



DOI:10.22144/ctujos.2026.091

SO SÁNH THỰC NGHIỆM ĐẶC TÍNH KHỞI ĐỘNG VÀ KHẢ NĂNG PHÁT ĐIỆN CỦA CÁC TURBINE GIÓ TRỤC ĐỨNG TRONG ĐIỀU KIỆN GIÓ THẤP

Nguyễn Thái Sơn¹, Nguyễn Chánh Nghiệm², Quách Ngọc Thịnh¹ và Trần Trung Tính^{1*}

¹Khoa Kỹ thuật điện, Trường Bách Khoa, Đại học Cần Thơ, Việt Nam

²Khoa Tự động hóa, Trường Bách Khoa, Đại học Cần Thơ, Việt Nam

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): tttinh@ctu.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 09/03/2026

Sửa bài (Revised): 31/03/2026

Duyệt đăng (Accepted): 16/05/2026

Title: Experimental comparison of starting characteristics and power generation performance of vertical-axis wind turbines under low wind conditions

Author(s): Nguyen Thai Son¹, Nguyen Chanh Nghiem², Quach Ngoc Thinh¹ and Tran Trung Tinh^{1*}

Affiliation(s): ¹Faculty of Electrical Engineering, College of Engineering, Can Tho University, Viet Nam; ²Faculty of Automation Engineering, College of Engineering, Can Tho University, Viet Nam

TÓM TẮT

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm so sánh thực nghiệm đặc tính khởi động và khả năng phát điện của bốn dạng turbine gió trục đứng quy mô nhỏ gồm Aeroleaf cải tiến, Savonius xoắn, Darrieus và SH-200R trong điều kiện gió thấp. Các mô hình được thiết kế cùng diện tích quét (~0,305 m²) và sử dụng chung hệ thống máy phát để đảm bảo tính khách quan. Thí nghiệm được thực hiện ở ba cấp độ gió thấp; các chỉ tiêu gồm tốc độ gió khởi động, tốc độ quay và điện áp đầu ra được lấy trung bình từ bốn lần đo. Kết quả cho thấy Aeroleaf cải tiến có tốc độ gió khởi động trung bình thấp nhất (2,54 m/s) và đạt tốc độ quay (164,75 vòng/phút) và điện áp ra (16,1 V) cao nhất. Sự khác biệt được giải thích bởi đặc tính khí động lai giữa lực cản và lực nâng của cánh Aeroleaf cải tiến, giúp nâng cao khả năng tự khởi động và phát điện trong vùng gió thấp.

Từ khóa: Aeroleaf, Darrieus, đặc tính khởi động, Savonius, tốc độ gió thấp, turbine gió trục đứng

ABSTRACT

This study experimentally compares the starting characteristics and power generation performance of four small-scale vertical axis wind turbine configurations, including an improved Aeroleaf rotor, a twisted Savonius rotor, a Darrieus rotor, and SH-200R rotor under low wind speed conditions. All models were designed with an identical swept area (approximately 0.305 m²) and were coupled to the same generator system to ensure objective evaluation. Experiments were conducted at three low wind levels, and the parameters, including cut-in wind speed, rotational speed, and output voltage, were averaged from four repeated measurements. The results show that the improved Aeroleaf rotor exhibits the lowest average cut-in wind speed (2.54 m/s) and achieves the highest rotational speed (164.75 RPM) and output voltage (16.1 V). These differences are attributed to the hybrid aerodynamic characteristics of the Aeroleaf blade, which combine drag and lift effects, thereby enhancing self-starting capability and power generation performance in low wind conditions.

Keywords: Aeroleaf, Darrieus, self-starting characteristic, Savonius, low wind speed, vertical axis wind turbine

1. GIỚI THIỆU

Trước xu hướng gia tăng nhu cầu năng lượng toàn cầu và áp lực giảm phát thải khí nhà kính, năng lượng tái tạo ngày càng được xem là giải pháp phát triển bền vững tại nhiều quốc gia và khu vực (Manwell et al., 2009; Hau, 2013; RENA, 2024). Năng lượng gió, với ưu điểm sạch và khả năng vận hành lâu dài, được xem là một trong những nguồn năng lượng thay thế tiềm năng. Tuy nhiên, tốc độ gió trung bình tại nhiều vùng nội địa và đồng bằng của Việt Nam ở độ cao tương đương turbine thử nghiệm được đánh giá là thấp theo quan trắc và dữ liệu tái phân tích, gây khó khăn cho việc khai thác hiệu quả bằng các turbine truyền thống (Thủ tướng Chính phủ, 2023; Năng & Hải, 2025).

Turbine gió trục đứng (Vertical Axis Wind Turbine – VAWT) nổi bật nhờ khả năng hoạt động không phụ thuộc vào hướng gió, cấu trúc nhỏ gọn, dễ lắp đặt và vận hành trong môi trường gió thấp như đô thị, khu dân cư (Ibrahim et al., 2022; Elangovan & Pillai, 2025). Các dạng VAWT phổ biến gồm turbine Savonius (hoạt động dựa trên lực cản), turbine Darrieus (dựa trên lực nâng) và các dạng turbine lai kết hợp hai cơ chế này.

Turbine Savonius thường có khả năng tự khởi động tốt ở tốc độ gió thấp do chênh lệch lực cản giữa hai nửa cánh (Roy & Saha, 2013; Afify et al., 2025). Tuy nhiên, hệ số công suất thực tế của dạng này thường thấp do lực cản khí động cao và tổn thất năng lượng lớn (Roy & Saha, 2013; Singh et al., 2024). Kết quả các nghiên cứu gần đây về thiết kế và tối ưu hóa hình học Savonius cho thấy việc bổ sung các bộ phận hướng dòng hoặc ứng dụng thuật toán tối ưu có thể cải thiện phần nào hiệu suất, nhưng vẫn còn hạn chế về tốc độ quay và công suất đầu ra (Singh et al., 2024; Afify et al., 2025).

Ngược lại, turbine Darrieus có khả năng đạt tốc độ quay và hệ số công suất cao hơn nhờ hiệu ứng lực nâng khí động, nhưng lại thường gặp khó khăn trong giai đoạn tự khởi động ở tốc độ gió thấp do mô-men khởi động nhỏ (Ghafoorian et al., 2024; Gallegos-Molina & Chavero-Navarrete, 2025). Nhiều nghiên cứu đã thử kết hợp hai cơ chế Savonius – Darrieus nhằm cải thiện đặc tính khởi động song vẫn tồn tại sự đánh đổi giữa khả năng khởi động và hiệu suất tổng thể (Hossein et al., 2024; Pan et al., 2024).

Trong các hệ thống turbine gió quy mô nhỏ phục vụ các ứng dụng độc lập như chiếu sáng, sạc pin hay cấp điện cho các tải nhẹ, đặc tính khởi động đóng vai trò quyết định thời gian vận hành hữu ích trong

điều kiện gió thấp. Đồng thời, khả năng phát điện – biểu hiện thông qua tốc độ quay của rotor và điện áp đầu ra của máy phát – là chỉ tiêu phản ánh khả năng phát điện mà turbine có thể cung cấp trong điều kiện thử nghiệm (Toor et al., 2026).

Trong nghiên cứu trước đây của các nhóm tác giả, các biến thể của turbine gió trục đứng dạng Aeroleaf đã được thiết kế và thử nghiệm trong dải tốc độ gió thấp nhằm cải thiện đặc tính khởi động. Kết quả cho thấy việc điều chỉnh hình học cánh có thể làm giảm tốc độ gió khởi động và tăng tốc độ quay so với dạng tham chiếu (Hosseinian et al., 2026). Tuy nhiên, các nghiên cứu này chủ yếu tập trung so sánh giữa các dạng Aeroleaf khác nhau. Trong khi đó, để đảm bảo việc so sánh khách quan giữa các dạng turbine khác nhau, các thí nghiệm cần được thực hiện dưới cùng điều kiện hình học, vật liệu và điều kiện vận hành (Su et al., 2022). Tuy nhiên, các nghiên cứu thực nghiệm so sánh trực tiếp Aeroleaf với các dạng turbine khác như Savonius xoắn và Darrieus dưới cùng điều kiện diện tích quét, vật liệu và hệ phát điện vẫn còn tương đối hạn chế.

Xuất phát từ khoảng trống này, việc so sánh đặc tính khởi động và khả năng phát điện của các dạng turbine gió trục đứng đã được tiến hành nghiên cứu, bao gồm Aeroleaf cải tiến (Sơn và ctv., 2026), Savonius xoắn và Darrieus dưới cùng điều kiện diện tích quét, vật liệu chế tạo bằng công nghệ in 3D và hệ thống phát điện tương đương. Các chỉ tiêu đánh giá bao gồm tốc độ gió khởi động, tốc độ quay và điện áp đầu ra tại các cấp tốc độ gió khác nhau trong dải gió thấp. Mục tiêu của nghiên cứu là làm rõ ảnh hưởng của hình dạng cánh đến đặc tính khởi động và khả năng phát điện, đồng thời cung cấp cơ sở thực nghiệm cho việc lựa chọn dạng turbine phù hợp với điều kiện gió thấp tại Việt Nam.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thiết kế và chế tạo mô hình turbine

Trong nghiên cứu này, bốn dạng turbine gió trục đứng quy mô nhỏ được lựa chọn để so sánh gồm: dạng Darrieus, Aeroleaf cải tiến, Savonius xoắn và turbine thương mại SH-200R. Các mô hình dạng Darrieus, Aeroleaf cải tiến và Savonius xoắn được thiết kế trên phần mềm Inventor và chế tạo bằng công nghệ in 3D sử dụng vật liệu là nhựa sinh học (Polylactic Acid – PLA) nhằm đảm bảo độ chính xác hình học và tính đồng nhất vật liệu.

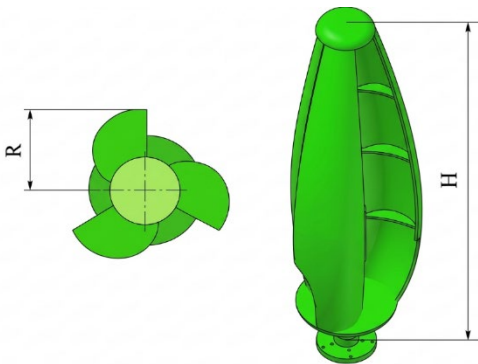
Đối với turbine gió trục đứng, diện tích quét của rotor được xác định bởi tích của đường kính rotor và chiều cao rotor. Do đó, diện tích quét được tính theo

công thức (Rezaeiha et al., 2018; Giri Ajay et al., 2024):

$$A = D \times H \quad (1)$$

Trong đó: A là diện tích quét (m^2), D là đường kính rotor (m) và H là chiều cao rotor (m).

Cấu trúc hình học tổng thể của turbine gió trực đứng (VAWT) được mô phỏng chi tiết thông qua hai hình chiếu đặc trưng thể hiện như trong Hình 1. Trong đó, hình chiếu đứng (bên phải) xác định chiều cao rotor H . Hình chiếu bằng (bên trái) xác định bán kính rotor R , tương ứng với đường kính $D = 2R$ được sử dụng trong công thức (1) và sơ đồ giúp xác lập mối liên hệ trực tiếp để xác định diện tích quét của hệ thống.



Hình 1. Cấu trúc hình học và kích thước đặc trưng của tuabin gió trực đứng

Hình 2 trình bày ba dạng turbine in 3D được khảo sát, bao gồm: Darrieus, Aeroleaf cải tiến, Savonius xoắn. Để so sánh đặc tính vận hành của các dạng turbine gió này, turbine gió thương mại SH-200R được sử dụng trong nghiên cứu để đối sánh. Với đường kính rotor $D = 900$ mm và chiều cao $H = 340$ mm, turbine gió thương mại SH-200R được mô tả ở Hình 3 có diện tích tính theo công thức (1) là:

$$A_{SH-200R} = 0,9 \times 0,34 = 0,306 \text{ m}^2$$

Để đảm bảo tính khách quan trong so sánh, các dạng turbine được khảo sát trong nghiên cứu được thiết kế với cùng kích thước hình học và diện tích quét. Từ đó, các dạng turbine Darrieus, Aeroleaf cải tiến, Savonius xoắn là đối tượng khảo sát trong nghiên cứu có đường kính rotor $D = 368$ mm và chiều cao $H = 828,5$ mm để có diện tích quét là

$$A = 0,368 \times 0,8285 = 0,305 \text{ m}^2$$



Hình 2. Ba dạng turbine gió được khảo sát

Ghi chú: Darrieus (trái), Aeroleaf cải tiến (giữa), Savonius xoắn (phải).



Hình 3. Turbine gió thương mại SH-200R

Như vậy, diện tích quét của các turbine gần như tương đương ($0,305 - 0,306 \text{ m}^2$), với sai khác dưới 0,5%, đảm bảo được tính khách quan trong so sánh thực nghiệm.

Số lượng cánh và cấu trúc hình học đặc trưng của từng loại được giữ theo nguyên lý thiết kế điển hình của từng dạng turbine. Trục quay, ổ bi và khung đỡ được chế tạo đồng nhất nhằm giảm thiểu ảnh hưởng của sai số cơ khí đến kết quả đo.

2.2. Bố trí thí nghiệm

Hình 4 trình bày sơ đồ bố trí thí nghiệm nhằm đánh giá đặc tính hoạt động của turbine gió trực đứng trong điều kiện phòng thí nghiệm. Nguồn gió được tạo bởi một quạt điện công suất công nghiệp đặt cố định phía trước turbine với khoảng cách 3 m nhằm đảm bảo dòng khí có đủ không gian phát triển trước khi tương tác với rotor. Dòng gió được hướng trực tiếp vào diện tích quét của turbine để mô phỏng điều kiện gió tác động trực diện.



Hình 4. Sơ đồ bố trí thí nghiệm đo tốc độ gió, tốc độ quay và điện áp đầu ra của turbine gió

Turbine gió được lắp đặt trên bệ đỡ cố định nhằm giảm rung động trong quá trình vận hành. Rotor turbine được kết nối với máy phát điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu (Permanent Magnet Synchronous Generator – PMSG) để chuyển đổi cơ năng thành điện năng.

Các thông số vận hành được đo lường bằng hệ thống thiết bị chuyên dụng. Tốc độ gió đầu vào được đo bằng máy đo tốc độ gió Prova AVM-07 đặt tại vị trí phía trước turbine. Tốc độ quay của rotor được xác định bằng máy đo tốc độ không tiếp xúc Victor 6234P với độ chính xác $\pm(0,05\%$ giá trị đo + 1 digit). Điện áp đầu ra của máy phát được ghi nhận thông qua đồng hồ đo điện áp số. Sai số của thiết bị được đo theo công bố của nhà sản xuất lần lượt là $\pm 3\%$ cho tốc độ gió, $\pm(0,05\%$ giá trị đo + 1 digit) cho tốc độ quay và $\pm(1,6\%$ giá trị đo ± 5 digits AC) cho điện áp.

Trong quá trình thí nghiệm, các giá trị tốc độ gió, tốc độ quay và điện áp đầu ra được ghi nhận tương ứng với từng dạng cánh turbine khác nhau. Mỗi trường hợp đo được lặp lại bốn lần để đảm bảo độ tin cậy của dữ liệu. Các số liệu thu thập được sử dụng để phân tích đặc tính khởi động và khả năng phát điện giữa các loại cánh turbine.

2.3. Quy trình thực nghiệm

Quá trình thực nghiệm được tiến hành theo các bước sau:

Bước 1: Xác định tốc độ gió khởi động

Tốc độ gió khởi động được xác định bằng cách tăng dần tốc độ gió từ thấp đến cao. Giá trị tốc độ gió tại thời điểm rotor bắt đầu chuyển động quay được ghi nhận là tốc độ gió khởi động của turbine.

Bước 2: Đo tốc độ quay và điện áp đầu ra

Thí nghiệm được thực hiện tại các cấp tốc độ gió khác nhau trong dải gió thấp. Tại mỗi cấp gió, tốc độ quay và điện áp đầu ra được ghi nhận sau khi hệ thống đạt trạng thái ổn định. Các cấp tốc độ gió thí nghiệm được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Các cấp tốc độ gió trong thí nghiệm

Cấp độ gió	Tốc độ gió trung bình (m/s)
Cấp độ gió 1	2,95 – 3,16
Cấp độ gió 2	3,73 – 3,88
Cấp độ gió 3	5,18 – 5,86

Bước 3: Lặp lại phép đo

Mỗi phép đo được thực hiện bốn lần, lấy giá trị trung bình nhằm giảm sai số ngẫu nhiên và tăng độ tin cậy của dữ liệu.

Trong suốt quá trình thí nghiệm, các điều kiện môi trường như nhiệt độ phòng và bố trí thiết bị được giữ ổn định để đảm bảo tính lặp lại của kết quả.

2.4. Phương pháp xử lý và phân tích số liệu

Dữ liệu thực nghiệm được thu thập thông qua bốn lần đo độc lập cho mỗi dạng turbine tại từng cấp độ gió. Các thông số ghi nhận bao gồm tốc độ gió khởi động, tốc độ quay (RPM) và điện áp đầu ra không tải của máy phát.

Giá trị trung bình của mỗi đại lượng được tính theo công thức:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2)$$

Trong đó: X_i là giá trị đo lần thứ i và $n = 4$ là số lần đo lặp lại. Độ lệch chuẩn (Standard Deviation – SD) của các phép đo lặp lại được tính toán nhằm đánh giá mức độ phân tán dữ liệu. Kết quả cho thấy độ lệch chuẩn của các đại lượng đo nhỏ hơn 3% giá trị trung bình, chứng tỏ độ lặp lại tốt và sai số ngẫu nhiên thấp trong quá trình thực nghiệm.

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (X_i - \bar{X})^2} \quad (3)$$

Để đánh giá mức độ chênh lệch giữa các dạng turbine, phần trăm chênh lệch được xác định:

$$\Delta\% = \frac{X_A - X_B}{X_B} \times 100\% \quad (4)$$

Trong đó: X_A và X_B lần lượt là giá trị trung bình của hai dạng cần so sánh.

Việc phân tích tập trung vào ba tiêu chí chính: (i) tốc độ gió khởi động, (ii) tốc độ quay trung bình tại từng cấp độ gió, (iii) điện áp đầu ra tương ứng. Các kết quả được biểu diễn dưới dạng bảng và đồ thị để so sánh xu hướng biến thiên theo cấp độ gió.

Do hạn chế về thiết bị, nên không đo được mô-men xoắn và công suất cơ học, nghiên cứu không thực hiện tính toán hệ số công suất (C_p), mà tập trung vào so sánh thực nghiệm trực tiếp giữa các dạng trong cùng điều kiện khảo sát.

Việc so sánh được thực hiện dựa trên các chỉ tiêu tốc độ gió khởi động thấp, tốc độ quay cao và điện áp đầu ra ổn định trong điều kiện gió thấp nhằm đánh giá tính phù hợp của từng dạng turbine đối với các ứng dụng quy mô nhỏ.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Tốc độ gió khởi động trung bình

Kết quả thực nghiệm về tốc độ gió khởi động trung bình của các mẫu turbine được trình bày trong Bảng 2. Qua đó, dạng Aeroleaf cải tiến cho thấy ưu thế vượt trội với tốc độ gió khởi động thấp nhất, chỉ 2,54 m/s, thấp hơn đáng kể so với mẫu thương mại SH-200R (2,98 m/s). Turbine Savonius xoắn có tốc độ khởi động tương đương mẫu thương mại.

Bảng 2. Tốc độ gió khởi động trung bình (m/s) của các turbine

Dạng turbine	Tốc độ gió khởi động trung bình (m/s)
Aeroleaf cải tiến	2,54
Savonius xoắn	2,94
SH-200R	2,98
Darrieus	4,32

Đáng chú ý, mẫu Darrieus cho thấy khả năng tự khởi động kém nhất khi chỉ bắt đầu vận hành ở tốc độ gió từ 4,32 m/s trở lên. Điều này phản ánh đặc tính khí động học điển hình của turbine dựa trên lực nâng, vốn yêu cầu tốc độ gió đủ lớn để hình thành lực nâng hiệu quả. Kết quả thực nghiệm chứng minh rằng trong điều kiện gió thấp ($\approx 2,5-3$ m/s), các dạng có thành phần lực cản hoặc lái (Aeroleaf, SH-200R, Savonius xoắn) có ưu thế rõ rệt về mô-men khởi động so với dạng Darrieus thuần lực nâng.

Sự khác biệt này có thể được giải thích từ cơ chế khí động học của các dạng turbine: Turbine Savonius xoắn hoạt động chủ yếu dựa trên lực cản (drag force), trong đó sự chênh lệch áp suất giữa hai mặt cánh tạo ra mô-men khởi động lớn ngay cả ở tốc độ gió thấp. Ngược lại, turbine Darrieus hoạt động dựa trên lực nâng (lift force) sinh ra khi dòng khí chuyển động qua biên dạng cánh. Cơ chế này yêu cầu tốc độ gió đủ lớn để hình thành lực nâng hiệu quả, do đó turbine thường gặp khó khăn trong giai đoạn tự khởi động ở vùng gió thấp.

3.2. Quan hệ giữa tốc độ gió và tốc độ quay

Giá trị tốc độ quay trung bình của các turbine tại ba cấp độ gió khảo sát được liệt kê trong Bảng 3 và được trình bày ở Hình 5. Kết quả cho thấy xu hướng tăng dần của tốc độ quay khi tốc độ gió tăng, đồng thời cho thấy sự khác biệt về khả năng đáp ứng động giữa các dạng turbine. Kết quả cho thấy tốc độ quay của các turbine tăng theo tốc độ gió đầu vào. Turbine dạng Aeroleaf cải tiến tăng rõ rệt ở cấp độ gió 2 so với các dạng còn lại, có thể do đặc điểm khí động học kết hợp giữa lực cản và lực nâng giúp turbine khởi động hiệu quả hơn.

Tại cấp độ gió 1 và 2, turbine Darrieus không hoạt động, trong khi Aeroleaf cải tiến đạt tốc độ quay cao nhất, lần lượt là 81,75 và 133,75 RPM. Ở cấp độ gió 3, tất cả các turbine đều hoạt động; Aeroleaf cải tiến tiếp tục dẫn đầu với 164,75 RPM, tiếp theo là Darrieus (110,3 RPM), Savonius xoắn (101,5 RPM) và SH-200R (55,8 RPM).

Kết quả này có thể liên quan đến cơ chế khí động học của rotor Aeroleaf cải tiến. Trong giai đoạn đầu, thành phần lực cản giúp rotor tạo mô-men khởi động đủ lớn, trong khi tốc độ quay tăng lên, thành phần lực nâng bắt đầu đóng vai trò chi phối. Sự kết hợp này cho phép rotor vừa khởi động hiệu quả vừa duy trì tốc độ quay cao khi tốc độ gió tăng.

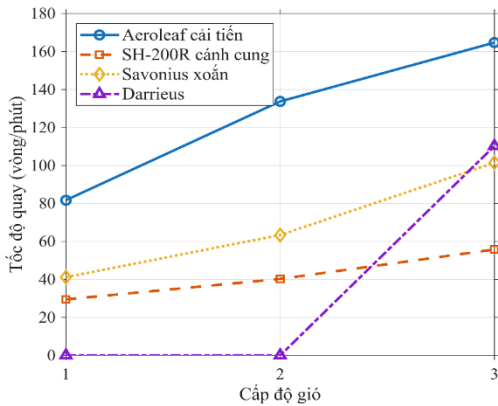
Đường đặc tính của Aeroleaf cải tiến có độ dốc lớn và tăng đều theo tốc độ gió, cho thấy khả năng gia tốc tốt trong toàn bộ dải khảo sát. Darrieus thể hiện đặc trưng phi tuyến: không hoạt động ở dải thấp nhưng tăng nhanh khi vượt qua ngưỡng khởi động. Savonius xoắn và SH-200R tăng gần tuyến tính nhưng với hệ số tăng nhỏ hơn.

Để làm rõ hơn mức độ khác biệt giữa các dạng turbine, việc phân tích phần trăm chênh lệch tốc độ quay giữa các dạng turbine tại từng cấp độ gió khảo sát đã được thực hiện.

3.2.1. So sánh Aeroleaf cải tiến với Savonius xoắn

Để định lượng mức độ vượt trội của dạng Aeroleaf cải tiến so với Savonius xoắn, phần trăm chênh lệch tốc độ quay tại từng cấp độ gió được tính toán và trình bày trong Bảng 4.

Aeroleaf cải tiến gần như đạt tốc độ quay gấp đôi Savonius xoắn ở cấp độ gió thấp (cấp độ gió 1). Khoảng cách này có xu hướng thu hẹp khi tốc độ gió tăng.



Hình 5. Quan hệ giữa tốc độ gió và tốc độ quay của các turbine

Bảng 3. Tốc độ quay trung bình (RPM) của các turbine

Dạng turbine	Cấp độ gió 1	Cấp độ gió 2	Cấp độ gió 3
SH-200R	29,5	40,3	55,8
Aeroleaf cải tiến	81,75	133,75	164,75
Savonius xoắn	41,2	63,4	101,5
Darrieus	0	0	110,3

Bảng 4. Phần trăm chênh lệch tốc độ quay giữa Aeroleaf cải tiến và Savonius xoắn

Cấp độ gió	Chênh lệch (%)
Cấp độ gió 1	+ 98,4%
Cấp độ gió 2	+ 110,9%
Cấp độ gió 3	+ 62,3%

3.2.2. So sánh Aeroleaf cải tiến với SH-200R

Bảng 5 tổng hợp mức độ chênh lệch tốc độ quay giữa Aeroleaf cải tiến và dạng SH-200R, là cơ sở giúp đánh giá mức độ cải thiện về đặc tính động học của turbine Aeroleaf cải tiến. Kết quả cho thấy Aeroleaf cải tiến có hiệu quả vận hành cao hơn (từ 177,1 đến 232%) so với SH-200R ở toàn bộ dải khảo sát. Đặc biệt, tốc độ quay của turbine Aeroleaf được cải thiện đáng kể ở cấp độ 2 so với các cấp độ còn lại

Bảng 5. Phần trăm chênh lệch tốc độ quay giữa Aeroleaf cải tiến và SH-200R

Cấp độ gió	Chênh lệch (%)
Cấp độ gió 1	+ 177,1%
Cấp độ gió 2	+ 232,0%
Cấp độ gió 3	+ 195,2%

3.2.3. Ảnh hưởng của tốc độ gió đến khả năng gia tăng tốc độ quay

Để đánh giá mức độ gia tăng tốc độ quay theo dải tốc độ gió khảo sát, tỷ lệ tăng tốc độ quay từ cấp

độ gió 1 đến cấp độ gió 3 của từng dạng turbine được tính toán và trình bày trong Bảng 6. Thông số này phản ánh khả năng đáp ứng động và mức độ nhạy cảm của rotor đối với sự thay đổi tốc độ gió trong điều kiện gió thấp.

Bảng 6. Tỷ lệ tăng tốc độ quay từ cấp độ gió 1 đến cấp độ gió 3

Turbine	Tỷ lệ tăng tốc độ quay (%)
Aeroleaf cải tiến	+ 101,5%
Savonius xoắn	+ 146,3%
SH-200R	+ 89,2%

Savonius xoắn có tỷ lệ tăng tốc độ quay tương đối lớn khi tốc độ gió tăng, tuy nhiên giá trị tốc độ quay tuyệt đối vẫn thấp hơn Aeroleaf cải tiến. Điều này cho thấy rotor Savonius xoắn có độ nhạy tương đối cao đối với sự thay đổi của tốc độ gió trong dải gió thấp. Ngược lại, Aeroleaf cải tiến đạt tốc độ quay cao hơn ở cùng điều kiện thí nghiệm, cho thấy hiệu quả chuyển đổi năng lượng gió thành chuyển động quay tốt hơn.

Kết quả này cho thấy Aeroleaf cải tiến không chỉ tối ưu về khởi động mà còn duy trì được khả năng chuyển đổi động năng thành chuyển động quay hiệu quả trong dải gió thấp.

3.3. Quan hệ giữa tốc độ gió và điện áp đầu ra

Nhằm đánh giá khả năng phát điện của các dạng turbine trong điều kiện gió thấp, điện áp đầu ra trung bình tại từng cấp độ gió được trình bày trong Bảng 7. Tại cấp độ gió 1 và 2, Aeroleaf cải tiến thể hiện sự vượt trội rõ rệt với điện áp lần lượt là 8 V và 13,1 V, cao hơn đáng kể so với các mẫu còn lại.

Đáng chú ý, tại cấp độ gió 3, turbine Darrieus đạt điện áp 10,6 V, vượt qua Savonius xoắn (9,8 V) và SH-200R (5,35 V), dù vẫn thấp hơn Aeroleaf cải tiến (16,1 V). Sự khác biệt này có thể được giải thích thông qua dữ liệu tốc độ quay tại Bảng 3. Tại cấp độ gió 3, dạng Darrieus đạt tốc độ 110,3 RPM, cao hơn Savonius xoắn (101,5 RPM) và SH-200R (55,8 RPM). Vì điện áp cảm ứng của máy phát điện nam châm vĩnh cửu (PMSG) tỷ lệ thuận với tốc độ góc của rotor, mức điện áp 10,6 V của Darrieus cho thấy sau khi vượt ngưỡng khởi động, rotor đã tiến vào vùng khai thác lực nâng (lift-type) hiệu quả, giúp gia tăng nhanh tốc độ quay. Tuy nhiên, Aeroleaf cải tiến vẫn duy trì vị thế dẫn đầu nhờ tốc độ quay cao nhất (164,75 RPM), minh chứng cho khả năng tối ưu hóa mô-men xoắn và lực nâng trong suốt dải tốc độ gió khảo sát. Mỗi quan hệ giữa tốc độ gió và điện áp đầu ra của các dạng turbine được minh họa ở Hình 6.

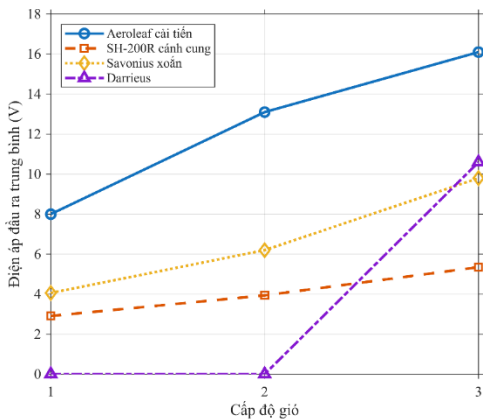
Để làm rõ hơn mức độ khác biệt giữa các dạng turbine, việc phân tích phần trăm chênh lệch điện áp đầu ra giữa các dạng turbine tại từng cấp độ gió khảo sát đã được tiến hành.

3.3.1. So sánh Aeroleaf cải tiến với Savonius

Để định lượng mức cải thiện khả năng phát điện của dạng Aeroleaf cải tiến so với Savonius, phần trăm chênh lệch điện áp đầu ra tại từng cấp độ gió được tính toán và trình bày trong Bảng 8. Chỉ số này cho thấy mức độ vượt trội của Aeroleaf cải tiến trong quá trình chuyển đổi năng lượng trong điều kiện gió thấp.

Bảng 7. Điện áp đầu ra trung bình (Volts) của các dạng turbine tại các cấp độ gió khác nhau

Dạng turbine	Cấp độ gió 1	Cấp độ gió 2	Cấp độ gió 3
SH-200R	2,91	3,94	5,35
Aeroleaf cải tiến	8	13,1	16,1
Savonius xoắn	4,06	6,2	9,8
Darrieus	0	0	10,6



Hình 6. Quan hệ giữa tốc độ gió và điện áp đầu ra của các turbine

Bảng 8. Phần trăm chênh lệch điện áp đầu ra giữa Aeroleaf cải tiến và Savonius

Cấp độ gió	Chênh lệch (%)
Cấp độ gió 1	+ 97,0%
Cấp độ gió 2	+ 111,3%
Cấp độ gió 3	+ 64,3%

Bảng 8 cho thấy điện áp đầu ra của Aeroleaf cải tiến cao hơn Savonius xoắn tại tất cả các cấp độ gió. Mức chênh lệch tăng dần theo tốc độ gió, phản ánh khả năng khai thác năng lượng hiệu quả hơn của dạng Aeroleaf cải tiến. Sự khác biệt này có thể liên quan đến cơ chế khởi động dựa trên lực nâng, giúp

rotor đạt tốc độ quay cao hơn và cải thiện khả năng phát điện trong điều kiện gió thấp.

3.3.2. So sánh Aeroleaf cải tiến với SH-200R

Tương tự, phần trăm chênh lệch điện áp đầu ra giữa dạng Aeroleaf cải tiến và SH-200R tại từng cấp độ gió được tính toán và trình bày trong Bảng 9. Kết quả này cho phép đánh giá mức độ cải thiện khả năng phát điện của thiết kế Aeroleaf cải tiến so với dạng được sử dụng làm đối chứng.

Bảng 9. Phần trăm chênh lệch điện áp đầu ra giữa Aeroleaf cải tiến và SH-200R

Cấp độ gió	Chênh lệch (%)
Cấp độ gió 1	+ 175,0%
Cấp độ gió 2	+ 232,5%
Cấp độ gió 3	+ 200,9%

Điện áp đầu ra tăng gần tuyến tính theo tốc độ gió, phản ánh mối quan hệ trực tiếp với tốc độ quay rotor. Aeroleaf cải tiến thể hiện đặc tính ổn định và tăng đều trong toàn dải đo, trong khi Darrieus có sự gián đoạn ở vùng tốc độ gió thấp.

Do điện áp đầu ra của máy phát phụ thuộc trực tiếp vào tốc độ quay của rotor, nên các turbine có khả năng đạt tốc độ quay cao hơn sẽ tạo ra điện áp lớn hơn. Vì Aeroleaf cải tiến duy trì tốc độ quay cao trong toàn bộ dải tốc độ gió khảo sát nên điện áp đầu ra cũng cao hơn so với các dạng turbine còn lại.

3.4. Đánh giá tổng hợp

Bảng 10 trình bày tổng hợp kết quả thực nghiệm trên cơ sở so sánh các thông số vận hành chính của các dạng turbine, bao gồm tốc độ gió khởi động, tốc độ quay lớn nhất và điện áp đầu ra lớn nhất. Kết quả cho thấy turbine Aeroleaf cải tiến đạt tốc độ gió khởi động thấp nhất (~2,54 m/s) đồng thời đạt tốc độ quay và điện áp đầu ra cao nhất trong toàn bộ dải tốc độ gió khảo sát. Savonius xoắn duy trì khả năng tự khởi động tốt nhưng tốc độ quay và điện áp thấp hơn. Turbine Darrieus không tự khởi động ở vùng gió thấp và chỉ đạt tốc độ quay tương đối cao khi vượt qua ngưỡng vận hành. Trong khi đó, SH-200R hoạt động ổn định nhưng khả năng phát điện thấp hơn so với các dạng còn lại.

Kết quả thực nghiệm cho thấy thiết kế cánh Aeroleaf cải tiến có cơ chế khởi động dựa trên lực nâng và lực cản. Thành phần lực cản tạo mô-men khởi động ở tốc độ gió thấp, trong khi lực nâng giúp rotor duy trì tốc độ quay cao khi vận tốc gió tăng. Nhờ đó turbine Aeroleaf cải tiến đạt hiệu quả vận hành cao hơn so với các dạng turbine còn lại trong dải gió thấp khảo sát.

Kết quả cũng cho thấy thiết kế cánh Aeroleaf cải tiến thể hiện cơ chế khởi động lai giữa lực cản và lực nâng. Thành phần lực cản giúp rotor tạo mô-men khởi động ở tốc độ gió thấp, trong khi lực nâng góp

phần gia tăng tốc độ quay khi tốc độ gió tăng. Sự kết hợp này giúp turbine Aeroleaf cải tiến đạt hiệu quả vận hành cao hơn trong dải gió thấp so với các dạng turbine còn lại.

Bảng 10. Tổng hợp so sánh đặc tính vận hành của các dạng turbine

Dạng turbine	Tốc độ gió khởi động (m/s)	Tốc độ quay lớn nhất (RPM)	Điện áp lớn nhất (V)	Đặc điểm nổi bật
Aeroleaf cải tiến	~2,54	164,75	16,1	Khởi động sớm, RPM và điện áp cao nhất, hoạt động ổn định trong dải gió thấp.
Savonius xoắn	~2,94	101,5	9,8	Tự khởi động tốt, khả năng phát điện khá cao.
Darrieus	~4,32	110,3	10,6	Không tự khởi động ở gió thấp, đạt RPM tương đối cao khi đã khởi động.
SH-200R	~2,98	55,8	5,35	Hoạt động ổn định nhưng khả năng phát điện thấp.

Mặc dù các kết quả thí nghiệm đã cho thấy xu hướng khác biệt tương đối rõ giữa các dạng turbine, tuy nhiên phạm vi đánh giá trong nghiên cứu này vẫn còn một số giới hạn nhất định. Cụ thể, các chỉ tiêu được phân tích chủ yếu bao gồm tốc độ gió khởi động, tốc độ quay của rotor và điện áp đầu ra của hệ thống phát điện. Các đại lượng cơ học như mô-men xoắn và công suất cơ học của rotor chưa được đo trực tiếp trong hệ thống thí nghiệm hiện tại. Do đó, việc xác định hệ số công suất (C_p) chưa được thực hiện trong nghiên cứu này, đây là một chỉ tiêu thường được sử dụng để đánh giá hiệu quả chuyển đổi năng lượng của turbine gió.

Ngoài ra, các thí nghiệm được tiến hành trong môi trường phòng thí nghiệm với nguồn gió nhân tạo từ quạt tạo gió nhằm đảm bảo tính ổn định và khả năng lặp lại của điều kiện thử nghiệm. Mặc dù cách tiếp cận này giúp so sánh tương đối giữa các cấu hình turbine trong cùng điều kiện, các đặc trưng phức tạp của gió tự nhiên như nhiễu loạn, dao động theo thời gian và phân bố không gian của trường gió chưa được phản ánh đầy đủ. Trong các nghiên cứu tiếp theo, việc tích hợp hệ đo mô-men xoắn cần được thực hiện để xác định hệ số công suất, cùng với các thử nghiệm trong điều kiện gió tự nhiên hoặc hầm gió chuyên dụng, sẽ giúp đánh giá toàn diện hơn

hiệu suất khí động và khả năng khai thác năng lượng của các cấu hình turbine được đề xuất.

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, việc so sánh thực nghiệm đặc tính khởi động và khả năng phát điện của bốn dạng turbine gió trục đứng quy mô nhỏ đã được tiến hành, bao gồm: Aeroleaf cải tiến, Savonius xoắn, Darrieus và SH-200R trong điều kiện gió thấp, với diện tích quét tương đương (~0,305 m²) và cùng hệ thống máy phát. Kết quả cho thấy Aeroleaf cải tiến có tốc độ gió khởi động thấp nhất (2,54 m/s) và đạt tốc độ quay và điện áp đầu ra cao nhất trong toàn bộ dải tốc độ gió khảo sát. Savonius xoắn và SH-200R có khả năng tự khởi động tốt nhưng tốc độ quay và điện áp thấp hơn. Darrieus không tự khởi động ở vùng gió thấp và chỉ đạt hiệu quả khi vượt qua ngưỡng vận hành tối thiểu.

Các chỉ tiêu đánh giá cho thấy trong dải tốc độ gió đặc trưng khoảng 2,5 – 3 m/s, dạng Aeroleaf cải tiến cho thấy hiệu quả tổng thể cao hơn trong điều kiện khảo sát về khả năng khởi động, tốc độ quay và điện áp đầu ra so với các dạng còn lại. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở tham khảo cho việc lựa chọn dạng turbine gió trục đứng hoạt động hiệu quả trong điều kiện gió thấp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Afify, R., Saber, E., & Awad, H. (2025). Investigation of an innovative savonius turbine in practice. *Scientific Reports*, 15(1), 6937. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88544-w>

Elangovan, K., & Pillai, S. N. (2025). Effect of Pitch Angle on Structural and Aerodynamic Characteristics of Vertical-Axis Wind Turbines (VAWTs) Using Leading-Edge Protuberance

Blades. *Energies*, 18(2), 286. <https://doi.org/10.3390/en18020286>

Hau, E. (2013). *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics* (3rd ed.). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-27151-9>

Gallegos-Molina, J.-S., & Chavero-Navarrete, E. (2025). A Systematic Review of Technological Strategies to Improve Self-Starting in H-Type

- Darrieus VAWT. *Sustainability*, 17(17), 7878.
<https://doi.org/10.3390/su17177878>
- Ghafoorian, F., Enayati, E., Mirmotahari, S. R., & Wan, H. (2024). Self-Starting Improvement and Performance Enhancement in Darrieus VAWTs Using Auxiliary Blades and Deflectors. *Machines*, 12(11), 806.
<https://doi.org/10.3390/machines12110806>
- Giri Ajay, A., Morgan, L., Wu, Y., Bretos, D., Cascales, A., Pires, O., & Ferreira, C. (2024). Aerodynamic model comparison for an X-shaped vertical-axis wind turbine. *Wind Energy Science*, 9, 453-470.
<https://doi.org/10.5194/wes-9-453-2024>
- Hosseinian, S. M., Mohseni, M., & Karimi, M. S. (2026). Advanced blade profiles for improved efficiency in Savonius wind turbines: the aeroleaf case study. *Scientific Reports*, 16(1), 1022.
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-30636-8>
- Ibrahim, A., Saeed, R., & Saeed, R. (2022). A Comprehensive Review of Vertical Axis Wind Turbines for Urban Usage. *International Journal of Novel Research and Development (IJNRD)*, 7(4), 336-343.
- IRENA. (2024). *Renewable capacity statistics 2024*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2009). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
<https://doi.org/10.1002/9781119994367>
- Năng, T. Q., & Hải, T. T. T. (2025). Đánh giá tiềm năng tài nguyên năng lượng gió mục 100 m trên lãnh thổ Việt Nam. *Tạp chí Khoa học Biển đổi khí hậu*, 33, 12-23.
<https://doi.org/10.55659/2525-2496/33.110635>
- Pan, J., Ferreira, C., & Zuijlen, A. (2024). Performance analysis of an idealized Darrieus–Savonius combined vertical axis wind turbine. *Wind Energy*, 27, 612-627.
<https://doi.org/10.1002/we.2904>
- Rezaeiha, A., Montazeri, H., & Blocken, B. (2018). Towards optimal aerodynamic design of vertical axis wind turbines: Impact of solidity and number of blades. *Energy*, 165, 1129-1148.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.192>
- Roy, S., & Saha, U. K. (2013). Review of experimental investigations into the design, performance and optimization of the Savonius rotor. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 227(4), 528-542.
<https://doi.org/10.1177/0957650913480992>
- Hosseini, S. D., Botez, R. M., Davari, M. S., Chowdhury, H., & Hosseinzadeh, H. (2024). Numerical and experimental investigation of Darrieus vertical axis wind turbines to enhance self-starting at low wind speeds. *Results in Engineering*, 24, 103240.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103240>
- Singh, P., Jaiswal, V., Roy, S., Tyagi, A., Kumar, G., & Singh, R. K. (2024). *Quantum-Based Salp Swarm Algorithm Driven Design Optimization of Savonius Wind Turbine–Cylindrical Deflector System*. arXiv:2403.04876.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.04876>
- Son, N. T., Nghiê, N. C., Thinh, Q. N. (2026). Cải tiến thiết kế cánh Aeroleaf nhằm nâng cao đặc tính khởi động và khả năng phát điện của turbine gió trục đứng trong điều kiện gió thấp. *TNU Journal of Science and Technology*, 231(2), 333-341.
<https://doi.org/10.34238/tnu-jst.14673>
- Su, R., Gao, Z., Chen, Y., Zhang, C., & Wang, J. (2022). Large-eddy simulation of the influence of hairpin vortex on pressure coefficient of an operating horizontal axis wind turbine. *Energy Conversion and Management*, 267, 115864.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115864>
- Thủ tướng Chính phủ. (2023). *Quyết định phê duyệt Quy hoạch phát triển điện lực quốc gia thời kỳ 2021–2030, tầm nhìn đến năm 2050* (Số: 500/QĐ-TTg).
<https://xaydungchinhhsach.chinhphu.vn/toan-van-quy-hoach-phat-trien-dien-luc-quoc-gia-11923051616315244.htm>
- Toor, Z., Bahaidarah, H. M., Zayed, M. E., & Rehman, S. (2026). Research on aerodynamic performances of the vertical-axis wind turbines under different wind gust configurations: comparative numerical modeling. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, 9(1), 99.
<https://doi.org/10.1007/s41939-025-01152-z>