

Desain dan Analisis Turbin Angin sebagai Penggerak Kompresor Aerasi Tambak Udang guna Mendukung Energi Berkelanjutan

Kasturi^{1*}, Sujono¹, Desy Kurnia Puspaningrum²

¹Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Blora, Indonesia

²Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Minyak dan Gas Bumi, Blora, Indonesia

INFORMASI NASKAH

Diterima : 14 Oktober 2025

Direvisi : 24 November 2025

Disetujui : 24 November 2025

Terbit : 25 November 2025

Email korespondensi:

jono1166@gmail.com

Laman daring:

<https://doi.org/10.37525/mz/2025-2/1587>

ABSTRAK

Budidaya udang merupakan salah satu sektor perikanan yang berperan penting dalam ketahanan pangan dan ekonomi pesisir. Namun, sistem aerasi yang umum digunakan masih bergantung pada energi listrik dan bahan bakar fosil, sehingga menimbulkan biaya operasional tinggi dan emisi karbon. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menganalisis kinerja turbin angin vertikal sebagai penggerak kompresor aerasi tambak udang, guna mendukung penerapan energi berkelanjutan. Proses penelitian meliputi tahap perancangan sistem, perakitan, serta pengujian performa turbin pada variasi kecepatan angin antara 2,2–4,3 m/s. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa untuk daya desain 4000 W dengan kecepatan angin maksimum 4,3 m/s, diperoleh luas sudut sebesar 81,8 m² dan diameter rotor 1 m. Pengujian menunjukkan peningkatan daya aktual turbin dari 535,7 Watt hingga 4000 Watt seiring dengan kenaikan kecepatan angin, dengan nilai Tip Speed Ratio (TSR) stabil pada kisaran 0,333–0,341. Sistem mampu menghasilkan suplai oksigen sebesar 0,002–0,005 m³/s dengan waktu pemenuhan kebutuhan oksigen di kolam (900 kg) berkisar antara 37–75 jam, bergantung pada kondisi kecepatan angin. Hasil ini menunjukkan bahwa turbin angin vertikal berpotensi besar menggantikan sistem aerasi berbasis listrik, sehingga dapat menurunkan konsumsi energi fosil dan mendukung efisiensi serta keberlanjutan tambak udang.

Kata kunci: Aerasi tambak udang, Energi terbarukan, Kompresor, Turbin angin

ABSTRACT

Shrimp farming is one of the key fisheries sectors that plays an important role in food security and coastal economies. However, conventional aeration systems still rely on electrical energy and fossil fuels, resulting in high operational costs and carbon emissions. This study aims to design and analyze the performance of a vertical wind turbine as a compressor driver for shrimp pond aeration, to support the implementation of sustainable energy. The research process includes system design, assembly, and performance testing of the turbine at varying wind speeds between 2.2–4.3 m/s. The calculation results show that for a design power of 4000 W at a maximum wind speed of 4.3 m/s, the blade area obtained is 81.8 m² with a rotor diameter of 1 m. The testing results indicate an increase in actual power turbine output from 535.7 W to 4000 W with rising wind speed, with the Tip Speed Ratio (TSR) remaining stable in the range of 0.333–0.341. The system is capable of producing an oxygen supply of 0.002–0.005 m³/s, with the oxygen fulfillment time in the pond (900 kg) ranging from 37 to 75 hours, depending on wind speed conditions. These results demonstrate that the vertical wind turbine has great potential to replace electricity-based aeration systems, thereby reducing fossil energy consumption and supporting efficiency and sustainability in shrimp farming.

Keywords : Shrimp pond aeration, Renewable energy, Compressor, Wind turbine

PENDAHULUAN

Budidaya udang merupakan salah satu sektor perikanan yang berkembang pesat dan berkontribusi besar terhadap ketahanan pangan serta perekonomian, khususnya di wilayah pesisir. Namun, sistem aerasi pada tambak udang umumnya masih mengandalkan energi listrik atau bahan bakar fosil, yang menyebabkan biaya operasional tinggi dan emisi gas rumah kaca (Mustafa et al., 2021). Selain itu, tingkat adopsi energi terbarukan pada sistem aerasi tambak masih tergolong rendah, terutama pada tambak skala kecil dan menengah, akibat keterbatasan pengetahuan teknologi dan kurangnya desain sistem yang sesuai kondisi lapangan (Nugraha et al., 2025). Kebutuhan akan solusi energi yang ramah lingkungan dan efisien mendorong pemanfaatan energi terbarukan, seperti energi angin, untuk menggerakkan sistem aerasi tambak udang.

Penelitian-penelitian sebelumnya telah membuktikan bahwa turbin angin, baik tipe vertikal maupun horizontal, dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan kompresor aerasi pada tambak udang. Sistem ini mampu mengubah energi angin menjadi energi mekanik atau listrik yang dibutuhkan untuk menjaga kadar oksigen terlarut (DO) pada level optimal bagi pertumbuhan udang. Misalnya, penggunaan turbin angin tipe Savonius dengan variasi jumlah sudu terbukti

memengaruhi efisiensi dan daya keluaran turbin, yang sangat penting untuk aplikasi aerasi (Zulfikar, 2019). Temuan serupa diperkuat oleh studi terbaru mengenai turbin angin vertikal skala kecil berbasis Savonius–Darrieus hibrida yang menunjukkan peningkatan koefisien daya dan kestabilan putaran, sehingga cocok untuk aplikasi penggerak kompresor berkecepatan rendah (Nensy et al., 2024). Selain itu, sistem aerasi berbasis angin dapat menurunkan konsumsi listrik hingga 23% per unit turbin, dengan hasil DO di atas 4 ppm, sesuai standar budidaya udang (Jamil et al., 2022).

Dari sisi ekonomi, sistem energi angin mampu menekan biaya operasional dibandingkan dengan generator diesel, serta menawarkan masa balik modal yang lebih singkat, terutama di daerah dengan potensi angin yang baik (Sumarjo et al., 2022). Integrasi sistem hibrida angin-surya juga telah dikembangkan untuk meningkatkan keandalan dan keberlanjutan energi pada tambak udang (Sabilu et al., 2024).

Meskipun berbagai penelitian tersebut menunjukkan potensi energi angin untuk aerasi tambak, sebagian besar kajian masih berfokus pada analisis kelayakan umum, uji performa dasar, atau efisiensi ekonomi pemanfaatan turbin angin. Kesenjangan penelitian yang masih muncul ialah minimnya studi yang secara spesifik membahas desain rinci, penyesuaian parameter geometris, serta analisis performa turbin angin skala kecil

yang benar-benar dioptimalkan untuk kebutuhan penggerak kompresor aerasi pada lingkungan tambak udang, yang memiliki karakteristik beban, kecepatan putar, dan kondisi angin yang berbeda dari aplikasi pembangkit listrik biasa. Oleh karena itu, penelitian ini menitikberatkan pada desain detail dan analisis performa turbin angin yang diadaptasi khusus untuk sistem kompresor aerasi, guna mendukung penerapan energi berkelanjutan pada tambak udang.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini memiliki tiga tahapan utama yaitu tahap perencanaan desain sistem, perakitan sistem turbin angin dan perhitungan analisa performa sistem.

A. Perencanaan Desain Sistem

Perencanaan desain sistem terdiri dari perhitungan desain komponen utama turbin angin dan penentuan spesifikasi perlengkapan pendukung sistem turbin angin untuk penggerak kompresor aerasi. Perhitungan komponen utama dimulai dari perhitungan dimensi rotor terdiri dari perhitungan besarnya total luasan sudu (A) yang dibutuhkan untuk memindahkan daya yang direncanakan (P) dan perhitungan diameter lengkungan sudu. Perhitungan luas total sudu yang dibutuhkan menggunakan persamaan (1) berikut ini (Zehra et al., 2021).

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

Dimana secara berturut-turut Pt , r , A dan V , Masing-masing adalah Daya desain Turbin (Watt), massa jenis udara (kgf/m^3), Luas total penampang sudu (m^2) dan Kecepatan angin (m/s).

Selanjutnya dihitung diameter lengkungan sudu dengan persamaan (2) sebagai berikut.

$$A = n \times 1/2 \times \pi \times D \times l \quad (2)$$

Dimana secara berturut-turut A , n , D dan l , masing-masing adalah luas total penampang sudu (m^2), jumlah sudu, diameter lengkungan sudu (m) dan tinggi sudu (m). Material yang digunakan untuk membuat sudu turbin adalah Alumunium 5052, karena ringan dan tahan korosi cocok untuk

lingkungan pesisir. Sedangkan untuk torsi yang dihasilkan dari putaran desain turbin, dihitung dengan persamaan (3) sebagai berikut. (Zhou et al., 2024).

$$T = \frac{Pt \times 60}{2 \times \pi \times N} \quad (3)$$

Dimana secara berturut-turut T , Pt dan N , masing-masing adalah Torsi (Nm), Daya desain (Watt) dan Putaran desain (RPM).

Desain dimensi poros penumpu bantalan dihitung dengan persamaan (4) sebagai berikut. (Pasha & Devi, 2023).

$$d = \sqrt{\frac{16 \times T_c}{\pi \times \tau}} \quad (4)$$

Dimana secara berturut-turut D , T_c dan τ , masing-masing adalah diameter poros turbin angin (mm), momen puntir (N.mm) dan tegangan geser ijin material poros (N/mm^2). Material poros digunakan baja karbon S45C.

Komponen utama sistem turbin angin yang berupa kompresor dan gear box dipilih serta ditentukan spesifikasinya. kompresor yang berfungsi untuk menghasilkan udara bertekanan dipilih jenis kompresor torak dengan spesifikasi diantaranya, Daya kompresor 2.8 Kw, Tekanan kerja 8 bar, putaran 540 RPM dan kapasitas 250 liter per menit.

Sedangkan untuk komponen gear box yang berfungsi meneruskan putaran dari turbin angin ke poros kompresor dipilih dan ditentukan spesifikasinya antara lain adalah, Tipe AMW WPX 50, dengan ratio roda gigi 1 :20, berat 6,6 kg dan diameter poros 45 mm.

Dari spesifikasi kompresor dan gearbox tersebut maka besarnya torsi actual yang harus dipenuhi oleh turbin untuk menggerakkan kompresor dapat dihitung dengan persamaan (5) sebagai berikut (Yan et al., 2019).

$$T_a = \frac{T_c}{\eta_{gb} \times i} \quad (5)$$

Dimana secara berturut-turut T_a , T_c , η_{gb} dan i adalah torsi minimum yang harus dipenuhi turbin, kebutuhan torsi kompresor dapat dihitung juga dengan persamaan (3), efisiensi gearbox (0,85)

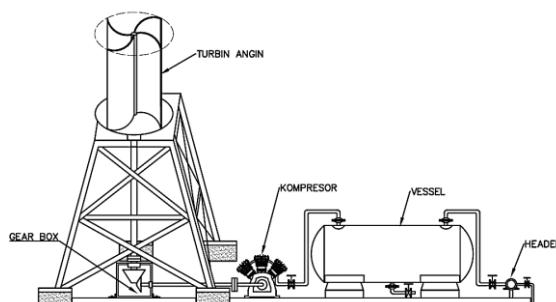
dan ratio gearbox.

Untuk pressure vessel yang berfungsi untuk menstabilkan tekanan udara sebelum dialirkan memiliki diameter 1,5 m, Panjang 3 m dengan ketebalan 5 mm. Vessel ini diuji hidrostatik pada 1,5 kali tekanan kerja. Vessel dibuat dari bahan fiber.

B. Perakitan Sistem Turbin Angin Vertikal

Perakitan sistem turbin angin vertical sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 1. Dimana rotor turbin dipasang vertical pada puncak tower. Poros turbin yang vertical dihubungkan dengan gear box pada bagian bawah tower. Gear box mentransmisikan daya dan putaran dari poros turbin ke poros kompresor torak.

Udara bertekanan yang dihasilkan dari kompresor torak selanjutnya ditampung terlebih dahulu pada pressure vessel agar tekanannya stabil ketika akan disalurkan menuju header yang berada pada kolam tambak udang.



Gambar 1. Skema Sistem Turbin Angin Vertikal.

C. Analisa Performa Sistem Turbin Angin

Performa sistem turbin angin dihitung pada variasi kecepatan angin yang terjadi, kecepatan angin diukur menggunakan Smart Sensor Digital Anemometer S836 dengan akurasi 0,1 m/s, dan rentang pengukuran 0,3-30 m/s serta menggunakan sensor piezoresistive. Pengukuran kecepatan dilakukan di pesisir pantai tepatnya di daerah Desa Sambiroto, Kabupaten Pati, provinsi Jawa Tengah, Indonesia. Putaran poros pada sudu turbin dan kompresor diukur dengan menggunakan alat Tachometer Merk Lutron DT-1236L, dengan akurasi 0,05% dan rentang pengukuran 2 - 99.999 rpm.

Untuk Total Speed Ratio (TSR) dari kecepatan angin yang terjadi dihitung menggunakan

persamaan (6) Sebagai berikut (Nuryanti et al., 2019).

$$\lambda = \frac{\pi \times D \times N}{60 \times V} \quad (6)$$

Dimana secara berturut-turut λ , D, N dan V, masing-masing adalah total speed ratio, dimeter sudu (m), Putaran desain turbin (RPM) dan kecepatan angin maksimal (m/s).

Sedangkan kapasitas udara yang dialirkan oleh kompresor dihitung dengan persamaan (7) sebagai berikut (Hujare et al., 2025).

$$Q_u = V \times N \times \eta_v \quad (7)$$

Dimana secara berturut-turut Q, V, N dan η_v masing-masing adalah kapasitas udara yang dialirkan kompresor (liter/ jam). Volume Silinder kompresor torak (liter), Putaran poros kompresor (RPM) dan efisiensi volumetric kompresor (70-85%)

Kapasitas dari hasil udara yang dialirkan oleh kompresor dijadikan acuan dalam menentukan kapasitas oksigen yang dialirkan ke dalam tambak udang. Besarnya kapasitas oksigen yang dialirkan dihitung dengan persamaan (8) sebagai berikut (Nuryanti et al., 2019).

$$P \times V = n \times R \times T \quad (8)$$

Dimana secara berturut-turut P, V, n, R dan T, masing-masing adalah tekanan atmosfer lingkungan (Pa), volume oksigen (m^3), mol oksigen (mol/ detik), Nilai konstanta gas ideal (8.31 J/mol. K) dan temperature lingkungan (K).

Kapasitas oksigen yanghasilkan dibandingkan dengan kebutuhan oksigen pada setiap volume air kolam tambak udang (Kg/liter). Sehingga bisa didapatkan waktu minimal yang dibutuhkan kompresor untuk memenuhi kebutuhan minimal oksigen yang berada dalam tambak udang dengan kondisi kecepatan angin dan variasi jumlah silinder tertentu.

Selanjutnya dapat dihitung juga daya yang dibutuhkan untuk menghasilkan debit oksigen tersebut dengan persamaan (9) berikut (Nuryanti et al., 2019).

Dimana secara berturut-turut P , Ph dan Q_o , masing-masing adalah daya yang dibutuhkan untuk menghasilkan kapasitas oksigen yang dibutuhkan (Watt). Tekanan hidrostatik air kolam (Pa). Kapasitas oksigen yang dihasilkan (m^3/s).

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Perencanaan Desain Sistem

Hasil perencanaan desain sistem turbin angin vertikal diantaranya terdiri dari hasil perhitungan luas sudu yang dibutuhkan untuk membantikkan daya desain. Penetapan nilai daya ini tidak hanya didasarkan pada kebutuhan daya kompresor sebesar 2800 W, tetapi juga mempertimbangkan kehilangan daya mekanis di sepanjang sistem transmisi. Diantaranya rugi-rugi yang diakibatkan karena gesekan bantalan dan poros (5-12%), rugi transmisi gearbox (15-25%) dan fluktuasi kecepatan angin yang menyebabkan daya turbin actual sesaat lebih rendah dari nilai desain.

Dengan mengacu pada efisiensi mekanik sistem turbin kecil yaitu 0,65-0,75 (Alam & Jin, 2023). Maka untuk memenuhi daya kompresor 2800 watt, dibutuhkan daya turbin yang besarnya dapat dihitung dengan persamaan (10) sebagai berikut.

$$Pt = \frac{Pc}{\eta_{total}} \quad (10)$$

$$Pt = \frac{2800 \text{ W}}{0,7} = 4000 \text{ Watt}$$

Kecepatan angin maksimum yang terjadi di tempat pengujian sebesar 4,3 m/s. Kecepatan angin maksimum digunakan untuk perhitungan dimensi awal turbin karena memberikan kondisi beban terbesar yang harus aman ditanggung oleh sudu, poros, dan struktur turbin. Sedangkan massa jenis udara (ρ) sebesar 1,23 kgf/m³. Sehingga besarnya luas sudu turbin (A) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (1), dengan hasil perhitungan sebagai berikut.

$$A = \frac{2 \times Pt}{\rho \times V^3}$$

$$= \frac{2 \times 4000 \text{ Watt}}{1,23 \text{ kgf/m}^3 \times (4,3 \frac{\text{m}}{\text{s}})^3} \\ = 81,80 \text{ m}^2$$

Sedangkan untuk diameter sudu turbin dihitung dengan persamaan (2), dengan jumlah sudu (n) ditetapkan sebanyak 28 buah dengan tinggi sudu (l) ditetapkan 2 m. sehingga diperoleh hasil perhitungan diameter sudu turbin sebagai berikut.

$$D = \frac{2 \times A}{n \times \pi \times l} \\ = \frac{2 \times 81,80 \text{ m}^2}{28 \times \pi \times 2 \text{ m}} \\ = 0,93 \text{ m} \approx 1 \text{ m}$$

Dari diameter sudu yang dibulatkan menjadi 1 m, maka diperoleh keliling lekungan sudu turbin sebesar 1570 mm. Sehingga dimensi plate yang digunakan untuk membuat sudu turbin adalah 1570 mm (p) x 2000 mm (l) dan 1,5 mm (t). Penetapan dimensi sudu berdasarkan ketersediaan plate stainless yang ada.

Selanjutnya dihitung besarnya torsi yang ditimbulkan akibat daya desain turbin sebesar 4000 Watt dan putaran desain rotor turbin sebesar 28 RPM. Hasil perhitungan torsi berdasarkan persamaan (3) adalah sebagai berikut.

$$T = \frac{4000 \text{ Watt} \times 60}{2 \times \pi \times 28 \text{ RPM}} \\ = 1364.88 \text{ N.m}$$

Berdasarkan hasil perhitungan torsi tersebut, maka dapat dihitung diameter poros (D) minimal yang mampu menunjang beban rotor turbin. Bila tegangan geser ijin (τ) material poros adalah sebesar 41,32 N/mm² (Choure, 2017). Hasil perhitungan diameter poros rotor turbin berdasarkan persamaan (4) adalah sebagai berikut.

$$d = \sqrt{\frac{16 \times 1364,88 \text{ N.m}}{\pi \times 41,32 \text{ N/mm}^2}} \\ = 55,2 \text{ mm}$$

Sedangkan besarnya torsi yang timbul pada kompresor bila daya kompresor 2800 Watt dan putaran kompresor 540 rpm, yang dihitung dengan persamaan (3) adalah sebagai berikut.

$$T_c = \frac{2800 \text{ Watt} \times 60}{2 \times \pi \times 540 \text{ RPM}}$$
$$= 49.54 \text{ N.m}$$

Sehingga besarnya torsi actual yang dibutuhkan turbin untuk menggerakan kompresor apabila ratio gearbox 1:20 dan efisiensi gearbox 0.85 (Yan et al., 2019), yang dihitung dengan persamaan (5) adalah sebagai berikut.

$$T_a = \frac{49.54 \text{ N.m}}{0.85 \times \left(\frac{1}{20}\right)}$$
$$= 1165.65 \text{ N.m}$$

Berdasarkan hasil perhitungan ini diperoleh bahwa besarnya Torsi desain turbin (T) 1364.88 N.m lebih besar dari pada Torsi actual yang dibutuhkan turbin untuk menggerakan kompresor (T_a) 1165.65 N.m. Sehingga dapat disimpulkan bahwa turbin angin yang dirancang mampu menggerakan poros kompresor.

B. Hasil Analisa Performa Sistem Turbin Angin

Analisa performa turbin angin dilakukan pada beberapa variasi kecepatan angin yang terjadi (4.3, 4, 3.7, 3.4, 3.1, 2.8, 2.5 dan 2.2 m/s), dibandingkan terhadap putaran turbin, Tip Speed Ratio (TSR), Daya dan Torsi actual yang terjadi pada turbin. Gambar 2. Menunjukkan Grafik parameter performa dari turbin angin tersebut. Hasil pengujian performa turbin angin yang dirancang untuk menggerakkan kompresor aerasi tambak, terlihat bahwa peningkatan kecepatan angin berbanding lurus dengan peningkatan daya aktual, torsi, dan putaran turbin.

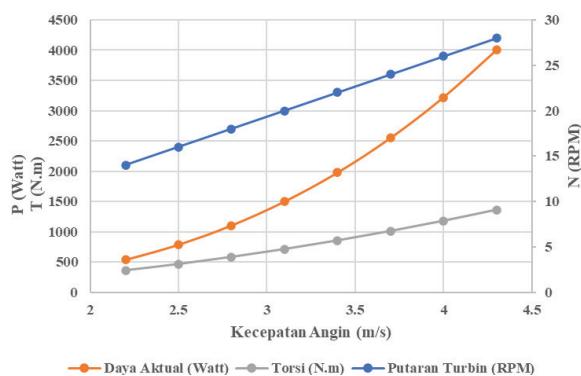
Saat kecepatan angin meningkat dari 2,2 m/s hingga 4,3 m/s, daya aktual yang dihasilkan meningkat signifikan dari 535,70 W menjadi 4000 W, sedangkan putaran turbin naik dari 14 RPM menjadi 28 RPM. Pola kenaikan ini menunjukkan

hubungan kubik antara energi kinetik udara dengan kecepatan angin sebagaimana dijelaskan dalam teori dasar konversi energi angin.

Nilai torsi yang dihasilkan juga meningkat secara linier terhadap kenaikan kecepatan angin, yaitu dari 365,58 N·m menjadi 1364,88 N·m. Hal ini menunjukkan bahwa gaya dorong bilah turbin terhadap poros meningkat proporsional dengan besarnya momentum udara yang menabrak permukaan bilah. Hubungan antara daya, torsi, dan kecepatan sudut tampak konsisten, di mana peningkatan torsi dan putaran menghasilkan peningkatan daya mekanik secara eksponensial.

Meskipun daya keluaran turbin angin pada kecepatan angin di bawah 4 m/s berada jauh di bawah kebutuhan daya kompresor aerasi (2800 W), pengujian pada rentang kecepatan rendah tersebut tetap relevan dan penting dilakukan karena tujuan percobaan bukan untuk memenuhi beban kompresor secara penuh, melainkan untuk mengevaluasi karakteristik kerja awal turbin. Pada tahap desain, pengujian kecepatan rendah digunakan untuk mengetahui kemampuan turbin menghasilkan torsi awal, menentukan cut-in speed, melihat respons putaran rotor, dan mengevaluasi kecenderungan peningkatan daya terhadap perubahan kecepatan angin. Hal ini sangat penting karena aplikasi turbin angin untuk aerasi tambak memerlukan sistem yang mampu mulai beroperasi pada kondisi angin rendah yang umum terjadi di lapangan.

Selain itu, pengujian ini memberikan dasar empiris untuk menilai apakah turbin memerlukan modifikasi, seperti peningkatan profil sudu, pengurangan massa rotor, atau penggunaan sistem transmisi yang lebih ringan. Dengan demikian, meskipun daya keluaran pada uji awal belum mencapai daya kompresor, percobaan tetap masuk akal karena berfungsi sebagai tahapan kritis untuk memvalidasi performa dasar turbin sebelum dirancang ulang atau dikombinasikan dengan sistem pendukung lainnya, seperti gear ratio booster, penyimpanan energi, atau integrasi sistem hybrid.



Gambar 2. Grafik Performa Parameter Turbin

Tabel 1. Hasil Perhitungan Parameter Performa Turbin

Kecepatan Angin (m/s)	Putaran Turbin (RPM)	Tip Speed ratio	Daya Turbin (Watt)	Torsi (N.m)
4.3	28	0.3408	4000.00	1364.88
4.0	26	0.3402	3219.84	1183.19
3.7	24	0.3395	2548.35	1014.47
3.4	22	0.3386	1977.39	858.74
3.1	20	0.3376	1498.79	715.98
2.8	18	0.3364	1104.41	586.20
2.5	16	0.3349	786.09	469.40
2.2	14	0.3330	535.70	365.58

Berdasarkan Tabel 1. diatas terlihat rasio kecepatan ujung bilah terhadap kecepatan angin (Tip Speed Ratio) berada pada kisaran 0,333–0,341. Nilai ini menunjukkan bahwa turbin beroperasi stabil dalam rentang TSR optimum untuk jenis turbin berkecepatan rendah yang digunakan pada aplikasi aerasi tambak (Chen et al., 2018). Konsistensi TSR ini juga menunjukkan bahwa desain sudu dan sistem transmisi telah sesuai untuk kondisi kecepatan angin menengah (2–5 m/s), yang umum terjadi di wilayah pesisir tempat tambak udang berada.

Dari segi efisiensi, daya aktual yang diperoleh masih berada di bawah batas teoritis Betz (59,3%), yang wajar karena adanya kerugian mekanis dan aerodinamis pada sistem (AbdulRaouf et al., 2022). Hasil ini sudah menunjukkan performa yang baik untuk aplikasi praktis. Pada kecepatan angin ≥ 3 m/s, daya yang dihasilkan sudah cukup untuk menggerakkan kompresor kecil–menengah yang digunakan pada sistem aerasi tambak udang. Artinya, turbin ini berpotensi besar mengantikan atau mengurangi ketergantungan pada sumber

energi listrik konvensional. Tabel 1. dibawah ini menunjukkan hasil rinci dari pengujian performa turbin angin.

Hasil ini sejalan dengan penelitian oleh Mahmudov yang menunjukkan bahwa sistem aerasi berbasis tenaga angin mampu mempertahankan kadar oksigen terlarut secara stabil di kolam ikan dengan konsumsi energi yang jauh lebih rendah dibandingkan sistem berbasis listrik (Mahmudov et al., 2019). Penelitian oleh Suryanto juga melaporkan bahwa penggunaan sistem hybrid turbin angin–panel surya pada tambak udang dapat menjaga kadar DO (Dissolved Oxygen) pada 5,3–7 mg/L dengan biaya operasional yang lebih efisien (Suryanto & Setiawan, 2021). Selain itu, Boyd juga menegaskan bahwa aerasi merupakan komponen dengan konsumsi energi tertinggi dalam budidaya udang, sehingga penerapan teknologi energi terbarukan seperti turbin angin menjadi langkah strategis menuju sistem budidaya berkelanjutan (Boyd & McNevin, 2021).

Dengan demikian, hasil pengujian ini memperlihatkan bahwa desain turbin angin yang dikembangkan sudah mampu menghasilkan daya dan torsi yang memadai untuk sistem aerasi tambak udang. Penerapan sistem ini tidak hanya memberikan manfaat teknis berupa penghematan energi, tetapi juga berdampak positif terhadap keberlanjutan lingkungan dan efisiensi operasional budidaya.

C. Hasil Analisa Pemenuhan Kandungan Oksigen di Dalam Air

Analisa pemenuhan kandungan oksigen didasarkan terhadap waktu dan daya minimal yang dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan Oksigen di dalam kolam tambak udang. Analisa ini juga dilakukan pada variasi kecepatan angin, yang akan berdampak pada putaran dan kapasitas kompresor. Putaran kompresor dihitung berdasarkan ratio gear box yang digunakan yaitu 1: 20. Diketahui volume silinder berdasarkan spesifikasi kompresor adalah 0,00462 m³, Selanjutnya kapasitas kompresor dihitung berdasarkan persamaan (7).

Setelah didapatkan kapasitas kompresor, kapasitas oksigen dapat dihitung berdasarkan persamaan (8). Apabila diketahui bahwa difusi oksigen minimal pada air adalah 4 ppm atau sama dengan 4 mg/liter (Nuryanti et al., 2019). Volume

air kolam adalah $150 \text{ m}^2 \times 1.5 \text{ m} = 225 \text{ m}^3$.

Sehingga massa oksigen yang dibutuhkan di dalam kolam adalah 900 kg. Besarnya daya yang dibutuhkan dihitung menggunakan persamaan

(9). Hasil perhitungan lamanya waktu pemenuhan kandungan oksigen di dalam air dan daya yang dibutuhkan ditunjukkan sebagaimana Tabel 2. Sebagai berikut.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Analisa Pemenuhan Kandungan Oksigen

Kecepatan Angin (m/s)	Putaran Kompresor (RPM)	Kapasitas Kompresor (m ³ /s)	Mol Oksigen (mol/s)	Kapasitas Oksigen m ³ /s	Waktu Pemenuhan (jam)	Konsumsi Daya (Watt)
4.3	560	0.003665	0.000229	0.005403	37.77	81.04
4.0	520	0.003403	0.000213	0.005017	40.68	75.25
3.7	480	0.003142	0.000196	0.004631	44.07	69.46
3.4	440	0.002880	0.000180	0.004245	48.08	63.67
3.1	400	0.002618	0.000164	0.003859	52.88	57.89
2.8	360	0.002356	0.000147	0.003473	58.76	52.10
2.5	320	0.002094	0.000131	0.003087	66.11	46.31
2.2	280	0.001833	0.000115	0.002701	75.55	40.52

Hasil analisis pada Tabel 2. menunjukkan bahwa pemenuhan kebutuhan oksigen di kolam tambak udang sangat dipengaruhi oleh kecepatan angin yang menggerakkan turbin dan menentukan kapasitas udara tekan kompresor. Ketika kecepatan angin meningkat dari 2,2 m/s menjadi 4,3 m/s, kapasitas kompresor bertambah dari 0,001833 m³/s menjadi 0,003665 m³/s. Peningkatan ini berbanding lurus dengan mol oksigen yang dihasilkan dan kapasitas oksigen yang disuplai ke kolam. Akibatnya, waktu pemenuhan kebutuhan oksigen berkurang secara signifikan, dari sekitar 75,55 jam pada kecepatan rendah menjadi ± 37.77 jam pada kecepatan tinggi. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi kecepatan angin, semakin besar suplai udara bertekanan yang dihasilkan dan semakin efisien proses aerasi berlangsung. Namun, pada kondisi kecepatan angin di bawah 3 m/s, suplai oksigen menjadi sangat kecil, sehingga waktu pemenuhan menjadi terlalu lama dan berpotensi tidak mencukupi kebutuhan oksigen pada periode kritis, seperti malam hari ketika konsumsi oksigen udang meningkat.

Dari sisi konsumsi daya, hasil analisis menunjukkan bahwa kebutuhan daya kompresor relatif rendah, yaitu antara 40,52 Watt hingga 81,04 Watt, bergantung pada kecepatan angin. Nilai ini menunjukkan efisiensi sistem yang cukup

baik karena hanya sebagian kecil dari daya yang dihasilkan turbin digunakan untuk kompresor. Bila turbin menghasilkan daya lebih besar, kelebihan energi dapat disimpan atau dialihkan untuk mendukung sistem cadangan pada saat angin lemah.

Kondisi ini sejalan dengan temuan Boyd yang menyatakan bahwa aerasi merupakan komponen energi terbesar dalam operasional tambak udang, sehingga efisiensi sistem aerasi memiliki dampak langsung terhadap biaya produksi (Boyd & McNevin, 2021). Penelitian lain oleh Aytac menegaskan bahwa parameter hidrodinamis seperti arah aliran, sudut jet, dan tinggi permukaan air berpengaruh besar terhadap efisiensi aerasi (Aytac et al., 2024).

Secara teknis, estimasi waktu pemenuhan oksigen sebesar 37–75 jam merupakan kondisi statis, yaitu ketika kolam tidak diaerasi sebelumnya. Dalam operasi nyata, proses aerasi berlangsung secara kontinu sehingga kebutuhan oksigen per jam jauh lebih kecil dibandingkan akumulasi total 900 kg oksigen untuk satu siklus budidaya. Hasil analisis menunjukkan bahwa turbin baru dapat memenuhi kebutuhan suplai oksigen harian apabila beroperasi pada kecepatan angin $\geq 3,8 \text{ m/s}$.

Namun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, yakni pengujian hanya dilakukan pada rentang kecepatan angin

rendah (2–5 m/s), tidak adanya pengukuran langsung nilai DO di tambak. Selain itu, kajian belum memasukkan analisis biaya operasional berdasarkan variasi angin musiman.

Berdasarkan hasil tersebut, beberapa rekomendasi operasional dapat diberikan: tambak tetap perlu memiliki sumber energi cadangan (listrik atau genset) ketika kecepatan angin turun di bawah 3 m/s. Sistem aerasi idealnya mengadopsi mode hibrida angin–surya untuk menjaga DO terutama pada malam hari. Sedangkan kelebihan daya turbin (3000–3900 W) dapat dimanfaatkan untuk pengisian baterai atau air pressure tank sebagai penyangga tekanan. Penggunaan sistem kontrol berbasis sensor DO juga disarankan agar suplai oksigen dapat disesuaikan secara adaptif dengan kebutuhan tambak.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan menguji sistem turbin angin vertikal sebagai penggerak kompresor aerasi pada tambak udang. Berdasarkan hasil analisis performa, daya yang dihasilkan meningkat secara signifikan dengan kenaikan kecepatan angin, mencapai 4000 W pada 4,3 m/s. Nilai TSR yang stabil (0,333–0,341) menunjukkan bahwa desain turbin bekerja optimal untuk kecepatan angin menengah yang umum di wilayah pesisir. Sistem mampu memenuhi kebutuhan oksigen tambak dengan waktu 37–75 jam tergantung kondisi angin, serta konsumsi daya kompresor relatif rendah (40–81 W). Secara teknis, turbin ini mampu menggantikan sebagian peran energi listrik konvensional untuk sistem aerasi, sehingga menurunkan biaya operasional dan emisi karbon.

Untuk peningkatan performa di masa depan, disarankan pengembangan sistem hibrid (angin–surya), penambahan kapasitas kompresor, serta penerapan sistem penyimpanan energi dan kontrol otomatis berbasis sensor DO guna menjaga kestabilan oksigen terlarut di tambak udang.

DAFTAR PUSTAKA

AbdulRaouf, M., AlBakhali, E., Parvez, S., Alnhdi, A., Souli, M., & AlBakhali, T. (2022). On the Investigation of the Effect of Tower and Hub Exclusion on the Numerical Results of a Horizontal Axis Wind Turbine. *International Journal of Multiphysics*, 16(2), 147–174. <https://doi.org/10.21152/1750-9548.16.2.147>

Alam, F., & Jin, Y. (2023). The Utilisation of Small Wind Turbines in Built-Up Areas: Prospects and Challenges. In *Wind* (Vol. 3, Issue 4, p. 24). <https://doi.org/10.3390/wind3040024>

Aytac, A., Kelestemur, G. T., & Tuna, M. C. (2024). An effective aeration system for high performance pond aeration at low energy cost. *Aquaculture International*, 32(5), 6869–6886. <https://doi.org/10.1007/s10499-024-01492-6>

Boyd, C. E., & McNevin, A. A. (2021). Aerator energy use in shrimp farming and means for improvement. *Journal of the World Aquaculture Society*, 52(1), 6–29. <https://doi.org/10.1111/jwas.12753>

Chen, L., Chen, J., & Zhang, Z. (2018). Review of the Savonius rotor's blade profile and its performance. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 10(1), 13306. <https://doi.org/10.1063/1.5012024>

Choure, A. (2017). *Design Review of Shaft for Strength and Rigidity Considerations*. 5(02), 1740–1742.

Hujare, P., Sanap, Y., Ingle, P., Hujare, D., Chavan, U., & Atre, V. (2025). Analysis of compressor performance using data-driven machine learning techniques. *Journal of Engineering and Applied Science*, 72(1), 170. <https://doi.org/10.1186/s44147-025-00752-3>

Jamil, M., As, A., & Baihaqi, B. (2022). Introduksi Teknologi Mesin Pakan Udang Windu Pada Pokdakan Jasa Tambak Aceh Tamiang. *JMM (Jurnal Masyarakat Mandiri)*. <https://doi.org/10.31764/jmm.v6i5.10510>

Mahmudov, K., Mahmoud, A., Sur, S., Cruz, F. C., & Bilton, A. M. (2019). Feasibility of a wind-powered aeration system for small-scale aquaculture in developing countries. *Energy for Sustainable Development*, 51, 40–49. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.05.003>

Mustafa, A. A., Asaad, A., & Linthin, D. (2021). Performa Budidaya Udang Windu

(Penaeus Monodon) Pada Musim Kemarau Di Tambak Kecamatan Marusu Kabupaten Maros. *Media Akuakultur*. <https://doi.org/10.15578/MA.16.1.2021.45-56>

Nensy, E., Shibuya, K., Yamashita, K., & Fujita, G. (2024). *Unlocking the power of the wind : Innovations in smart hybrid vertical axis wind turbines*. 13(5), 974–981.

Nugraha, I. M. A., Made, I. G., & Desnanjaya, N. (2025). *Energy efficiency in aeration systems for aquaculture ponds: a comprehensive review*. 20(1), 1–25.

Nuryanti, Dwiartomo, B., & Ruswandi, A. (2019). Analisis Daya yang Dihasilkan Turbin Angin Tipe Windmill pada Sistem Aerasi Tambak Udang. *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Manufaktur*, 1(1), 47–58. <https://doi.org/10.48182/jtrm.v1i1.1>

Pasha, Y., & Devi, M. T. (2023). *Reliability Analysis of the Shaft Subjected to Torsion When Shear Stress Follows the Exponential Distribution*. 12(07), 371–375.

Sabilu, K., Kurnia, A., Yusnaini, Y., Patadjai, R., Idris, M., & Balubi, A. (2024). Studi Efisiensi Asimilasi Dan Kecernaan Limbah Organik Padat Tambak Udang Sebagai Pakan Teripang Pasir. *Jurnal Riset Akuakultur*. <https://doi.org/10.15578/jra.18.1.2023.15-26>

Sumarjo, J., Suryaman, M., & Santosa, D. B. (2022). *Implementasi Hybrid Teknologi Kinetik Turbin Angin Dan Solar Cell Sebagai Penunjang Kebutuhan Energi Di Pantai Ciparage Desa Ciparage Jaya, Selaparang: Jurnal Pengabdian Masyarakat Berkemajuan*. <https://doi.org/10.31764/jpmb.v6i1.6846>

Suryanto, I., & Setiawan, R. J. (2021). *Hybrid Aerator based on Savonius Wind Turbine and Solar Photovoltaic Technology for Shrimp Pond*. Prosiding Seminar Nasional TREnD 1, 82–91.

Yan, S., Li, G., Tian, S., & Zheng, Q. (2019). *Mechanics Research on the relationship between transmission efficiency and input torque of manual transmission*. 611.

Zehra, A., Zehra, A., Rai, A. K., & Zehra, A. (2021). *Modeling and simulation of wind turbine with advance blade testing methods*. 2(2), 22–29.

Zhou, J., Shu, X., Zhang, J., Yi, F., Hu, D., Zhang, C., & Li, Y. (2024). Load Torque Component Extraction and Analysis of Ultra-High-Speed Electric Air Compressors for Fuel Cell Vehicles. In *Actuators* (Vol. 13, Issue 8, p. 320). <https://doi.org/10.3390/act13080320>

Zulfikar, Z. (2019). Analisa Perbandingan Pengaruh Variasi Jumlah Sudu 4 Dan 8 Pada Turbin Angin Savonius Terhadap Tegangan Dan Arus Generator Dc. *RELE (Rekayasa Elektrikal Dan Energi) : Jurnal Teknik Elektro*. <https://doi.org/10.30596/rele.v2i1.3646>