grid* dapat dikatakan terhubung dengan grid jika memiliki frekuensi serta sudut fasa yang sinkron dengan *grid*.

Dari Gambar 1, misalkan daya yang dihasilkan PLTB untuk menyuplai beban rumah tangga sudah berlebihan, maka akan diekspor ke jaringan (*grid*) PLN. Sebaliknya, jika sewaktu-waktu PLTB yang terpasang di rumah tidak beroperasi atau sedang mengalami gangguan, maka PLN akan mengimpor untuk menyuplai beban rumah tangga tersebut sesuai kebutuhan beban dan daya yang diekspor PLTB ke jaringan (*grid*) PLN.

Besar daya ekspor dan impor akan ditunjukkan di kWh-meter atau *net exim* meter yang akan terpasang di rumah pelanggan jika pelanggan berminat untuk memasang PLTB sistem *on-grid*.



Gambar 1. Skema Prinsip Kerja PLTB *On-Grid*

## 2.3. Sistem Konversi Energi Angin

Energi angin tidak terbatas, dapat digunakan berulang kali, dan tidak menimbulkan polusi udara atau dampak lingkungan langsung jika digunakan

sebagai sumber pembangkit energi. Untuk mengaplikasikannya, diperlukan sistem yang disebut Sistem Konversi Energi Angin (SKEA).

### 2.3.1. Daya Mekanik Turbin Angin

Untuk mengoperasikan sistem mekanis pada rotor generator listrik, baling-baling turbin angin berputar untuk mengubah energi dari aliran udara menjadi energi rotasi. Massa yang bergerak melalui penampang dalam satu satuan waktu dikenal sebagai laju aliran massa udara.

Energi kinetik dalam udara merupakan aliran massa  $m$  dengan kecepatan  $v$ , diberikan pada Persamaan 2.2 berikut:

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (1)$$

Daya dari udara yang bergerak di udara, jika diasumsikan dengan kecepatan angin konstan, adalah:

$$P_{wind} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2)$$

Dimana  $m$  adalah laju aliran massa udara per detik. Udara bergerak melintasi area  $A$ , seperti area sapuan bilah rotor, dan menghasilkan tenaga, dapat dinyatakan menjadi:

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

Pada pengaplikasian dalam turbin angin  $A = \pi R^2$ , dimana  $R$  adalah jari-jari sudu (meter) pada turbin angin.

Perbandingan keluaran daya mekanik dengan daya dari aliran udara yang mengalir melalui luas penampang ( $A$ ) yang sama, rasio antara daya mekanik dengan daya aliran udara yang melewati bilah disebut dengan “koefisien daya” ( $C_p$ ) dan dapat dipresentasikan sebagai berikut:

$$C_p = \frac{P_m}{P_w} = \frac{\frac{1}{4} \rho A (V_1^2 - V_2^2) (V_1 + V_2)}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad (4)$$

Dengan menggunakan koefisien daya,

daya mekanik pada rotor dapat dihitung sebagai fungsi dari kecepatan angin:

$$P_m = C_p \frac{1}{2} \rho A v_w^3 \quad (5)$$

dimana:

$P_m$  = daya mekanik rotor turbin (Watt)

$C_p$  = koefisien daya

$\rho$  = densitas udara ( $Kg/m^3$ )

$A$  = luas sapuan angin ( $m^2$ )

$V_w$  = kecepatan angin (m/detik)

Dalam penelitian ini, untuk menentukan koefisien daya menggunakan model matematis pada turbin angin yang ditunjukkan dalam persamaan berikut:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left( C_2 \frac{1}{\lambda} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-C_5 \frac{1}{\lambda}} + C_6 \lambda \quad (6)$$

Untuk simulasi model, nilai berikut telah dipilih untuk koefisien  $C_1$  sampai  $C_6$ ;  $C_1 = 0.5$ ;  $C_2 = 116$ ;  $C_3 = 0.4$ ;  $C_4 = 0$ ;  $C_5 = 5$ ;  $C_6 = 21$ . Dari persamaan (6) bahwa daya mekanik diekstraksi dari udara merupakan fungsi dari kecepatan angin dan koefisien daya.

### 2.3.2. Efisiensi Sistem PLTB

Untuk mengetahui kinerja suatu sistem PLTB *On-Grid* dinyatakan dalam efisiensi yang merupakan perbandingan antara keluaran daya pada generator terhadap keluaran daya turbin angin. Berikut persamaan efisiensi sistem PLTB *On-Grid*:

$$\text{Efisiensi} = \frac{P_{\text{Output Generator}} (W)}{P_{\text{Output Turbin Angin}} (W)} \times 100\% \quad (7)$$

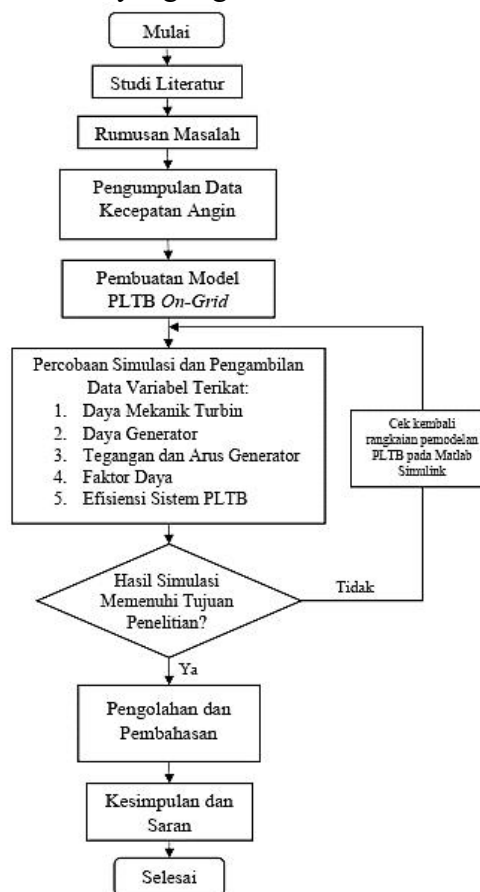
(7)

## 3. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode literatur dan metode asosiatif. Dimana metode literatur dilakukan dengan mengumpulkan kajian pustaka dari berbagai referensi, buku atau jurnal yang relevan dengan penelitian ini. Dan metode asosiatif digunakan untuk menganalisis hubungan antara dua atau lebih variabel.

Dalam penelitian ini metode asosiatif

digunakan untuk mengetahui hubungan kecepatan angin dengan hasil keluaran daya turbin angin, tegangan, arus, dan daya pada generator, serta efisiensi yang dihasilkan pada PLTB *On-Grid*. Pada Gambar 2 diperlihatkan diagram alir penelitian yang digunakan.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

### 3.1. Pemodelan Sistem PLTB *On-Grid*

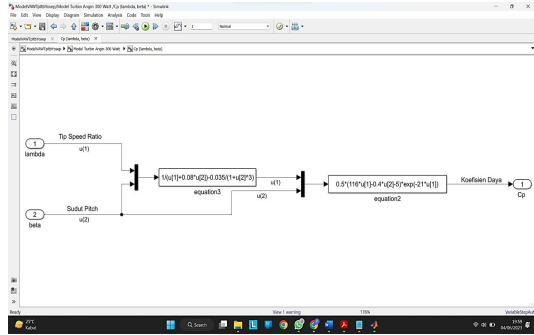
Pada penelitian ini menggunakan jenis turbin angin sumbu vertikal dengan daya 300 W dan jari-jari bilah 1 meter, kecepatan angin minimum 3 m/s hingga kecepatan angin maksimum 7 m/s di Pulau Tidung, Kepulauan Seribu. Sedangkan nilai sudut *pitch* menggunakan  $0^\circ$ . Nilai densitas udara yang digunakan  $1.225 \text{ kg/m}^3$ .

Pemodelan PLTB *On-Grid* terdiri dari beberapa komponen. Komponen-komponen dibuat menggunakan *Simulink*

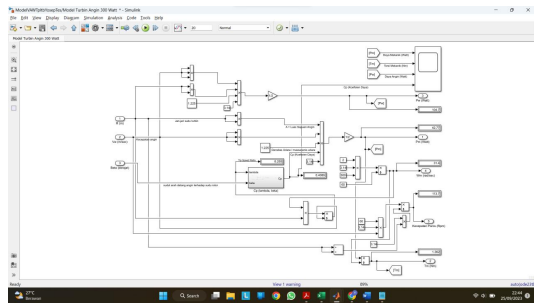
pada aplikasi Matlab.

### 3.1.1. Model Turbin Angin

Model turbin angin pada penelitian ini dirancang agar dapat bekerja pada kecepatan angin yang bervariasi dengan kecepatan angin rendah dan kecepatan angin nominal tanpa memakai kendali sudut *pitch*.



Gambar 3. Model Matematis Koefisien Daya (*Tip Speed Ratio* dan *Sudut Pitch*)

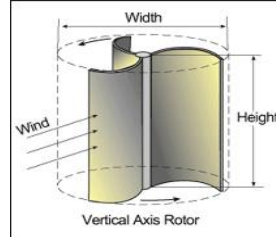


Gambar 4. Model Matematis Turbin Angin

Besaran nilai daya turbin angin yang dihasilkan dari energi angin tergantung pada desain turbin angin. Faktor-faktor seperti jari-jari bilah dan kecepatan angin mempengaruhi jumlah output daya mekanik dari turbin angin. Turbin angin dimodelkan menggunakan persamaan matematik dalam bagian 2 Landasan Teori. Gambar 4. menunjukkan model matematis turbin angin, dan berikut Tabel 1 menunjukkan parameter turbin angin.

Tabel 1. Parameter Turbin Angin

Parameter	Symbol	Nilai	Satuan
Daya Keluaran	$P_m$	300	Watt
Cut-in Angin	$V_{cut-in}$	3.3	m/s
Kecepatan Nominal Angin	$V_{rated}$	7.6	m/s
Jari-jari Bilah	R	1	Meter
Sudut Pitch	$\beta$	0	deg
Densitas Udara	$\rho$	1.225	$Kg/m^3$
Koefisien Daya Maksimum	$C_p$	0.46	-



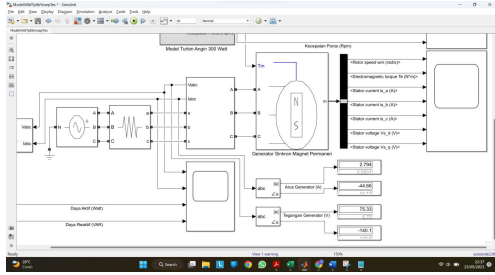
Gambar 5. Model Turbin Angin Sumbu Vertikal Savonius. Sumber : (Johnson, 1985)

Pada penelitian ini menggunakan jenis turbin angin sumbu vertikal savonius dengan daya 300 W, jumlah sudu 3 buah dan panjang jari-jari 1 meter. Menggunakan kecepatan angin minimum 3 m/s hingga kecepatan angin maksimum 7 m/s. Sedangkan nilai sudut pitch menggunakan  $0^\circ$ . Nilai densitas udara yang digunakan  $1.225 \text{ Kg/m}^3$ .

Turbin ini membutuhkan input kecepatan angin dan kecepatan mekanik pada rotor agar menghasilkan *output* berupa torsi mekanik. Lalu output turbin angin dihubungkan dengan generator sinkron magnet permanen untuk menghasilkan listrik 3 fasa.

### 3.1.2. Model Generator Sinkron Magnet Permanen

Setelah dihasilkan daya keluaran turbin angin lalu diteruskan ke generator dengan input torsi mekanik. Lalu dihubungkan ke grid 3 fasa untuk mensinkronisasi frekuensi dan tegangan yang dihasilkan generator. Berikut model generator sinkron magnet permanen:



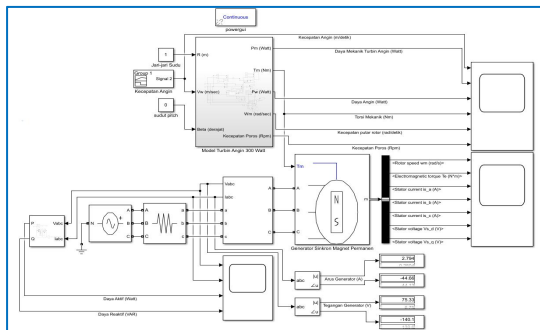
Gambar 6. Model Generator Sinkron Magnet Permanen

Pada bagian berikut diketahui parameter dari generator. Pada penelitian ini menggunakan generator dengan parameter yang sesuai dengan parameter turbin angin. Tabel 2 menunjukkan parameter generator:

Tabel 2. Parameter Generator

Parameter	Symbol	Nilai	Satuan
Daya rata-rata	$P_e$	300	Watt
Resistansi Stator	R	0.485	$\Omega$
Induktansi Stator	$L_d, L_q$	0.25	mH
Fluks Magnet	R	0.00945	Wb
Momen Inersia	J	0.00025	$Kg \cdot m^2$
Jumlah Kutub	n	16	-

Turbin ini membutuhkan input kecepatan angin dan kecepatan mekanik pada rotor agar menghasilkan *output* berupa torsi mekanik. Lalu *output* turbin angin dihubungkan dengan generator sinkron magnet permanen untuk menghasilkan listrik 3 fasa.



Gambar 7. Model Keseluruhan PLTB *On-Grid*

## 4. HASIL SIMULASI DAN

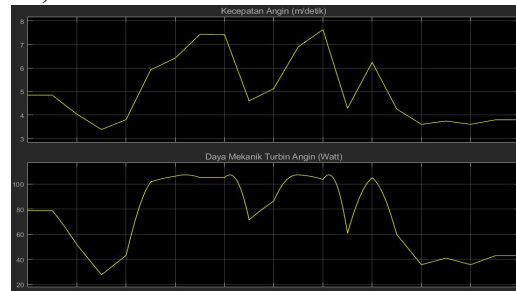
## PEMBAHASAN

Pada penelitian ini dibuat pemodelan PLTB sistem *On-Grid* pada Matlab Simulink yang akan digunakan untuk mengetahui berapa besar potensi daya mekanik pada turbin angin dan daya yang dibangkitkan generator, serta efisiensi dari sistem PLTB *On-Grid* tersebut dari kecepatan angin yang bervariasi di Pulau Tidung, Kepulauan Seribu, Jakarta.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui hasil keluaran daya mekanik turbin angin dan daya yang dibangkitkan oleh generator dengan mensimulasikan PLTB terkoneksi dengan *grid* serta menghitung efisiensi dari sistem. Setelah simulasi dilakukan, maka hasil simulasi akan dianalisa dan diolah. Komponen yang digunakan untuk pemodelan sistem PLTB *On-Grid* adalah: turbin angin, generator sinkron magnet permanen, dan *grid*.

### 4.1. Daya Mekanik Turbin Angin

Data hasil simulasi daya mekanik turbin angin diperoleh terhadap kecepatan angin yang bervariasi. Pada kecepatan minimal angin (*cut-in*) 3.38 m/detik didapat daya mekanik turbin angin dengan nilai 27,68 W. Sedangkan pada kecepatan maksimum angin (*rated*) 7.63 m/detik didapat daya mekanik turbin angin sebesar 103,6 W.



Gambar 8. Grafik Daya Mekanik Turbin Angin berdasarkan Kecepatan Angin

Tabel 3. Hasil Daya Mekanik Turbin Angin berdasarkan Kecepatan Angin



Kecepatan Angin (m/s)	Daya Mekanik Turbin Angin (Watt)
4,84	78,78
4,03	51,66
3,38	27,68
3,80	43,14
5,92	101,7
6,42	106,2
7,43	105,1
7,42	105,1
4,60	71,6
5,12	86,41
6,90	107,2
7,63	103,6
4,28	60,65
6,24	105
4,25	59,59
3,60	35,71
3,74	40,91
3,60	35,71
3,79	42,77
5,09	85,64

#### 4.2. Hasil Output Generator dan Efisiensi PLTB On-Grid

Pada percobaan simulasi ini, generator sinkron magnet permanen diberi beban resistansi 100  $\Omega$ , untuk dapat mengetahui nilai arus pada generator. Tegangan yang dikeluarkan generator berupa tegangan arus bolak-balik (AC) 3 fasa. Di bawah ini tabel output generator dan efisiensi PLTB *On-Grid* berdasarkan kecepatan angin.

Saat kecepatan angin minimal (*cut-in*) 3,38 m/detik menghasilkan tegangan sebesar 75,29 V dengan arus 2,81 A dan daya 9,89 Watt. Sedangkan pada kecepatan angin maksimum (*rated*) 7,63 m/detik didapat tegangan sebesar 75,37 V dengan arus 2,7 A dan daya 77,54 Watt.

Tabel 4. Hasil Output Generator dan Efisiensi PLTB *On-Grid*

Kecepatan Angin (m/s)	Daya Mekanik Turbin Angin (Watt)	Generator			Efisiensi (%)
		Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Daya (Watt)	
4,84	78,78	75,41	2,74	37,58	48%
4,03	51,66	75,35	2,78	21,77	42%
3,38	27,68	75,29	2,81	9,89	36%
3,80	43,14	75,33	2,79	16,75	39%
5,92	101,7	75,45	2,71	60,21	59%
6,42	106,2	75,46	2,7	70,58	66%
7,43	105,1	75,46	2,7	77,64	74%
7,42	105,1	75,46	2,7	77,64	74%
4,60	71,6	75,39	2,75	32,32	45%
5,12	86,41	75,42	2,73	46,36	54%
6,90	107,2	75,47	2,7	74,12	69%
7,63	103,6	75,37	2,7	77,54	75%
4,28	60,65	75,37	2,77	26,04	43%
6,24	105	75,46	2,7	28,23	27%
4,25	59,59	75,37	2,77	26,04	44%
3,60	35,71	75,31	2,8	13,15	37%
3,74	40,91	75,32	2,79	15,65	38%
3,60	35,71	75,31	2,8	13,15	37%
3,79	42,77	75,33	2,79	16,75	39%
5,09	85,64	75,42	2,73	42,79	50%

Rata-rata efisiensi sistem Pembangkit

Listrik Tenaga Bayu (PLTB) mencapai 30%, dengan batas maksimal efisiensi mencapai 50%. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan generator dalam menghasilkan listrik ketika jumlah angin yang memutar turbin terlalu tinggi. (7).

Sesuai hasil simulasi model PLTB *On-Grid*, diperoleh efisiensi maksimum mencapai 75% dengan daya yang dihasilkan oleh generator sebesar 77,54 W dan efisiensi minimum sebesar 36% dengan daya yang dihasilkan generator mencapai 9,89 W. Dengan demikian, semakin bertambah kecepatan angin maka semakin tinggi efisiensi yang dihasilkan dari PLTB *On-Grid*.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan, maka peneliti dapat mengambil simpulan sebagai berikut:

1. Diperoleh nilai output daya mekanik turbin angin terhadap kecepatan angin yang bervariasi yaitu: pada kecepatan angin minimal (*cut-in*) menghasilkan daya mekanik sebesar 27,68 W dan pada kecepatan angin maksimum (*rated*) sebesar 103,6 W.
2. Diperoleh karakteristik dari turbin angin terhadap kecepatan angin yang bervariasi yaitu: nilai koefisien daya maksimum mencapai 0,41 pada kecepatan angin 4,03 m/detik dan koefisien daya minimum 0,12 pada kecepatan angin 7,42 m/detik. Perbandingan torsi mekanik dan kecepatan putaran poros terhadap kecepatan angin berbanding lurus, dimana pada kecepatan angin minimal (*cut-in*) 3,38 m/detik menghasilkan torsi mekanik 0,89 Nm dan kecepatan putaran poros 101,4 rpm. Pada kecepatan angin maksimum (*rated*) menghasilkan torsi mekanik 3,29 Nm



- dan kecepatan putaran poros mencapai 228,9 rpm.
3. Pada kecepatan angin minimal (*cut-in*) 3,38 m/detik generator menghasilkan 75,29 V dan 2,81 A dengan daya 9,89 W. Pada kecepatan angin maksimum (*rated*) 7,63 m/detik menghasilkan 75,37 V dan 2,7 A dengan daya 77,54 W dengan beban 100  $\Omega$ .
  4. Diperoleh faktor daya tertinggi mencapai 0,22 pada kecepatan angin maksimum (*rated*). Efisiensi maksimum yang dihasilkan PLTB *On-Grid* mencapai 75% pada kecepatan angin maksimum.

## 5.2. Saran

Agar dapat menghasilkan arus pada generator perlu diberi beban resistif dengan nilai yang sesuai pada tegangan yang dihasilkan generator, sehingga beban tersebut tidak menghasilkan pergeseran sudut fasa arus dan tegangan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Gianto, R. (2019). Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Angin Kecepatan Tetap Untuk Analisis Aliran Daya. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, 8(1), 13-14. doi:10.25077/jnte.v8n1.605.2019
- [2] Gianto, R. (2022). Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Angin yang Berbasis DFIG untuk Analisis Aliran Daya. *Jurnal Rekayasa ElektriKa*, 18(4), 230-231. doi:10.17529/jre.v18i4.23329
- [3] Hilmansyah, Yuniar, R. J., & Ramli. (2017). Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Kendali Pi. *Jurnal Sains Terapan*, 3(1), 25-26. doi:10.32487/jst.v3i1.226
- [4] Nuryogi, M., & Subiyanto. (2019). Performa Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Terhubung Grid Pada Pembebanan Dinamis. *Edu ElektriKa Journal*, 8(2), 68-69. Diakses dari <http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/eduel>
- [5] Subrata. (2014). Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Angin 1kW Berbantuan Simulink Matlab. *Jurnal Teknik Elektro Universitas Tanjungpura*, 2(2), 7. Diakses dari <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/jteuntan/article/view/7485>
- [6] Agus, M. (2022). *Simulasi Pengaruh Angin Terhadap Daya dan Efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Menggunakan Matlab Simulink*. Thesis, Universitas Hasanuddin. Diakses dari <http://repository.unhas.ac.id:443/id/eprint/23333>
- [7] Amru, N. A., & Rangkuti, C. (2020). Penggunaan Turbin Angin Darrieus Sebagai Pembangkit Listrik untuk Rumah Sederhana di Desa Pusaka Rakyat, Tarumajaya, Bekasi. *Webinar Nasional Cendekiawan ke 6*(1), 6. Diakses dari <https://www.publikasi.kocenin.com/index.php/pakar/article/view/44>
- [8] Bhadra, S. N., Kastha, D., & Banerjee, S. (2005). *Wind Electrical Systems* (1 ed.). New Delhi: Oxford University Press. Diakses dari <https://libgen.is/book/index.php?md5=8C1F779AC4D277F4FBCCF4444A492CCD>
- [9] Donev, J. (2021). *Energy Education*. Diakses dari Types of Wind Turbines: [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Types\\_of\\_wind\\_turbines#cite\\_note-1/sitemap.xml](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Types_of_wind_turbines#cite_note-1/sitemap.xml)
- [10] Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi. (2021, 1 30). *Energi Angin*. Diakses

- dari Potensi Energi Angin Indonesia 2020:  
[https://p3tkebt.esdm.go.id/pilot-plan-project/energi\\_angin/potensi-energi-angin-indonesia-2020](https://p3tkebt.esdm.go.id/pilot-plan-project/energi_angin/potensi-energi-angin-indonesia-2020)
- [11] Johnson, G. L. (1985). *Wind Energy Systems*. Prentice Hall. Diakses dari <https://libgen.is/book/index.php?md5=48621C4C9D3D37E1DC2A8E129F5CD7D9>
- [12] Kamus Besar Bahasa Indonesia. (n.d.). Diakses dari Model: <https://kbbi.web.id/model>
- [13] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2019). *Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTB Off-Grid*. Diakses dari <https://ebtke.esdm.go.id/post/2021/02/22/2804/buku.panduan.pengoperasian.dan.pemeliharaan.pltb.off-grid>
- [14] Krohn, S. (2001). *Guided Tour On Wind Energy*. Diakses dari <http://ele.aut.ac.ir/~wind/en/tour/index.htm>
- [15] National Aeronautics and Space Administration. (2023). *POWER*. Diakses dari Data Access Viewer: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [16] Sugiyono. (2013). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R & D*. Bandung: Alfabeta. Diakses dari <http://repository.um-palembang.ac.id/id/eprint/8411>
- [17] Suprianto. (2015, 10 15). *Elektronika Industri*. Diakses dari Sistem 3 Fasa: <https://blog.unnes.ac.id/antosupri/sistem-3-fasa/>
- [18] Triana, P. A. (2013). *Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Pada Sistem Hybrid di Teknik Elektro ITN Malang*. Skripsi, Malang. Diakses dari <http://eprints.itn.ac.id/id/eprint/7119>
- [19] Wikipedia. (2022). Diakses dari
- Matlab:  
<https://id.wikipedia.org/wiki/MATLAB>
- [20] Wikipedia. (2022). *Skala Beaufort*. Diakses dari Skala Modern: [https://id.wikipedia.org/wiki/Skala\\_Beaufort](https://id.wikipedia.org/wiki/Skala_Beaufort)