

# Optimasi Daya Turbin Angin Sumbu Vertikal 5 Kw Pada Kecepatan Angin Rendah Menggunakan Matlab

Rita Hariningrum<sup>1\*</sup>, Sukarno Budi Utomo<sup>2</sup>, Afeef Kurnia Rahmawan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Kemaritiman , Universitas IVET Semarang, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Industri, Universitas Sultan Agung Semarang, Indonesia

<sup>3</sup>Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang, Indonesia

Email: <sup>1</sup>[hariningrumrita70@gmail.com](mailto:hariningrumrita70@gmail.com), <sup>2</sup>[sukarno@unissula.ac.id](mailto:sukarno@unissula.ac.id), <sup>3</sup>[afeefkurniarahman@upgris.ac.id](mailto:afeefkurniarahman@upgris.ac.id)

Email Penulis Korespondensi: <sup>1</sup>[hariningrumrita70@gmail.com](mailto:hariningrumrita70@gmail.com)

Info Artikel	Abstrak
<p><b>Kata Kunci:</b>                      Turbin Angin Sumbu Horizontal                      Kecepatan Angin Rendah                      Tip Speed Ratio                      Koefisien Daya                      Generator Sinkron</p>	<p>Kecepatan angin di wilayah pesisir utara Kota Semarang bersifat sangat fluktuatif dengan rata-rata berkisar antara 3–8 m/s, sehingga produksi daya listrik pada Turbin Angin Sumbu Horizontal (HAWT) konvensional belum optimal karena umumnya didesain untuk kecepatan di atas 7 m/s. Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan analitis untuk meningkatkan efisiensi penangkapan daya pada kondisi kecepatan angin rendah. Penelitian ini menyajikan analisis berbasis pemodelan dan simulasi MATLAB/Simulink untuk mengoptimalkan parameter utama turbin angin berkapasitas 5 kW, dengan fokus pada penentuan nilai tip speed ratio (TSR) yang optimal agar dimensi sudu dan torsi rotor sesuai dengan target daya. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai TSR optimal sebesar 8,1 menghasilkan koefisien daya maksimum (<math>C_p</math>) sebesar 0,48. Berdasarkan parameter tersebut, konfigurasi HAWT yang diusulkan beroperasi dengan jari-jari sudu 6,117 m, diameter rotor 12,234 m, luas sapuan rotor sebesar 117,49 m<sup>2</sup>, dan kecepatan sudut rotor 7,3 rad/s. Pada kondisi kecepatan angin nominal 5,5 m/s, sistem yang dirancang mampu menghasilkan daya mekanik sebesar 5.750 W dan daya listrik keluaran generator sinkron sebesar 5.000 W (5 kW) pada tegangan 400 V.</p>
<p><b>Keywords:</b>                      Horizontal Axis Wind Turbine                      Low Wind Speed                      Tip Speed Ratio                      Power Coefficient                      Synchronous Generator</p>	<p>Wind speed along the northern coast of Semarang City is highly variable, ranging between 3 and 8 m/s, which leads to suboptimal electrical power production from conventional Horizontal Axis Wind Turbines (HAWT) typically designed for speeds above 7 m/s. Therefore, an analytical approach is required to enhance power capture efficiency under low wind speed conditions. This study presents a modeling and simulation-based analysis using MATLAB/Simulink to optimize the core parameters of a 5 kW HAWT, focusing on determining the optimal tip speed ratio (TSR) to ensure compatibility between blade dimensions, rotor torque, and targeted power output. The analysis reveals that an optimal TSR of 8.1 yields a maximum power coefficient (<math>C_p</math>) of 0.48. Under this condition, the proposed HAWT configuration operates with a blade radius of 6.117 m, a rotor diameter of 12.234 m, a swept area of 117.49 m<sup>2</sup>, and a rotor angular speed of 7.3 rad/s. At a nominal wind speed of 5.5 m/s, the designed system successfully generates a mechanical power of 5,750 W and a synchronous generator electrical output of 5,000 W (5 kW) at a voltage of 400 V.</p>
<p><i>JuKSIT is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License</i></p>	

## 1. PENDAHULUAN

Data karakteristik angin dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) menunjukkan bahwa wilayah pesisir utara Kota Semarang memiliki karakteristik kecepatan angin yang sangat fluktuatif [1]. Kecepatan angin di kawasan ini diperkirakan berada pada rentang 3 m/s hingga 8 m/s dengan nilai rata-rata dominan berkisar 5,5 m/s. Karakteristik kecepatan angin yang relatif rendah ini menjadi salah satu kendala utama dalam pengembangan pembangkit listrik tenaga angin di wilayah tersebut, karena sebagian besar teknologi turbin angin komersial dirancang untuk area berkecepatan tinggi [2]. Berdasarkan kondisi empiris tersebut, permasalahan utama dalam penelitian ini adalah bagaimana merancang struktur Turbin Angin Sumbu

Horizontal (Horizontal Axis Wind Turbine – HAWT) yang mampu menghasilkan daya optimal pada kondisi kecepatan angin rendah dan berfluktuasi di wilayah pesisir tropis Kota Semarang.

Secara umum, teknologi turbin angin diklasifikasikan berdasarkan mode operasinya menjadi dua jenis, yaitu turbin angin berkecepatan tetap (*Fixed Speed Wind Turbine – FSWT*) dan turbin angin berkecepatan variabel (*Variable Speed Wind Turbine – VSWT*) [3]. Dibandingkan dengan FSWT, sistem VSWT memiliki sejumlah keunggulan mutakhir, antara lain kemampuan menangkap energi angin yang lebih tinggi, pengurangan beban transien pada komponen mekanik, serta kualitas pengkondisian daya listrik yang lebih baik [4] [5]. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai tip speed ratio (TSR) optimal serta parameter desain rotor dan sudu turbin angin berkapasitas 5 kW agar mampu menangkap daya maksimum pada kondisi kecepatan angin rendah.

Strategi pengendalian merupakan aspek krusial pada jenis VSWT karena berpengaruh langsung terhadap karakteristik transien turbin dan stabilitas beban yang diterima oleh jaringan listrik. Pada operasi VSWT, daerah kerja dibagi menjadi dua kondisi utama, yaitu di bawah dan di atas kecepatan angin nominal. Pada kecepatan angin di bawah nilai nominal, tujuan utama sistem kendali torsi adalah mengoptimalkan penangkapan energi angin (*Maximum Power Point Tracking – MPPT*) sekaligus meminimalkan beban transien pada komponen sistem transmisi mekanis (*drivetrain*) [3]. Sebaliknya, ketika angin mencapai atau melebihi kecepatan nominal, pengendalian sudut pitch diaktifkan untuk menjaga agar daya keluaran turbin tidak melebihi kapasitas batasnya [5].

Untuk memperoleh konversi daya maksimum pada kondisi angin rendah (di bawah nominal), rotor turbin angin harus beroperasi pada kecepatan putar referensi yang ditentukan berdasarkan kecepatan angin efektif yang ditangkap oleh bilah. Berbagai pendekatan pengendalian telah dikembangkan oleh peneliti terdahulu untuk mengatasi fluktuasi ini, di antaranya sistem kendali sudut pitch adaptif menggunakan mekanisme elektro-hidrolik untuk meredam fluktuasi daya keluaran dan torsi drivetrain [6] [7]. Penggunaan katup servo pada motor hidrolik juga terbukti mampu meningkatkan respons kendali pitch [8] [9].

Di sisi lain, pendekatan kendali nonlinier melalui pengaturan torsi elektromagnetik generator telah diterapkan untuk mencapai titik MPPT pada kecepatan angin rendah [10]. Integrasi estimator kecepatan angin pada kendali nonlinier memperlihatkan efisiensi penangkapan daya yang tinggi, sementara kendali Proportional-Integral (PI) berbasis *fuzzy* dilaporkan mampu mengatasi masalah nonlinieritas pada torsi mekanis turbin [11].

Namun demikian, sebagian besar penelitian sistem kendali dan optimasi tersebut mengasumsikan kondisi kecepatan angin nominal yang relatif tinggi, yaitu berkisar antara 9 m/s hingga 11 m/s, yang merupakan karakteristik umum di wilayah sub-tropis seperti Eropa. Kondisi tersebut sangat kontras dengan wilayah tropis seperti Indonesia, khususnya pesisir Kota Semarang, yang memiliki karakteristik kecepatan angin lebih rendah (berkisar 3–8 m/s), tingkat kelembapan tinggi, serta suhu lingkungan yang fluktuatif mencapai 35 °C. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan perancangan yang berbeda untuk mengoptimalkan potensi energi angin rendah tersebut, salah satunya melalui pemodelan geometri rotor dan penentuan parameter aerodinamika sudu yang presisi agar turbin mampu mengekstraksi daya kinetik angin secara maksimum.

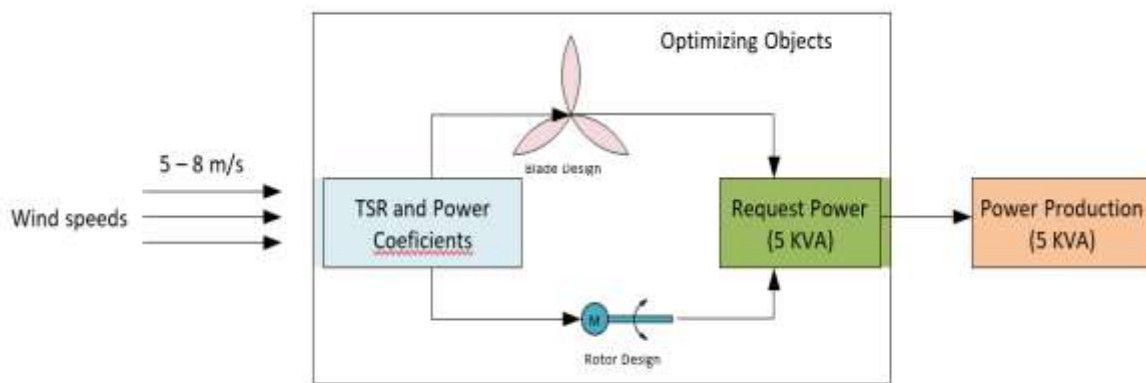
Dalam perancangan komponen mekanis HAWT, tip *speed ratio* (TSR) menjadi parameter utama karena memengaruhi proses penangkapan energi dan efisiensi konversi mekanis rotasi. Kinerja akhir turbin ditentukan oleh interaksi antara kapasitas daya target, jumlah sudu, dimensi geometri bilah, dan nilai nominal TSR [3]. Untuk menghasilkan daya listrik maksimum, perancangan sudu rotor harus didasarkan pada nilai TSR yang paling optimal [5]. Berdasarkan data spesifikasi turbin angin komersial di pasar, apabila daya mekanik ( $P_m$ ) sebesar 5 kW ingin dicapai, umumnya dibutuhkan kecepatan angin minimum hingga 15 m/s [2]. Jika spesifikasi standar tersebut dipaksakan bekerja di wilayah pesisir Semarang dengan rata-rata angin hanya 5,5 m/s, maka turbin hanya akan mampu mengekstrak daya nyata mekanik sekitar 1.750 Watt dan daya listrik akhir berkisar 1.181 Watt.

Untuk mengatasi kesenjangan (gap) performa tersebut, penelitian ini berfokus pada pemodelan matematik dan simulasi menggunakan MATLAB/Simulink untuk merancang ulang diameter rotor dan luas sapuan bilah HAWT agar adaptif terhadap kecepatan angin rendah sebesar 5,5 m/s. Pendekatan perancangan ini didasarkan pada optimasi nilai TSR dan koefisien daya maksimum ( $C_p$ ) generator sinkron dengan target daya akhir sebesar 5 kW. Melalui penelitian ini, diharapkan diperoleh sebuah model desain turbin angin sumbu horizontal yang handal, efisien, dan aplikatif untuk kawasan pesisir tropis dengan potensi angin rendah.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

### 1. Desain Sistem dan Alur Penelitian

Penelitian ini dilakukan menggunakan metode pemodelan matematik dan simulasi numerik berbasis software MATLAB/Simulink. Tahapan penelitian dimulai dengan melakukan pengumpulan data sekunder mengenai karakteristik kecepatan angin di pesisir utara Kota Semarang melalui data BMKG. Data tersebut kemudian dijadikan parameter input fisis dalam memodelkan blok karakteristik aerodinamika turbin angin. Secara umum, blok diagram sistem konversi energi angin (SKEA) yang dimodelkan dalam penelitian ini terdiri dari beberapa komponen utama: rotor turbin angin sumbu horizontal (HAWT), sistem transmisi mekanis (*drivetrain/gearbox*), dan generator sinkron tiga fasa untuk menghasilkan daya keluaran listrik. 1. Metodologi perancangan sistem turbin angin secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Desain Turbin Angin 5 kW untuk Kondisi Kecepatan Angin Rendah

Gambar diatas merupakan desain turbin angin sumbu vertikal (VAWT) berkapasitas 5 kW yang dirancang untuk beroperasi pada kondisi kecepatan angin rendah dan fluktuatif, yaitu pada rentang 5–8 m/s. Dalam model ini, variasi kecepatan angin digunakan sebagai parameter input utama untuk menentukan nilai tip speed ratio (TSR) dan koefisien daya ( $C_p$ ) yang optimal. Penentuan nilai TSR yang optimal bertujuan untuk memperoleh koefisien daya maksimum sehingga proses konversi energi angin menjadi daya mekanik dapat berlangsung secara efisien. Berdasarkan nilai TSR optimal tersebut, parameter aerodinamika dan mekanika turbin, seperti panjang sudu, jari-jari sudu, diameter rotor, luas sapuan, kecepatan sudut rotor, serta torsi mekanik, dapat dihitung dan dioptimalkan. Selanjutnya, hasil optimasi desain sudu dan rotor dievaluasi terhadap kebutuhan daya yang ditetapkan sebagai nilai acuan, yaitu sebesar 5 kVA. Daya yang diinginkan ini digunakan sebagai standar untuk menilai kesesuaian nilai TSR dan konfigurasi rotor dalam menghasilkan kapasitas turbin yang ditargetkan pada kondisi kecepatan angin rendah. Apabila parameter desain yang diperoleh telah memenuhi kebutuhan daya, maka sistem menghasilkan daya keluaran akhir sebesar 5 kVA. Model perancangan yang diusulkan ini menunjukkan pendekatan sistematis dalam menyesuaikan parameter desain turbin dengan karakteristik angin lokal, sehingga mampu meningkatkan kinerja dan optimalisasi produksi daya pada turbin angin berkapasitas 5 kW di wilayah dengan variasi kecepatan angin rendah.

### 2. Pemodelan Aerodinamika Turbin Angin (HAWT)

Daya mekanis ( $P_m$ ) yang dihasilkan oleh rotor turbin angin sumbu horizontal sangat bergantung pada karakteristik kerapatan udara, luas sapuan rotor, dan efisiensi konversi daya atau dikenal dengan koefisien daya ( $C_p$ ). Konversi daya mekanis ini dinyatakan melalui Persamaan (1):

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \dots \dots \dots (1)$$

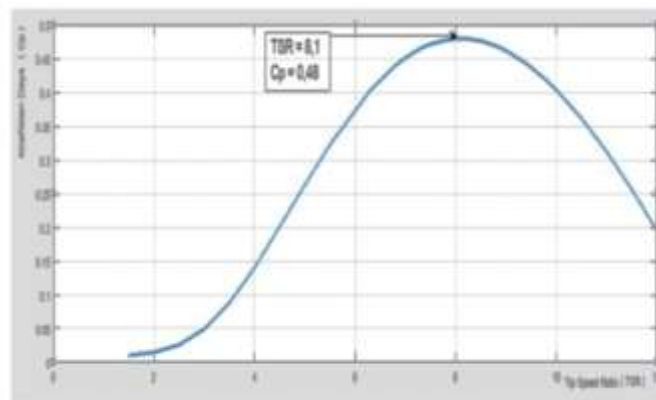
Keterangan :  $P_m$ =Daya mekanis rotor turbin (Watt);  $\rho$ = Kerapatan atau densitas udara  $\text{kg/m}^3$ , pada suhu tropis pesisir ditentukan sebesar  $1,225 \text{ kg/m}^3$  ;  $A$ = Luas area sapuan rotor turbin ( $\text{m}^2$ );  $V$  = Kecepatan angin efektif yang mengenai bilah ( $\text{m/s}$ ) ;  $C_p$  = Koefisien daya turbin angin yang merupakan fungsi dari tip speed ratio ( $\lambda$ ) dan sudut pitch ( $\beta$ ).

3. Optimasi Dimensi Sudu untuk Angin Rendah

**3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Berdasarkan hasil perhitungan dan simulasi yang telah dilakukan, diperoleh nilai tip speed ratio (TSR) optimal sebesar 8,1 dengan nilai koefisien daya maksimum  $C_p = 0,48$ , sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2. simulasi MATLAB Nilai TSR ini menunjukkan kondisi operasi turbin yang paling efisien dalam menangkap energi angin dan mengonversinya menjadi daya mekanik. Efisiensi generator yang digunakan dalam penelitian ini diasumsikan sebesar  $\eta_g = 0,9$ . Dengan daya keluaran generator sebesar  $P_e = 5000 \text{ watt}$ , maka daya mekanik yang dibutuhkan pada poros turbin dapat dihitung sebesar :

$$P_m = \frac{P_e}{\eta} = 5750 \text{ watt.} \tag{1}$$



**Gambar 2.** Optimasi Nilai TSR

Kecepatan angin nominal ditetapkan sebesar  $V = 5,5 \text{ m/s}$  berdasarkan nilai rata-rata yang paling dominan dari data kecepatan angin yang diperoleh dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). Selain itu, massa jenis udara diasumsikan sebesar  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ . Berdasarkan parameter tersebut, jari-jari sudu turbin angin dapat ditentukan menggunakan rumus berikut ini : [ ]

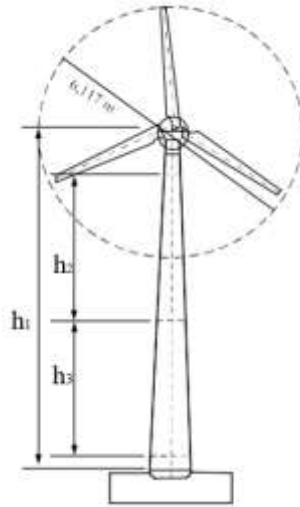
$$R = \sqrt{\frac{2 \times P_m}{C_p \pi \rho V^3}} = 6.117 \text{ meter} \tag{2}$$

Diameter rotor turbin dapat dhitung pada rumus berikut : [ ]

$$2 \times 6,117 = 12,234 \text{ meter} \tag{3}$$

$$A = \left(\frac{D}{2}\right)^2 \pi = 117,49 \text{ m}^2 \tag{4}$$

Desain jari-jari sudu ditunjukkan pada Gambar 3.

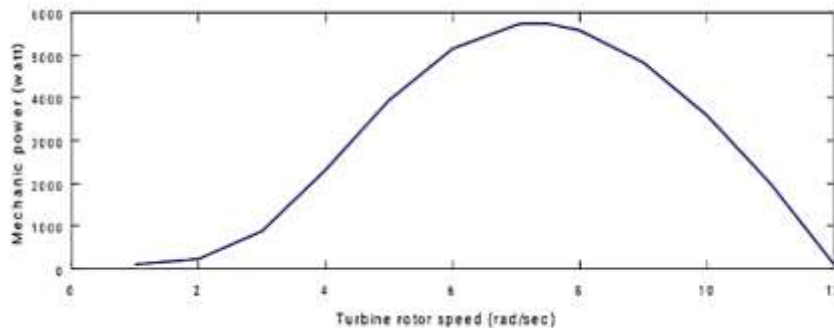


**Gambar 3.** Desain Sudu Turbin

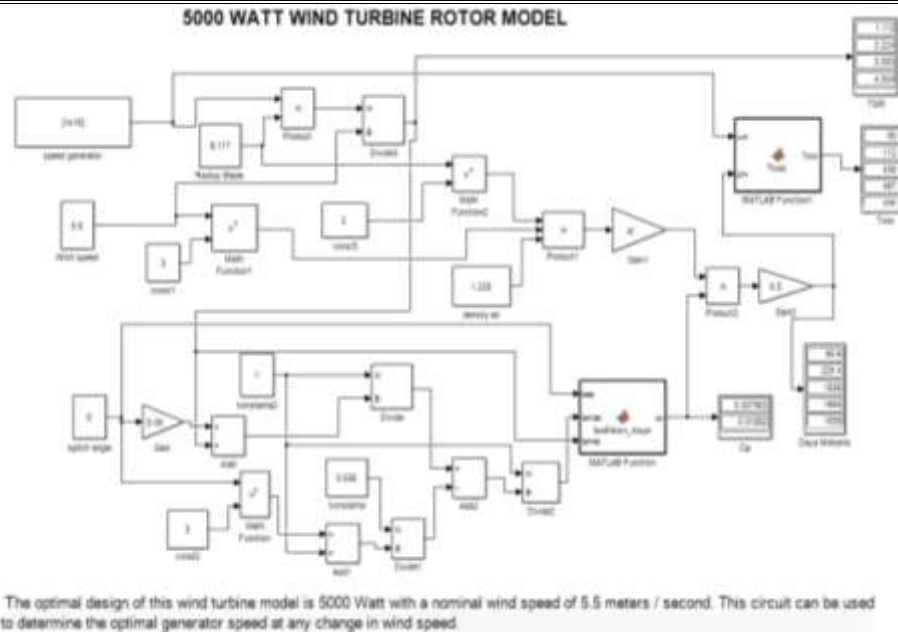
Kecepatan sudut rotor pada kecepatan angin konstan sebesar 5,5 m/s untuk nilai tip speed ratio  $\lambda = 8,1$  adalah

$$\omega = \frac{\lambda V}{R} = 7,3 \text{ rad/sec} \quad (5)$$

Hasil pengujian pada kecepatan angin nominal menggunakan MATLAB sebesar 5,5 m/s menunjukkan bahwa daya mekanik maksimum yang dicapai adalah 5.750 W dengan torsi turbin sebesar 787,7 N·m pada kecepatan sudut rotor optimum sebesar 7,3 rad/s. Hasil pengujian rotor turbin tersebut ditunjukkan pada gambar 4. berikut ini :



**Gambar 4.** Hasil pengujian rotor turbin pada nilai TSR sebesar 8,1 dan koefisien daya ( $C_p$ ) sebesar 0,48

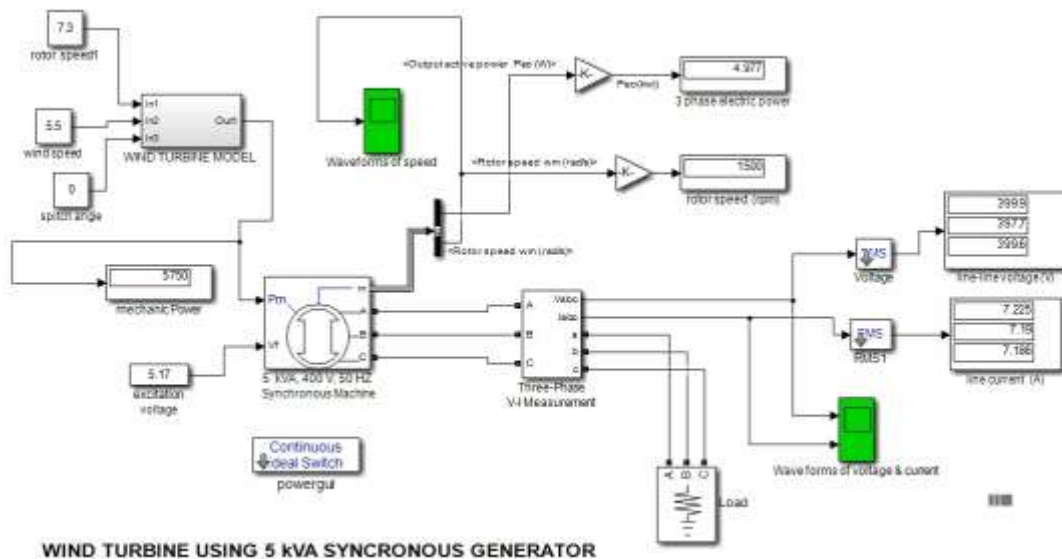


**Gambar 5.** Rangkaian pemodelan pengujian rotor turbin angin menggunakan Simulink MATLAB

Pada Gambar 5, rangkaian pemodelan rotor turbin beserta hasilnya telah sesuai dengan desain yang diinginkan. Namun, ketika kecepatan angin diturunkan menjadi 4 m/s, daya mekanik maksimum menurun menjadi 2.190 W dengan torsi turbin sebesar 455,4 N·m pada kecepatan sudut rotor optimum sebesar 5 rad/s.”

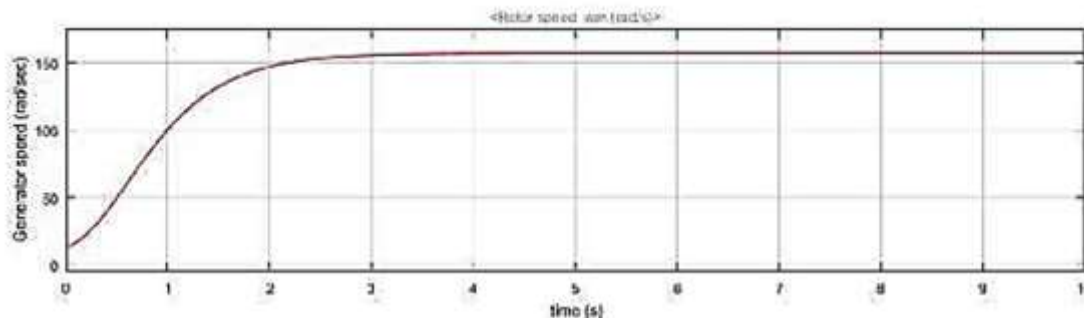
**PENGUJIAN ALAT**

Pengujian terhadap generator sinkron dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan maksimum generator dalam menghasilkan daya listrik ketika menerima torsi maksimum dari rotor turbin. Berdasarkan rangkaian pemodelan generator sinkron yang ditampilkan pada Gambar 8, diperoleh daya keluaran sebesar 4.977 W dengan tegangan 400 V dan arus 7,19 A saat generator dioperasikan pada torsi maksimum 787,7 N·m. Hasil pengujian ini mengindikasikan bahwa daya listrik yang dihasilkan telah mencapai kondisi maksimum dan sesuai dengan spesifikasi desain yang telah dirancang. Rangkaian pemodelan serta hasil pengujian generator sinkron ditunjukkan pada Gambar 8, 9, dan 10.

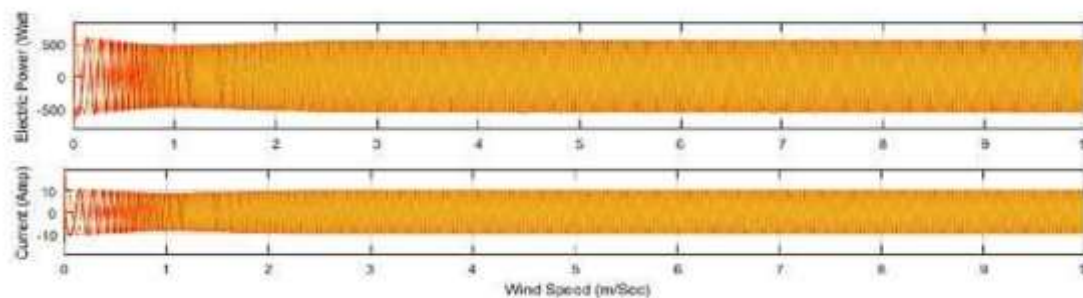


**Gambar 6.** Rangkaian pemodelan pengujian generator sinkron

Dari hasil simulasi MATLAB dapat disimpulkan bahwa perubahan kecepatan angin memberikan pengaruh signifikan terhadap berkurangnya daya mekanik dan torsi turbin angin, meskipun kondisi kecepatan sudut rotor tetap berada pada nilai optimum.



**Gambar 7.** Hasil pengujian generator pada kecepatan optimum (TSR)



**Gambar8.** Bentuk gelombang tegangan dan arus pada TSR sebesar 8,1 dan  $C_p$  sebesar 0,48.

**Tabel 1.** Hubungan antara daya mekanik maksimum dan kecepatan rotor optimal pada berbagai kondisi kecepatan angin

Wind Speed (m/ Sec)	Rotor Speed (rad/ sec)	Mechanical Torsi (Nm)	Mechanic al Power (Watt)	Volt (Volt )	Electric Power (Watt)
3	3,95	254,5	933	144	793
4	5	455,4	2190	325	1442
5	6,6	699.6	4320	393	3654
5,5	7,3	787,7	5750	400	5000
6	8	993.5	7464	469	6677
7	9,4	1392	11850	595,4	11300
8	11	1822	17610	736	16760

Tabel 1 menunjukkan perolehan daya mekanik maksimum dan torsi pada kecepatan sudut optimum rotor turbin, serta perubahan tegangan akibat variasi kecepatan angin. Hasil simulasi pada Tabel 2 menunjukkan bahwa pada awal pengujian dengan kecepatan angin sebesar 5,5 m/s, tegangan keluaran turbin angin adalah 400 V, dengan daya mekanik sebesar 5.750 W dan daya listrik sebesar 5.000 W. Ketika kecepatan angin menurun menjadi 3 m/s, terjadi penurunan tegangan yang signifikan hingga 144 V, dengan daya mekanik sebesar 933 W dan daya listrik sebesar 793 W. Sebaliknya, ketika kecepatan angin meningkat menjadi 8 m/s, tegangan keluaran meningkat secara signifikan hingga 736 V, dengan daya mekanik sebesar 17.610 W dan daya listrik sebesar 16.760 W.

Hasil pengujian terhadap variasi kecepatan angin dan perubahan beban menunjukkan adanya perubahan tegangan keluaran, sehingga perubahan beban memengaruhi karakteristik operasi turbin angin. Untuk

mengatasi kelemahan pada turbin PMSG, digunakan gearbox agar tegangan keluaran tetap berada dalam kondisi stabil meskipun terjadi perubahan kecepatan angin dan beban.

#### 4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa turbin angin berkapasitas 5 kW yang dirancang untuk kecepatan angin 5,5 m/s mencapai kondisi operasi optimal pada rasio kecepatan ujung bilah sebesar 8,1 dengan koefisien daya 0,48. Dengan jari-jari rotor 6,117 m, diameter 12,234 m, dan luas sapuan 117,49 m<sup>2</sup>, turbin mampu menghasilkan daya mekanik sebesar 5,75 kW dan daya listrik sebesar 5 kW pada tegangan 400 V. Penelitian ini mengonfirmasi bahwa desain rotor yang diusulkan efektif dalam memaksimalkan penangkapan energi angin pada kondisi kecepatan angin rendah dan layak untuk aplikasi pembangkitan listrik skala kecil.

#### REFERENSI

- [1] S. Elaeis Noviani R., Titik Istirokhatun, “Pengaruh Jumlah Kendaraan Dan Faktor Meteorologis (Suhu, Kelembaban, Kecepatan Angin) Terhadap Peningkatan Konsentrasi Gas Pencemar No<sub>2</sub> (Nitrogen Dioksida) Pada Persimpangan Jalan Kota Semarang,” *DIPOIPTEKS*, vol. I, no. 1, p. 10, 2013.
- [2] S. Hadi and N. Sugianto, “Model Distribusi Kecepatan Angin untuk Peramalan Gelombang dengan Menggunakan Metode Darbyshire dan Smb di Perairan Semarang,” vol. 1, no. April, 2012.
- [3] S. Rajendran and D. Jena, “Control of Variable Speed Variable Pitch Wind Turbine at Above and Below Rated Wind Speed,” vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/709128.
- [4] R. Saravanakumar and D. Jena, “Electrical Power and Energy Systems Validation of an integral sliding mode control for optimal control of a three blade variable speed variable pitch wind turbine,” *Int. J. Electr. POWER ENERGY Syst.*, vol. 69, pp. 421–429, 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.01.031.
- [5] S. Rajendran and D. Jena, “Variable speed wind turbine for maximum power capture using adaptive fuzzy integral sliding mode control,” vol. 2, no. June, pp. 114–125, 2014, doi: 10.1007/s40565-014-0061-3.
- [6] P. Taylor *et al.*, “Adaptive back-stepping pitch angle control for wind turbine based on a new electro-hydraulic pitch system,” no. July 2015, doi: 10.1080/00207179.2015.1041554.
- [7] X. Yin, W. Zhang, Z. Jiang, and L. Pan, “Adaptive robust integral sliding mode pitch angle control of an electro-hydraulic servo pitch system for wind turbine,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 133, p. 105704, 2019, doi: 10.1016/j.ymsp.2018.09.026.
- [8] E. C. Conference and L. B. Vista, “CFD AND CONTROL ANALYSIS OF A SMART HYBRID,” *Power Energy Convers.*, pp. 1–8, 2018.
- [9] V. Irizar and C. Schousboe, “Simulation Modelling Practice and Theory Hydraulic pitch control system for wind turbines : Advanced modeling and verification of an hydraulic accumulator,” *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 79, pp. 1–22, 2017, doi: 10.1016/j.simpat.2017.09.002.
- [10] A. El, F. Giri, A. Abouloifa, and A. Elfadili, *Nonlinear Control of a Variable Speed Wind Generator*, vol. 42, no. 9. IFAC, 2007. doi: 10.3182/20090705-4-SF-2005.00073.
- [11] A. N. Yousefi, “An optimal fuzzy PI controller to capture the maximum power for variable-speed wind turbines,” 2012, doi: 10.1007/s00521-012-1081-4.