



Desain dan Simulasi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Skala Kecil Untuk Penerangan di Perahu Nelayan

Parman^{1*}, Rahmat Basya Shahrys Tsany², Dicki Nizar Zulfika³, Thomas Brian⁴

¹ Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

^{2,3} Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

⁴ Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

*Corresponding Author's e-mail: parman@ppns.ac.id

Article History:

Received: October 31, 2025

Revised: November 27, 2025

Accepted: November 30, 2025

Keywords:

Mini Wind Power Plant,
Renewable Energy, Fishing
Boats, MATLAB Simulink

Abstract: The utilization of renewable energy in the maritime sector serves as a strategic solution to reduce fishermen's dependence on expensive and environmentally unfriendly fossil fuels. This study develops a mini-Wind Power Plant (PLTB) model that can be implemented on fishing boats using a MATLAB Simulink-based simulation approach. The study encompasses turbine aerodynamic design, generator selection, and control system optimization to enhance the efficiency of wind energy conversion into electrical power. Simulation results indicate that at an average wind speed of 7.7 m/s, the designed mini wind turbine is capable of generating 125.8 Watts of mechanical power with a peak torque of 3.44 Nm at a wind speed of 12 m/s. The study also calculates the turbine shaft size at 6 mm, the turbine-side pulley diameter at 70 mm, and the generator-side pulley diameter at 39.63 mm, with a belt drive length of 473.75 mm, based on the generator specifications of 1500 RPM and 81% efficiency. Considering the dynamic maritime environment, the design is evaluated through performance simulations using MATLAB Simulink to ensure power output stability under various wind speed conditions. The analysis demonstrates that the system can maintain wind energy conversion efficiency at optimal wind speeds and has significant potential for small-scale applications.

Copyright © 2025, The Author(s).

This is an open access article under the CC-BY-SA license



How to cite: Parman, P., Tsany, R. B. S., Zulfika, D. N., & Brian, T. (2025). Desain dan Simulasi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Skala Kecil Untuk Penerangan di Perahu Nelayan. *SENTRI: Jurnal Riset Ilmiah*, 4(11), 3592–3604. <https://doi.org/10.55681/sentri.v4i11.4888>

PENDAHULUAN

Perahu nelayan umumnya mengandalkan bahan bakar fosil untuk kebutuhan energinya, seperti penerangan dan pengoperasian peralatan elektronik. Ketergantungan ini tidak hanya menambah beban biaya operasional, tetapi juga berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca. Penerapan pembangkit listrik tenaga angin skala kecil pada perahu nelayan memiliki potensi untuk menjadi solusi yang ramah lingkungan dan ekonomis. Dengan memanfaatkan energi angin yang melimpah di lautan, sistem ini dapat menyediakan sumber listrik berkelanjutan yang dapat digunakan untuk penerangan dan kebutuhan energi lainnya. Namun, perancangan sistem ini memerlukan pendekatan yang komprehensif untuk memastikan efisiensi, stabilitas, dan kehandalan dalam kondisi lingkungan laut yang dinamis.

Sistem mini Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB) untuk perahu nelayan, yang menggabungkan pendekatan desain aerodinamika, optimasi sistem kontrol, serta simulasi berbasis MATLAB Simulink. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya

berfokus pada aplikasi turbin angin di darat atau lingkungan perkotaan, penelitian ini mempertimbangkan kondisi lingkungan maritim yang penuh tantangan, seperti fluktuasi kecepatan angin dan pergerakan perahu di atas permukaan air. Dengan menggunakan model berbasis simulasi, penelitian ini tidak hanya menguji efisiensi konversi energi angin menjadi listrik dalam berbagai kondisi kecepatan angin, tetapi juga menganalisis batas operasional optimal untuk memastikan daya keluaran yang stabil. Hal ini menjadi kontribusi baru dalam kajian pemanfaatan energi terbarukan di sektor perikanan, mengingat sebagian besar studi sebelumnya masih terbatas pada implementasi turbin angin dalam infrastruktur tetap di darat.

Selain itu, penelitian ini menawarkan inovasi dalam pemilihan komponen dan integrasi sistem yang disesuaikan untuk kebutuhan energi nelayan. Penggunaan generator sinkron magnet permanen (PMSG) dan generator Brushless DC (BLDC) dalam sistem ini memungkinkan efisiensi daya yang lebih tinggi serta stabilitas output listrik yang lebih baik dibandingkan dengan generator konvensional. Desain mini turbin angin yang dikembangkan juga dirancang agar kompak, ringan, dan mudah diinstalasi di perahu nelayan tanpa memerlukan modifikasi struktural yang kompleks. Dengan mempertimbangkan rata-rata kecepatan angin di perairan Indonesia sekitar 7,7 m/s, penelitian ini juga mengeksplorasi optimasi desain bilah turbin untuk meningkatkan daya keluaran tanpa menambah beban perahu secara signifikan. Lebih lanjut, penggunaan sistem kendali berbasis Simulink memberikan pendekatan yang lebih akurat dalam menganalisis performa sistem dalam berbagai skenario operasional, sehingga dapat memberikan rekomendasi teknis yang lebih presisi bagi implementasi sistem PLTB skala kecil. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi teoritis dalam bidang energi terbarukan, tetapi juga memiliki potensi penerapan langsung yang dapat mendukung transisi energi berkelanjutan di sektor perikanan, membantu nelayan dalam mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, sekaligus menekan biaya operasional mereka.

Landasan Teori

Mini turbin angin merupakan salah satu solusi yang menjanjikan dalam pemanfaatan energi terbarukan, khususnya dalam konteks pengurangan ketergantungan pada sumber energi fosil dan mitigasi perubahan iklim. Dalam kajian ini, berbagai aspek dari desain, performa, dan aplikasi mini turbin angin akan dibahas berdasarkan literatur yang relevan. Salah satu fokus utama dalam pengembangan mini turbin angin adalah desain yang sesuai untuk kecepatan angin rendah. Wardhana et al., (2019) mengemukakan bahwa desain mini horizontal turbin angin yang dirancang khusus untuk daerah dengan kecepatan angin rendah dapat meningkatkan efisiensi energi yang dihasilkan [1]. Penelitian ini menunjukkan bahwa dengan modifikasi tertentu pada struktur dan aerodinamika turbin, kinerja dapat dioptimalkan untuk kondisi lingkungan yang kurang ideal. Selain itu, Hairani & Jumaat, (2022) melaporkan pengembangan sistem pemantauan pintar untuk mini windmill yang menunjukkan bahwa turbin dapat menghasilkan daya maksimum 3.632W pada kecepatan angin 6.0 m/s, yang menegaskan pentingnya pemantauan dan pengumpulan data dalam evaluasi performa turbin[2].

Dalam konteks sistem hibrida, Abdel-Geliel et al., (2014) menjelaskan bahwa penggabungan turbin angin dengan sumber energi terbarukan lainnya, seperti mikro-turbin dan sel pemanas solar, dapat meningkatkan efisiensi konversi energi[3]. Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem hibrida dapat berfungsi secara mandiri dan mengurangi

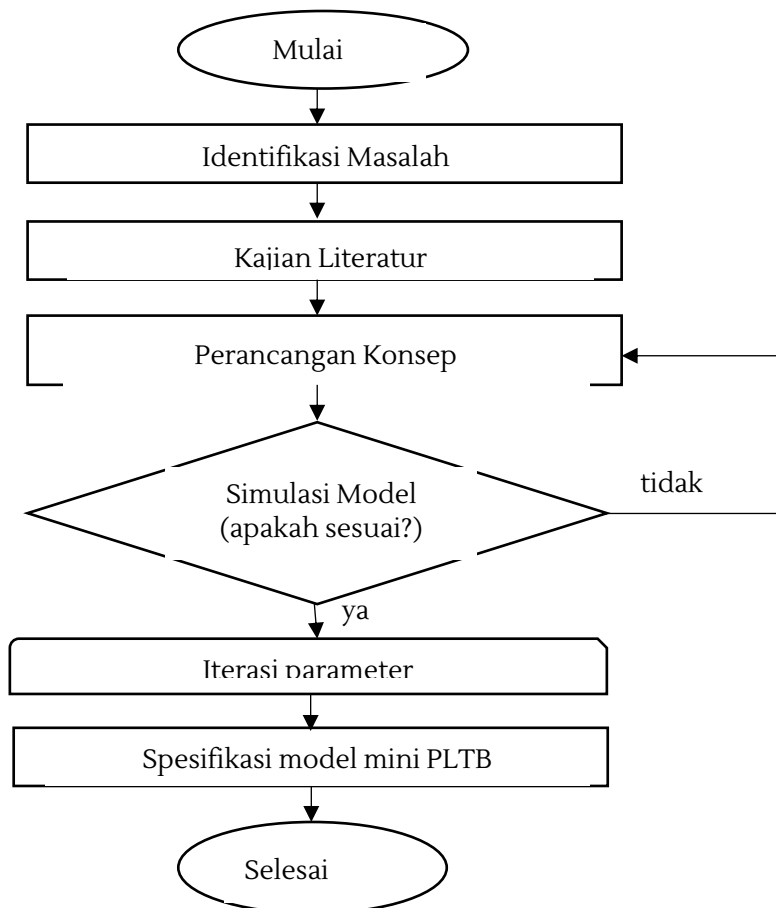
konsumsi bahan bakar, yang relevan untuk aplikasi mini turbin angin dalam skala kecil. Selain itu, Tira et al., (2023) menyoroti potensi besar energi angin di Indonesia, yang dapat dimanfaatkan melalui pengembangan turbin angin mini, mengingat kondisi geografis dan iklim yang mendukung[4]. Aspek desain juga menjadi perhatian utama dalam pengembangan mini turbin angin. Misalnya, penelitian oleh Kamal et al., (2021) tentang turbin Darrieus menunjukkan bahwa modifikasi pada bilah rotor dapat meningkatkan ekstraksi energi dari aliran fluida[5]. Ini sejalan dengan temuan dari Rismandianto et al., (2023), yang mengeksplorasi penggunaan kipas exhaust dari AC untuk turbin horizontal, menunjukkan bahwa desain yang inovatif dapat meningkatkan efisiensi dan kinerja turbin mini[6].

Lebih lanjut, Montelpare et al., (2018) melakukan studi eksperimental pada rotor Savonius yang dimodifikasi untuk sistem pencahayaan jalan, menunjukkan bahwa desain turbin yang terintegrasi dengan infrastruktur dapat memberikan solusi praktis untuk penggunaan energi angin di lingkungan perkotaan [7]. Penelitian ini menunjukkan bahwa mini turbin angin tidak hanya berfungsi sebagai sumber energi, tetapi juga dapat diintegrasikan dengan desain arsitektur yang ada. Dalam hal aplikasi, Saenz-Diez Muro et al. (2010) menekankan pentingnya pemodelan aliran angin di ruang perkotaan untuk mengoptimalkan penempatan mini turbin angin [8]. Penelitian ini menunjukkan bahwa pemahaman yang baik tentang dinamika aliran angin dapat membantu dalam memilih lokasi yang paling efektif untuk instalasi turbin, sehingga meningkatkan potensi produksi energi. Salah satu aspek penting dalam pengembangan mini turbin angin adalah desain dan performa turbin itu sendiri. Bastankhah & Porté-Agel, (2017) mengembangkan turbin miniatur yang disebut WiRE-01, yang dirancang khusus untuk eksperimen di terowongan angin[9]. Turbin ini menunjukkan kinerja yang baik dalam mengonversi energi angin menjadi energi mekanik, yang sangat relevan untuk aplikasi di perahu nelayan yang sering beroperasi di lingkungan dengan kecepatan angin yang bervariasi.

Dalam penelitian ini, perancangan pembangkit listrik tenaga angin (PLTB) skala kecil untuk perahu nelayan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Matlab Simulink. Perancangan PLTB menggunakan Simulink merupakan langkah penting dalam pengembangan sistem energi terbarukan yang efisien. Simulink, sebagai alat simulasi berbasis model, memungkinkan para insinyur untuk merancang, menganalisis, dan mengoptimalkan sistem pembangkit listrik tenaga angin dengan lebih efektif. Dalam kajian ini, akan dibahas beberapa aspek penting dalam perancangan PLTB menggunakan Simulink. Salah satu komponen utama dalam perancangan PLTB adalah generator yang digunakan. Harahap C (2024) mengusulkan desain generator sinkron magnet permanen yang diimplementasikan dalam sistem PLTB menggunakan MATLAB Simulink. Penelitian ini menunjukkan bahwa desain yang tepat dapat meningkatkan efisiensi konversi energi dari angin menjadi listrik [10]. Selain itu, penelitian oleh Fitri et al., (2022) juga menekankan pentingnya penggunaan generator Brushless DC (BLDC) dalam sistem pembangkit listrik tenaga angin, yang dapat memberikan output yang stabil dan efisien untuk penerangan [11]. Dengan menggunakan Simulink, peneliti dapat memodelkan karakteristik generator dan menganalisis kinerjanya dalam berbagai kondisi angin. Sistem kontrol juga merupakan elemen penting dalam perancangan PLTB. Darussalam et al., (2023) menyoroti perlunya stabilizer dalam sistem pembangkit listrik tenaga angin untuk memastikan pengisian baterai yang efisien, terutama dalam aplikasi kendaraan listrik [12]. Penggunaan kontrol yang cerdas dalam sistem pembangkit dapat meningkatkan kinerja dan keandalan sistem secara keseluruhan. Selain itu, penelitian oleh Hussien et al., (2020)

menunjukkan bahwa model kontrol yang baik dapat meningkatkan kualitas daya yang disuplai ke jaringan [13]. Simulink memungkinkan pengembangan dan pengujian berbagai strategi kontrol dan optimasi model untuk mengoptimalkan kinerja sistem.

METODE PENELITIAN



Gambar 1. Diagram alur penelitian

Penelitian ini menggunakan metode simulasi berbasis perangkat lunak untuk merancang dan mengevaluasi performa pembangkit listrik tenaga angin (PLTB) skala kecil yang akan diadaptasikan pada perahu nelayan. Metode penelitian ini dilakukan secara bertahap, dimulai dari identifikasi masalah, kajian literatur, perancangan model turbin angin, simulasi performa menggunakan MATLAB Simulink, serta desain struktural menggunakan Autodesk Inventor. Penelitian ini bersifat deskriptif dan eksperimental dalam ranah simulasi, di mana hasil analisis akan digunakan untuk mengoptimalkan desain turbin agar memiliki efisiensi daya yang tinggi dan stabilitas yang baik dalam lingkungan laut.

Tahapan awal dalam penelitian ini adalah identifikasi masalah, yang dilakukan dengan menganalisis kebutuhan energi listrik pada perahu nelayan serta tantangan yang dihadapi dalam penerapan energi terbarukan di sektor maritim. Selanjutnya, dilakukan kajian literatur guna memahami prinsip dasar aerodinamika turbin angin, pemilihan tipe

generator, serta sistem kontrol yang dapat meningkatkan efisiensi daya. Setelah kajian literatur, penelitian memasuki tahap perancangan model turbin angin, yang mencakup penentuan spesifikasi teknis seperti jenis turbin, diameter rotor, jumlah bilah, serta tipe generator yang digunakan. Perancangan awal dilakukan dengan mempertimbangkan efisiensi aerodinamika serta ketahanan struktural terhadap kondisi laut. Model turbin yang telah dirancang kemudian disimulasikan dalam MATLAB Simulink untuk mengevaluasi performa daya yang dihasilkan dalam berbagai kondisi kecepatan angin. Simulasi ini bertujuan untuk mengukur efisiensi konversi energi angin menjadi listrik serta kestabilan sistem dalam kondisi angin yang fluktuatif.

Potensi kecepatan angin di perahu nelayan Indonesia menurut BMKG rata-rata sebesar 15 knot atau 7,7 meter per detik [14] sehingga memberikan peluang besar untuk memanfaatkan energi angin sebagai sumber listrik. Mini turbin angin yang terpasang di perahu dirancang untuk menghasilkan listrik dengan efisiensi tinggi bahkan pada kecepatan angin rendah. Desainnya yang kompak dan portabel memungkinkan turbin ini mudah dipasang dan digunakan tanpa memerlukan infrastruktur tambahan. Dengan material yang tahan korosi dan struktur yang ringan, mini turbin angin mampu menghadapi kondisi lingkungan pesisir yang keras, seperti paparan air laut dan angin kencang.

a) Desain model PLTB

Untuk merancang model PLTB di MATLAB Simulink terlebih dahulu mencari nilai C_p (koefisien daya), λ (*tip-speed ratio*), dan β (sudut pitch bilah). Secara umum, nilai λ ideal untuk turbin angin tiga bilah adalah sekitar 7, ketika kecepatan angin yang masuk berada dalam rentang 6 hingga 12 meter per detik [15]. Kemudian, nilai C_p kira-kira 0,39 berdasarkan persamaan (4), dengan nilai β sebesar 0, jika kita mengambil koefisien daya maksimum[16].

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

Persamaan (1) merepresentasikan daya mekanik P_m yang dihasilkan oleh sebuah turbin angin berdasarkan parameter aerodinamika dan kondisi lingkungan. Persamaan ini menunjukkan bahwa daya mekanik yang dihasilkan berbanding lurus dengan kerapatan udara ρ , luas daerah sapuan rotor $\pi \times R^2$, dan kecepatan angin V^3 . Faktor $C_p(\lambda, \beta)$ merupakan koefisien daya yang bergantung pada rasio kecepatan ujung bilah terhadap kecepatan angin λ serta sudut pitch bilah β , yang menentukan efisiensi konversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik. Konstanta $\frac{1}{2}$ muncul akibat prinsip dasar mekanika fluida yang digunakan dalam analisis daya yang dapat diekstraksi dari aliran udara melalui rotor turbin. Persamaan ini menjadi dasar dalam analisis kinerja turbin angin untuk mengoptimalkan desain dan operasional sistem pembangkit listrik tenaga angin[17].

$$\lambda = \frac{\omega \times R}{V} \dots\dots\dots(2)$$

Persamaan (2) mendefinisikan rasio kecepatan ujung bilah atau *Tip Speed Ratio* (TSR), yang dinotasikan sebagai λ . TSR merupakan parameter penting dalam analisis aerodinamika turbin angin, yang dihitung sebagai perbandingan antara kecepatan linear ujung bilah $\omega \times R$ dengan kecepatan angin V . Di sini, ω adalah kecepatan sudut rotasi rotor,

dan R adalah jari-jari rotor. Nilai λ menentukan efisiensi turbin dalam menangkap energi angin, di mana TSR yang optimal bergantung pada desain bilah dan jumlah sudut serang yang dihasilkan. Jika λ terlalu tinggi, bilah dapat mengalami stall aerodinamis, sementara TSR yang terlalu rendah menyebabkan turbin kurang efisien dalam mengekstraksi energi angin[17].

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \dots \dots \dots (3)$$

Persamaan (3) menyatakan hubungan antara faktor modifikasi kecepatan spesifik bilah λ_i dengan tip speed ratio λ dan sudut pitch bilah β . Persamaan ini digunakan dalam perhitungan aerodinamika turbin angin untuk memperhitungkan efek koreksi dari sudut pitch terhadap kecepatan relatif aliran udara yang diterima bilah. Koreksi ini mencerminkan bahwa semakin besar sudut pitch β , semakin besar pengaruhnya dalam menurunkan nilai efektif λ_i , sebagaimana ditunjukkan oleh suku $\frac{0.035}{1 + \beta^3}$. Dengan demikian, persamaan ini penting dalam optimasi desain turbin angin guna memastikan efisiensi konversi energi angin ke dalam daya mekanik yang maksimal[17].

$$C_p = 0.5176 \times \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \times e^{-\left(\frac{21}{\lambda_i} \right)} \quad (4)$$

Persamaan (4) merepresentasikan koefisien daya C_p , yang menunjukkan efisiensi turbin angin dalam mengonversi energi kinetik angin menjadi daya mekanik. Nilai C_p bergantung pada rasio kecepatan spesifik bilah λ_i dan sudut pitch β . Persamaan ini menunjukkan bahwa C_p meningkat dengan nilai optimal λ_i dan dipengaruhi oleh faktor eksponensial yang mencerminkan penurunan efisiensi pada kecepatan bilah tertentu. Parameter konstanta seperti 0.5176 dan eksponen $\left(\frac{21}{\lambda_i} \right)$ diperoleh dari eksperimen dan model empiris untuk memaksimalkan daya yang dapat diambil dari angin [16]. Oleh karena itu, persamaan ini digunakan dalam desain dan optimasi turbin angin untuk menentukan parameter operasi yang optimal[17].

$$P_m = T \times \omega \dots \dots \dots (5)$$

Persamaan (5) menyatakan hubungan antara daya mekanik P_m yang dihasilkan oleh turbin angin dengan torsi T dan kecepatan sudut rotasi rotor ω . Persamaan ini merupakan bentuk dasar dari perhitungan daya dalam sistem rotasi, di mana daya dihitung sebagai hasil perkalian antara gaya rotasi (torsi) dan laju perputaran rotor. Dalam konteks turbin angin, nilai T dipengaruhi oleh gaya angin yang bekerja pada bilah turbin, sedangkan ω bergantung pada kecepatan rotasi turbin dalam merespons kondisi angin. Persamaan ini menjadi dasar dalam analisis kinerja mekanis turbin untuk menentukan efisiensi transfer energi dari angin ke sistem mekanik[17].

b) Kebutuhan listrik perahu nelayan

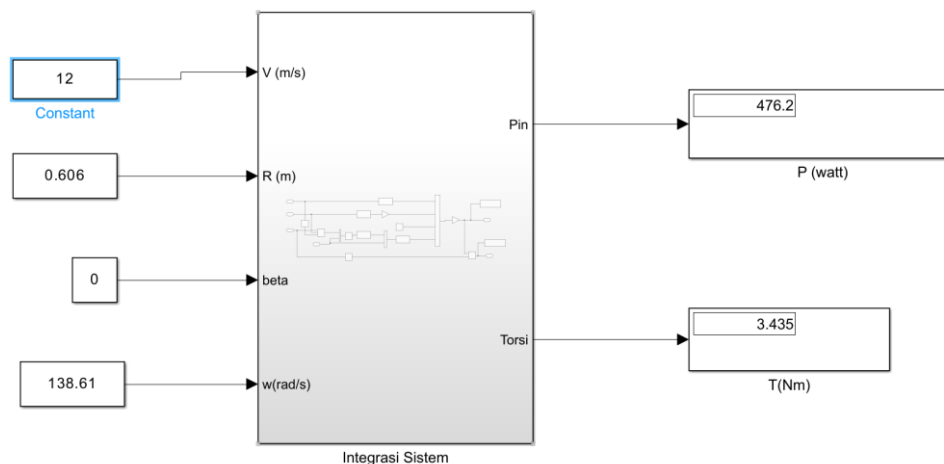
Kebutuhan listrik nelayan tidak terlalu besar yaitu untuk lampu penerangan dan pengecasan HP. Berdasarkan kebutuhan tersebut, direncanakan sistem PLTB yang relevan dengan kebutuhan yang sedikit yaitu mini PLTB. PLTB yang dirancang untuk menghasilkan daya mekanik dari turbin angin P_m sebesar 100 Watt.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem integrasi untuk simulasi turbin angin menunjukkan berbagai parameter masukan yang digunakan untuk menghitung daya keluaran P_m dan torsi T. Parameter masukan utama dalam sistem ini meliputi kecepatan angin rata-rata V sebesar 7,7 m/s, jari-jari turbin angin R (panjang bilah turbin angin) sebesar 0.606 m, sudut pitch β sebesar 0° , dan kecepatan sudut ω sebesar 88,94 rad/s. Sudut pitch bilah turbin angin ($\beta = 0^\circ$) digunakan untuk mengoptimalkan efisiensi konversi energi angin ke daya mekanik, mensimulasikan kondisi operasi ideal, dan memungkinkan analisis efek variabel lain tanpa intervensi mekanisme *pitch control*. Dengan nilai-nilai ini, sistem menghitung daya mekanik yang dihasilkan serta torsi yang bekerja pada rotor berdasarkan prinsip aerodinamika turbin angin.

Dari hasil simulasi, daya mekanik P_m yang diperoleh adalah 125,8 watt pada kecepatan angin rata-rata, yang menunjukkan jumlah energi yang dapat dikonversi oleh turbin dari energi kinetik angin menjadi energi mekanik. Selain itu, torsi maksimal yang dihasilkan T adalah 476,2 Nm, yang merupakan gaya rotasi yang bekerja pada poros rotor akibat interaksi bilah dengan angin. Nilai-nilai ini menunjukkan efisiensi sistem dalam menangkap dan mengonversi energi angin berdasarkan parameter desain turbin yang diberikan.

Model ini dapat digunakan untuk menganalisis pengaruh berbagai parameter terhadap efisiensi turbin, seperti perubahan kecepatan angin, sudut pitch bilah, dan kecepatan rotasi rotor. Dengan menggunakan pendekatan berbasis simulasi, desain optimal turbin angin dapat ditentukan untuk kondisi operasional tertentu, sehingga meningkatkan kinerja konversi energi dan memaksimalkan daya yang dapat diekstraksi dari sumber energi angin.

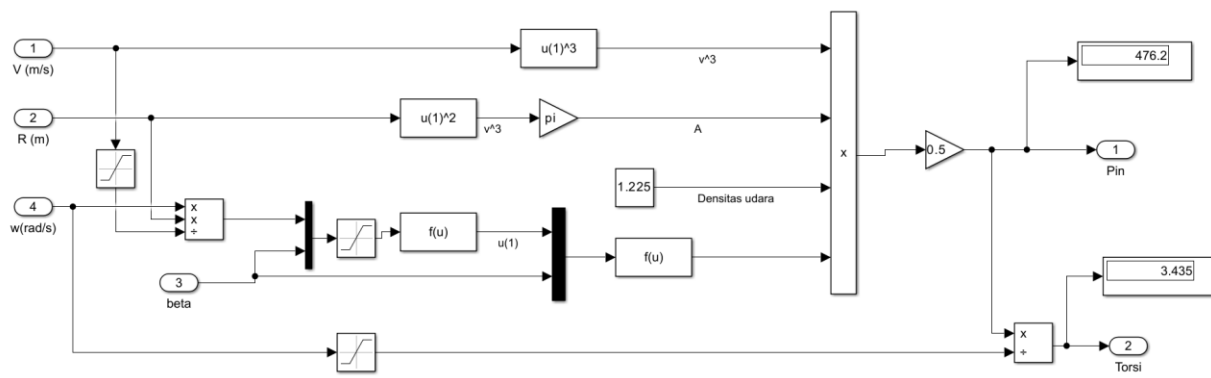


Gambar 2. Sistem Integrasi Model

Diagram blok ini menunjukkan alur perhitungan daya mekanik P_m dan torsi T dalam sistem turbin angin berbasis model matematika. Parameter utama yang digunakan dalam simulasi meliputi kecepatan angin V , panjang bilah turbin R , sudut pitch bilah β , dan kecepatan sudut turbin angin ω . Dalam model ini, daya mekanik dihitung berdasarkan persamaan aerodinamika turbin angin yang mempertimbangkan luas sapuan rotor, densitas udara, dan koefisien daya C_p , yang merupakan fungsi dari *tip speed ratio* λ dan sudut pitch bilah β .

Kecepatan angin V digunakan dalam perhitungan volume aliran udara yang melewati rotor, dengan faktor V^3 yang menunjukkan hubungan eksponensial antara kecepatan angin dan daya yang dapat diekstraksi. Panjang bilah R digunakan untuk menghitung luas penampang serangan angin, yang dikalikan dengan densitas udara ($\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$) untuk menentukan jumlah energi kinetik yang tersedia. Selain itu, sudut pitch bilah β digunakan dalam perhitungan fungsi aerodinamika yang mempengaruhi efisiensi daya yang dihasilkan.

Koefisien daya C_p , dihitung berdasarkan fungsi dari rasio kecepatan ujung bilah λ dan sudut pitch β , yang kemudian dikalikan dengan faktor $\frac{1}{2} \rho A V^3$ untuk mendapatkan daya mekanik turbin. Output daya mekanik ini kemudian dikonversi menjadi torsi T dengan membagi daya mekanik dengan kecepatan sudut rotor. Dalam model ini, nilai C_p ditentukan menggunakan pendekatan empiris untuk memastikan hasil simulasi sesuai dengan karakteristik aerodinamika turbin angin.



Gambar 3. Model MATLAB Simulink sistem terancang

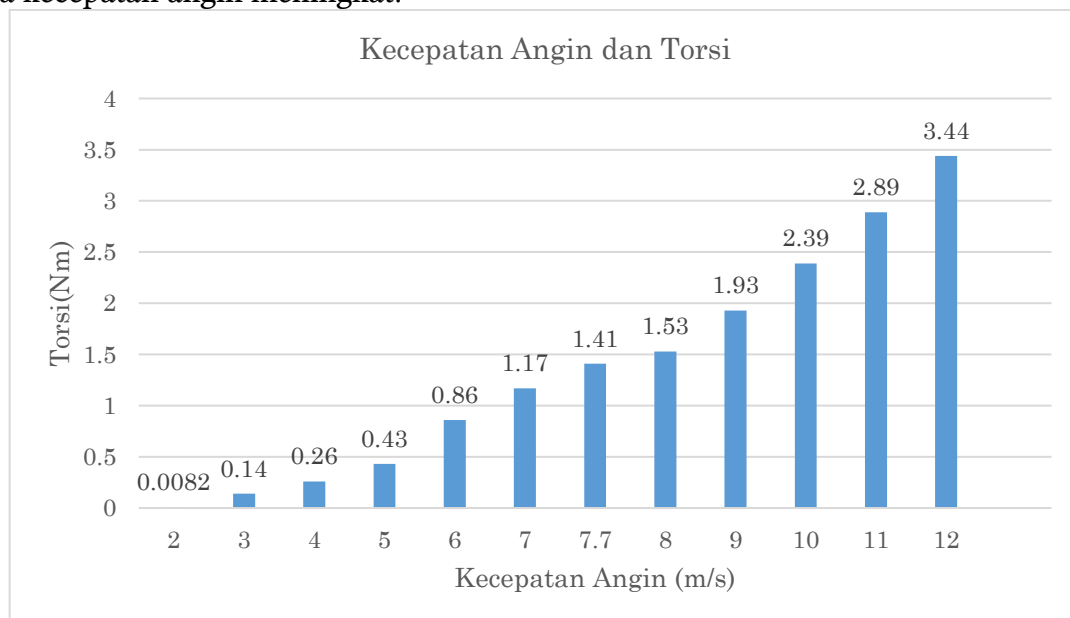
Model MATLAB Simulink sistem terancang dijalankan dalam berbagai kondisi angin dari 2 m/s – 5 m/s (uji coba kecepatan putaran sudut rotor) dan 6 m/s – 12 m/s (iterasi kecepatan putaran sudut rotor) dengan kecepatan referensi berdasarkan kecepatan angin rata-rata yaitu 7,7 m/s[14]. Ukuran panjang bilah turbin tetap yaitu 0,606 meter dan kecepatan putaran sudut rotor bervariasi mengikuti formula $\lambda = \frac{\omega x R}{V}$ dan hasil uji coba oleh Kusnadi dan Ismail (2023). Hasil simulasi dengan parameter tersebut dijalankan pada model yang terancang dan menghasilkan berbagai kondisi serta variasi besar torsi dan daya listrik yang diproduksi (Tabel 1).

Tabel 1. Hasil simulasi model MATLAB Simulink

Kecepatan Angin (m/s)	R (m)	ω (rad/s)[16], [18]	Torsi (Nm)	P_m (watt)
2		8,69	0,0082	0,071
3		22,39	0,14	3,18
4		30,46	0,26	8
5		39,15	0,43	16,96

6	0,606	69,31	0,86	59,52
7		80,86	1,17	94,52
7,7		88,94	1,41	125,8
8		92,41	1,53	141,1
9		103,96	1,93	200,9
10		115,51	2,39	275,76
11		127,06	2,89	366,8
12		138,61	3,44	476,2

Grafik pertama (Gambar 4) menunjukkan hubungan antara kecepatan angin (m/s) dan torsi (Nm) yang dihasilkan oleh turbin angin. Dari grafik tersebut, terlihat bahwa semakin tinggi kecepatan angin, semakin besar pula torsi yang dihasilkan, dengan pertumbuhan yang cenderung eksponensial setelah kecepatan angin mencapai sekitar 7 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa turbin angin semakin efisien dalam menghasilkan torsi ketika kecepatan angin meningkat.



Gambar 4. Hubungan antara kecepatan angin dan torsi

Sementara itu, grafik kedua (Gambar 5) menggambarkan hubungan antara kecepatan angin dan daya mekanik yang dihasilkan dalam satuan watt. Grafik ini memperlihatkan tren kenaikan yang lebih tajam dibandingkan grafik torsi, menunjukkan bahwa daya mekanik meningkat signifikan seiring bertambahnya kecepatan angin. Kenaikan daya ini sesuai dengan teori bahwa daya mekanik berbanding lurus dengan torsi dan kecepatan sudut, sehingga semakin besar torsi yang dihasilkan pada kecepatan angin yang lebih tinggi, maka daya mekanik juga akan meningkat secara drastis.



Gambar 5. Hubungan antara kecepatan angin dan daya mekanik

Berdasarkan parameter pada kecepatan angin rata-rata 7,7 m/s, torsi maksimal sebesar 3,44 Nm dan daya mekanik sebesar 125,8 Watt. Untuk memastikan sistem konversi energi ini bekerja secara optimal, kode MATLAB yang dikembangkan menghitung berbagai parameter desain utama, termasuk diameter poros turbin, diameter pulley turbin, diameter pulley generator, panjang belt, serta spesifikasi umum generator yang direkomendasikan. Perhitungan dimulai dengan menentukan diameter poros turbin menggunakan rumus analitis persamaan (6), dengan asumsi material poros berupa baja dengan tegangan luluh $S_y = 250$ MPa dan faktor keamanan sebesar $S_f = 3$. Perhitungan ini bertujuan untuk memastikan bahwa poros mampu menahan torsi yang bekerja tanpa mengalami deformasi atau kegagalan struktural, sehingga menjamin durabilitas dan keandalan sistem dalam jangka panjang.

$$D_{\text{Poros turbin}} = \frac{16 \times T_{\text{torsi turbin}}}{(\pi \times \frac{S_y}{S_f})^{\frac{1}{3}}} \dots\dots\dots(6)$$

Selanjutnya, perancangan sistem transmisi daya dilakukan dengan menentukan ukuran pulley yang digunakan pada turbin dan generator. Kecepatan putaran turbin pada kecepatan angin rata-rata sebesar 88,94 rad/s dikonversi menjadi rotasi per menit (RPM), kemudian dibandingkan dengan kecepatan rotasi generator yang ditetapkan pada 1500 RPM[19]. Berdasarkan prinsip perbandingan kecepatan sudut, rasio antara kecepatan generator dan turbin dihitung untuk menentukan diameter *pulley generator* dengan persamaan (7) Diameter *pulley turbin* diambil sebagai referensi sebesar 70 mm. Perhitungan ini memastikan bahwa generator beroperasi dalam rentang kecepatan optimal tanpa kehilangan efisiensi mekanis akibat ketidaksesuaian ukuran pulley, sehingga memungkinkan transfer daya yang efisien dari turbin ke generator[17].

$$D_{\text{Poros turbin}} = \frac{D_{\text{pulley turbin}}}{\text{Ratio}} \dots\dots\dots(7)$$

Selain itu, sistem transmisi daya dilengkapi dengan mekanisme *belt drive*, yang panjangnya dihitung menggunakan formula standar untuk dua pulley dengan jarak sumbu 150 mm. Belt ini berfungsi untuk mentransfer daya mekanik dari turbin ke generator dengan meminimalkan kehilangan energi akibat slip atau tegangan berlebih. Dengan asumsi efisiensi generator sebesar 81%[19], kode MATLAB juga menghitung torsi yang bekerja pada poros generator menggunakan rumus persamaan (8), yang memastikan bahwa daya listrik yang dihasilkan sesuai dengan spesifikasi yang diharapkan. Pada tahap akhir, kode mencetak spesifikasi lengkap sistem, mencakup diameter poros, ukuran pulley, panjang belt, serta parameter daya dan torsi generator, yang secara keseluruhan memberikan rekomendasi desain yang optimal untuk memastikan PLTB skala kecil ini dapat bekerja secara efisien, andal, dan sesuai dengan standar rekayasa energi terbarukan.

$$T_{Generator} = \frac{60 \times P_m}{2 \times \pi \times RPM} \dots\dots\dots(8)$$

Tabel 2. Spesifikasi sistem mini PLTB

Spesifikasi	Ukuran
Diameter poros turbin	6 mm
Diameter pulley turbin	70 mm
Diameter pulley generator	39,63 mm
Panjang <i>belt drive</i>	473,75 mm
Daya listrik	101,9 watt
Kecepatan putaran generator	1500 RPM
Type generator	BLDC
Ukuran sistem penyimpanan listrik	12 AH

Dengan mempertimbangkan seluruh parameter desain yang telah dihitung, PLTB skala kecil ini dirancang untuk beroperasi dengan efisiensi tinggi dalam mengkonversi energi kinetik angin menjadi energi listrik yang dapat dimanfaatkan. Perancangan yang mencakup dimensi poros, ukuran pulley, panjang belt, serta spesifikasi generator memastikan bahwa sistem mampu bekerja secara optimal dengan torsi dan kecepatan rotasi yang sesuai untuk menghasilkan daya listrik sebesar 101,9 Watt. Dengan pendekatan berbasis analisis numerik dan teknik rekayasa mekanikal yang diterapkan dalam kode MATLAB, perancangan ini tidak hanya mempertimbangkan efisiensi energi tetapi juga aspek keandalan mekanik guna meminimalkan potensi kegagalan struktural. Implementasi desain ini dapat menjadi referensi dalam pengembangan turbin angin berukuran kecil untuk keperluan energi terbarukan di daerah dengan kecepatan angin moderat, serta dapat dikembangkan lebih lanjut dengan optimalisasi material dan konfigurasi sistem transmisi daya guna meningkatkan kinerja secara keseluruhan.

KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil merancang dan mensimulasikan model mini Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB) yang dapat diterapkan pada perahu nelayan sebagai solusi energi terbarukan. dari Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kecepatan angin rata-rata 7,7 m/s, sistem mampu menghasilkan daya mekanik sebesar 125,8Watt dengan torsi 1,41 Nm. Pemilihan ukuran diameter poros turbin 6 mm dari baja paduan yang tahan dengan torsi maksimal sistem PLTB. Diameter *pulley* sisi turbin sebesar 70 mm

dan *pulley* sisi generator sebesar 39,63 mm serta panjang *belt drive* 473,75 mm. Spesifikasi generator secara umum kecepatan putaran 1500 RPM dan *power rating* 101,9Watt dengan efisiensi 81% pada kecepatan angin rata-rata sistem terancang. Keunggulan utama sistem ini adalah kemampuannya dalam menyediakan sumber energi yang stabil bagi nelayan dengan desain yang kompak dan dapat beroperasi dalam kondisi lingkungan laut yang dinamis. Namun, terdapat beberapa keterbatasan, seperti efisiensi yang masih perlu ditingkatkan pada kecepatan angin rendah dan perlunya optimasi lebih lanjut dalam pemilihan material bilah turbin untuk meningkatkan daya tahan terhadap kondisi pesisir yang korosif. Oleh karena itu, pengembangan lebih lanjut dapat difokuskan pada peningkatan efisiensi aerodinamika turbin, integrasi dengan sistem penyimpanan energi yang lebih baik, serta eksplorasi kombinasi dengan sumber energi terbarukan lainnya guna meningkatkan keandalan sistem dalam jangka panjang. Implementasi sistem ini diharapkan dapat mendukung transisi energi berkelanjutan bagi komunitas nelayan, mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, serta memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan yang lebih luas.

DAFTAR REFERENSI

- [1] A. T. Wardhana, A. Taqwa, and T. Dewi, "Design of Mini Horizontal Wind Turbine for Low Wind Speed Area," *J Phys Conf Ser*, vol. 1167, p. 012022, Feb. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1167/1/012022.
- [2] M. F. Hairani and S. A. Jumaat, "Development of Double Mini Windmill with Smart Monitoring System," *Journal of Electronic Voltage and Application*, vol. 3, no. 2, Dec. 2022, doi: 10.30880/jeva.2022.03.02.006.
- [3] M. Abdel-Geliel, I. F. Zidane, M. Anany, and S. F. Rezek, "Modeling and simulation of a hybrid power generation system of wind turbine, micro-turbine and solar heater cells," in *11th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA)*, IEEE, Jun. 2014, pp. 1304–1309. doi: 10.1109/ICCA.2014.6871112.
- [4] H. S. Tira, D. Maulidin, and N. Nurchayati, "Numerical Study of Taper Type Turbine Blade at a 5° Angle," *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*, vol. 41, no. 1, p. 32, Oct. 2023, doi: 10.52155/ijpsat.v41.1.5646.
- [5] M. Kamal, F. Arifin, and Rusdianasari, "Analysis of the Performance of The Four-Blade Darrieus Wind Turbine at the Jamik Bukit Asam Mosque Complex Tanjung Enim South Sumatra," *International Journal of Research in Vocational Studies (IJRVOCAS)*, vol. 1, no. 2, pp. 45–51, Sep. 2021, doi: 10.53893/ijrvocas.v1i2.52.
- [6] R. Rismandianto, RD Kusumanto, and R. Carlos, "Utilization of Exhaust Fan from Air Conditioner for Horizontal Axis Wind Turbine with Differences in the Number of Blades," *Journal of Mechanical, Civil and Industrial Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 01–06, Jul. 2023, doi: 10.32996/jmcie.2023.4.3.1.
- [7] S. Montelpare, V. D'Alessandro, A. Zoppi, and R. Ricci, "Experimental study on a modified Savonius wind rotor for street lighting systems. Analysis of external appendages and elements," *Energy*, vol. 144, pp. 146–158, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2017.12.017.
- [8] J. C. Sáenz-Díez Muro, E. Jiménez Macías, J. M. Blanco Barrero, and M. Pérez de la Parte, "Two-Dimensional Model of Wind Flow on Buildings to Optimize the Implementation of Mini Wind Turbines in Urban Spaces," *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1, no. 08, pp. 1380–1385, Apr. 2010, doi: 10.24084/repqj08.671.

- [9] M. Bastankhah and F. Porté-Agel, "A New Miniature Wind Turbine for Wind Tunnel Experiments. Part I: Design and Performance," *Energies (Basel)*, vol. 10, no. 7, p. 908, Jul. 2017, doi: 10.3390/en10070908.
- [10] C. R. Harahap, "Aplikasi Perancangan Generator Sinkron Magnet Permanen Menggunakan Matlab Simulink," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 12, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i1.3916.
- [11] S. Nur Fitri, F. Azis, H. A. N. Muhammad, R. Rusli, and R. N. Hidayat, "Rancang Bangun Turbin Angin Sumbu Horizontal Dengan Generator BLDC Sebagai Sistem Penerangan," *Joule (Journal of Electrical Engineering)*, vol. 3, no. 2, pp. 174–179, Aug. 2022, doi: 10.61141/joule.v3i2.322.
- [12] A. Darussalam, A. Sunardi, and R. Ariyansah, "Perancangan Stabilizer Pembangkit Listrik Tenaga Angin Untuk Pengisian Baterai Mobil," *Journal Teknik Mesin, Elektro, Informatika, Kelautan dan Sains*, vol. 3, no. 1, pp. 1–9, Jun. 2023, doi: 10.30598/metiks.2023.3.1.1-9.
- [13] S. A. Hussien, M. A. Deab, and N. S. Hosny, "Improving the delivered power quality from WECS to the grid based on PMSG control model," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 10, no. 6, p. 6349, Dec. 2020, doi: 10.11591/ijece.v10i6.pp6349-6360.
- [14] "Pusat Meteorologi Maritim | BMKG." Accessed: Jan. 06, 2025. [Online]. Available: <https://maritim.bmkg.go.id/info/37/Saran-Keselamatan-Berlayar>
- [15] Thunder Said Energy, "How is the power of a wind turbine calculated? - Thunder Said." Accessed: Feb. 13, 2025. [Online]. Available: <https://thundersaidenergy.com/downloads/wind-power-impacts-of-larger-turbines/>
- [16] H. Slah, D. Mehdi, and S. Lassaad, "Advanced Control of a PMSG Wind Turbine," *International Journal of Modern Nonlinear Theory and Application*, vol. 05, no. 01, pp. 1–10, 2016, doi: 10.4236/ijmnta.2016.51001.
- [17] Prmod Jain, *Wind Energy Engineering*, 1st edition. New York: McGraw-Hil, 2011. [Online]. Available: www.EngineeringBooksPdf.com
- [18] Kusnadi and Ismail, "Eksperimental Turbin Zephyr dengan Pengaruh Sudu Rotor dan Sudu Statis," *Rotasi*, vol. 25, pp. 33–39, Jul. 2023, Accessed: Feb. 16, 2025. [Online]. Available: <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/rotasi/article/download/58171/24528>
- [19] C. D. Wicaksono and Y. A. Prabowo, "Analisa dan Pemodelan Generator DC Sinkron Daya Rendah," *Power Elektronik : Jurnal Orang Elektro*, vol. 11, no. 2, p. 271, Jul. 2022, doi: 10.30591/polektro.v12i1.3738.