DESIGN IMPROVEMENT OF AEROLEAF BLADES TO ENHANCE STARTING PERFORMANCE AND ELECTRICAL POWER OUTPUT OF A VERTICAL-AXIS WIND TURBINE IN LOW WIND SPEED CONDITIONS

Nguyen Thai Son*, Nguyen Chanh Nghiem, Quach Ngoc Thinh
College of Engineering - Can Tho University

ARTICLE INFO

Received: 28/01/2026
Revised: 28/02/2026
Published: 28/02/2026

KEYWORDS

3D printing
Improved
Aeroleaf blades
Renewable energy
Vertical axis wind turbine

ABSTRACT

This study focuses on improving the blade design of a vertical-axis wind turbine to enhance its starting characteristics and power generation capability under low wind speed conditions (2–5 m/s), which are particularly suitable for urban environments. A trial-and-error based experimental design approach combined with 3D printing technology and repeated measurements was employed to develop and evaluate improved two-blade and three-blade Aeroleaf configurations. Key operational parameters, including output voltage, cut-in wind speed, and rotor rotational speed, were experimentally measured and compared with those of a commercial SH-200R wind turbine under identical test conditions. The results indicate that the improved three-blade Aeroleaf configuration exhibits superior performance, achieving an average cut-in wind speed of only 2.53–2.56 m/s, which is significantly lower than that of the SH-200R turbine (2.85–3.03 m/s). This study proposes an effective experimental approach for vertical-axis wind turbine blade design and provides valuable reference data for small-scale wind power applications in urban areas.

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

Nguyễn Thái Sơn*, Nguyễn Chánh Nghiệm, Quách Ngọc Thịnh
Trường Bách Khoa - Đại học Cần Thơ

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 28/01/2026
Ngày hoàn thiện: 28/02/2026
Ngày đăng: 28/02/2026

TỪ KHÓA

In 3D
Cánh quạt
Aeroleaf cải tiến
Năng lượng tái tạo
Turbine gió trục đứng

TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung cải tiến thiết kế cánh của turbine gió trục đứng nhằm nâng cao đặc tính khởi động và khả năng phát điện trong điều kiện gió thấp (2–5 m/s), đặc biệt phù hợp với môi trường đô thị. Phương pháp thiết kế thực nghiệm dựa trên nguyên lý lặp lại (trial-and-error) kết hợp với công nghệ in 3D và các phép đo lặp lại được áp dụng để phát triển và đánh giá các cấu hình cánh Aeroleaf hai cánh và ba cánh. Các thông số vận hành chính, bao gồm điện áp đầu ra, tốc độ gió khởi động và tốc độ quay rotor, được đo đạc thực nghiệm và so sánh với turbine thương mại SH-200R trong cùng điều kiện thử nghiệm. Kết quả cho thấy cấu hình Aeroleaf ba cánh cải tiến thể hiện hiệu quả vượt trội, với tốc độ gió khởi động trung bình chỉ 2,53–2,56 m/s, thấp hơn đáng kể so với turbine SH-200R (2,85–3,03 m/s). Nghiên cứu đề xuất một hướng tiếp cận thực nghiệm hiệu quả trong thiết kế cánh turbine gió trục đứng và cung cấp dữ liệu tham khảo có giá trị cho các ứng dụng phát điện quy mô nhỏ trong khu vực đô thị.

DOI: https://doi.org/10.34238/tnu-jst.14673

* Corresponding author. *Email: thaison@ctu.edu.vn*

1. Giới thiệu

Trong bối cảnh nhu cầu năng lượng ngày càng gia tăng cùng với các vấn đề nghiêm trọng về biến đổi khí hậu và suy giảm tài nguyên hóa thạch, việc phát triển và ứng dụng các nguồn năng lượng tái tạo trở thành xu hướng tất yếu [1], [2]. Trong số đó, năng lượng gió được xem là một trong những nguồn năng lượng sạch, bền vững và có tiềm năng khai thác lớn. Tuy nhiên, tại nhiều khu vực ở Việt Nam, đặc biệt là Đồng bằng sông Cửu Long, tốc độ gió trung bình thường ở mức thấp và biến động theo mùa, gây hạn chế cho hiệu quả vận hành của các turbine gió truyền thống [3].

Turbine gió trục đứng (VAWT) được đánh giá là phù hợp hơn so với turbine gió trục ngang (HAWT) nhờ khả năng hoạt động độc lập với hướng gió, cấu trúc gọn nhẹ, dễ lắp đặt và bảo trì, đặc biệt phù hợp với môi trường đô thị và khu dân cư [4] - [6]. Tuy nhiên, nhược điểm chính của VAWT là khả năng khai thác năng lượng và đặc tính vận hành còn hạn chế so với HAWT, do tổn thất khí động học, mô men khởi động nhỏ, nhất là trong điều kiện gió thấp [5], [7]. Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu đã tập trung cải tiến hình dạng và cấu hình cánh quạt nhằm nâng cao khả năng tự khởi động và khả năng phát điện của VAWT, tiêu biểu là các cấu hình và giải pháp tối ưu hóa thiết kế được trình bày trong các tổng quan gần đây [8] - [10]. Mặc dù đạt được một số kết quả tích cực thông qua mô phỏng CFD và thử nghiệm quy mô nhỏ, phần lớn các nghiên cứu dừng lại ở mức mô phỏng hoặc mô hình quy mô nhỏ, trong khi đánh giá thực nghiệm so sánh trực tiếp với turbine thương mại trong điều kiện gió thấp còn hạn chế [8], [10].

Xuất phát từ thực tế trên, nghiên cứu này được thực hiện nhằm thiết kế, chế tạo và thử nghiệm các mẫu cánh quạt Aeroleaf cải tiến cho turbine gió trục đứng, hướng tới mục tiêu giảm tốc độ gió khởi động trong dải tốc độ gió thấp. Kết quả nghiên cứu được so sánh với một turbine thương mại SH-200R nhằm đánh giá khả năng ứng dụng thực tế của các cấu hình cánh cải tiến. Mục tiêu chính của nghiên cứu là giảm tốc độ gió khởi động và đánh giá khả năng ứng dụng thực tế thông qua so sánh với turbine thương mại trong cùng điều kiện gió thấp.

2. Phương pháp nghiên cứu

Trong điều kiện gió thấp, khả năng tự khởi động và duy trì trạng thái quay ổn định là một trong những yếu tố quan trọng quyết định hiệu quả vận hành của turbine gió trục đứng. Đặc tính này chịu ảnh hưởng trực tiếp bởi hình dạng cánh, cấu hình rotor và điều kiện dòng chảy xung quanh turbine. Một thiết kế cánh phù hợp có thể giúp cải thiện khả năng bắt gió, giảm tổn thất khí động và nâng cao tốc độ quay, từ đó tăng khả năng phát điện trong vùng vận tốc gió.

Công suất gió khả dụng trong dòng khí được xác định theo [1], [2], [11]:

$$P_w = \frac{1}{2}\,\rho A V^3 \tag{1}$$

Trong đó P_w là công suất gió khả dụng (W), ρ là khối lượng riêng của không khí (kg/m³), V là vận tốc gió đầu vào (m/s). A là diện tích quét của turbine (m²). Biểu thức (1) thể hiện năng lượng động học của dòng gió, chứ không phải công suất thực tế mà turbine có thể thu được. Trên thực tế, do các giới hạn khí động học và tổn hao cơ – điện, turbine chỉ có thể khai thác một phần công suất gió này.

Công suất cơ lý thuyết của turbine thường được biểu diễn thông qua hệ số công suất C_p [1], [2]:

$$P_t = C_p . P_w = \frac{1}{2}\,\rho A V^3 C_p \tag{2}$$

Trong đó, C_p là hệ số công suất, phản ánh khả năng chuyển đổi năng lượng gió thành công suất cơ của turbine. Giá trị C_p phụ thuộc vào hình dạng cánh, cấu hình rotor, số lượng cánh, tỉ số tốc độ đầu mút và điều kiện dòng chảy. Theo giới hạn Betz, giá trị cực đại lý thuyết của C_p là 0,593.

Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, do giới hạn về thiết bị đo mô-men và công suất cơ, bài báo không tập trung đánh giá hệ số công suất C_p. Thay vào đó, các chỉ tiêu thực nghiệm gồm tốc độ quay rotor và điện áp đầu ra của máy phát được sử dụng để đánh giá đặc tính khởi động và khả năng phát điện của turbine trong điều kiện gió thấp. Các đại lượng này phản ánh trực tiếp trạng

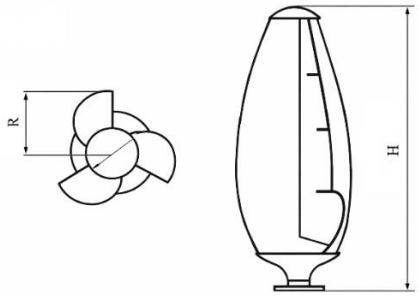
thái vận hành thực tế của turbine, đặc biệt có ý nghĩa trong các ứng dụng phát điện quy mô nhỏ, nơi yêu cầu turbine có khả năng tự khởi động và tạo điện áp đầu ra ổn định ở vận tốc gió thấp.

Đối với turbine gió trục đứng dạng Aeroleaf, diện tích quét A (m²) được xác định bằng tích giữa đường kính rotor D và chiều cao rotor H [4], [12], theo biểu thức:

$$A = D \times H \quad (3)$$

Trong đó, D = 2R, với R là bán kính rotor.

Hình 1 minh họa hình học tổng thể của turbine gió Aeroleaf và cách xác định các kích thước đặc trưng, trong đó chiều cao rotor H được thể hiện trực tiếp, còn đường kính rotor D được xác định gián tiếp thông qua bán kính R.



Hình 1. *Sơ đồ hình học tổng thể của turbine gió trục đứng dạng Aeroleaf và các kích thước đặc trưng*

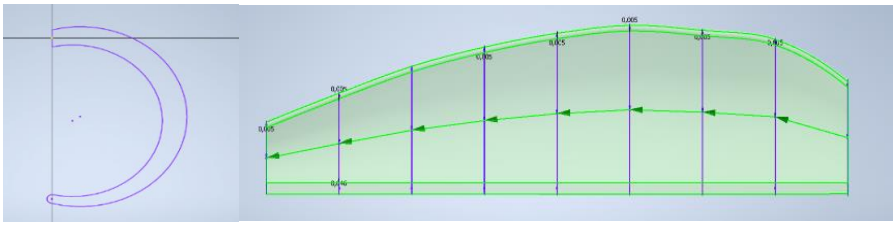
Trong nghiên cứu này, phương pháp tiếp cận kết hợp giữa phân tích lý thuyết và thực nghiệm được áp dụng nhằm đánh giá và cải thiện đặc tính khởi động cũng như khả năng phát điện của turbine gió trục đứng trong điều kiện gió thấp. Kích thước tổng thể của turbine được giữ không đổi trong toàn bộ quá trình nghiên cứu, do đó diện tích quét A không thay đổi giữa các cấu hình cánh. Vì vậy, sự khác biệt về đặc tính khởi động và khả năng phát điện chủ yếu xuất phát từ sự thay đổi hình dạng và số lượng cánh Aeroleaf.

Song song với phân tích lý thuyết, nghiên cứu thực nghiệm được triển khai nhằm kiểm chứng tính khả thi của các phương án thiết kế thông qua việc chế tạo mô hình turbine bằng công nghệ in 3D và tiến hành đo đạc tốc độ quay rotor và điện áp đầu ra trong điều kiện gió thực nghiệm. Các kết quả thu được là cơ sở khoa học để đánh giá mức độ cải thiện đặc tính vận hành và khả năng phát điện của turbine gió trục đứng trong vùng vận tốc gió thấp, từ đó đề xuất hướng cải tiến thiết kế phù hợp cho các ứng dụng phát điện quy mô nhỏ.

2.1. Thiết kế và chế tạo cánh quạt

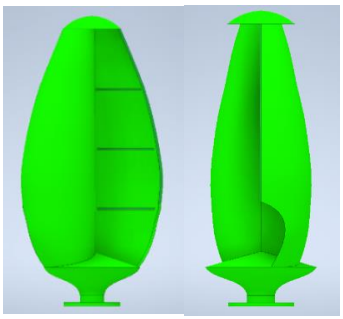
Quy trình thiết kế cánh quạt được thực hiện trên phần mềm Autodesk Inventor, dựa trên nguyên lý cánh Savonius cải tiến nhằm tăng mô-men khởi động và cải thiện đặc tính vận hành của turbine gió trục đứng trong điều kiện gió thấp [13]. Biên dạng cánh được xây dựng từ mặt cắt hai chiều (2D sketch) có dạng cung tròn, phù hợp với turbine hoạt động ở vùng số Reynolds thấp [14].

Các mặt cắt được bố trí đều theo chiều cao cánh và sử dụng công cụ Loft để tạo khối ba chiều liên tục, đảm bảo tính liên tục hình học và độ ổn định kết cấu. Tổng cộng có 10 mặt cắt được xây dựng với hình dạng tương tự nhưng khác nhau về kích thước tổng thể trên các mặt phẳng song song, như thể hiện trong Hình 2, nhằm tạo nên hình dạng cánh cải tiến có khả năng khai thác năng lượng hiệu quả hơn ở vùng gió thấp.



Hình 2. *Bản vẽ 2D của 1 sketch và tạo khối bằng công cụ Loft phần thân của cánh quạt*

Các mặt cắt hai chiều được liên kết bằng phương pháp Loft để tạo thành mô hình ba chiều hoàn chỉnh của thân cánh, như thể hiện trong Hình 1. Dựa trên mô hình thân cánh này, cấu trúc đối xứng của cánh quạt được xây dựng nhằm đảm bảo sự cân bằng hình học và ổn định khi vận hành. Sau đó, các chi tiết phụ trợ như phần chóp và phần đế cánh được bổ sung để hoàn thiện mô hình turbine gió trục đứng, tạo thành cấu hình tổng thể như trình bày trong Hình 3.



Hình 3. *Bản vẽ 3D phần cánh quạt Aeroleaf*

Hình 4. *Mô hình thực tế cánh quạt Aeroleaf*

Sau khi hoàn tất thiết kế trên phần mềm Autodesk Inventor, các mô hình ba chiều được xuất sang định dạng STL và chế tạo bằng công nghệ in 3D FDM. Vật liệu in sử dụng là PLA Plus (Elegoo) với đường kính sợi 1,75 mm. Kết quả chế tạo thu được mô hình cánh quạt Aeroleaf dạng tiêu chuẩn, như minh họa trong Hình 4.

Trong nghiên cứu này, các phương án thiết kế cánh quạt được phát triển theo hướng giảm tốc độ gió khởi động và đánh giá khả năng ứng dụng thực tế trong điều kiện gió thấp. Quá trình thiết kế tập trung phân tích các nguyên nhân làm hạn chế khả năng khởi động của turbine, đặc biệt khả năng đón gió của cánh quạt.

Cấu hình Aeroleaf thường hai cánh ban đầu được thử nghiệm, tuy nhiên cấu hình tồn tại các "góc chết" (dead angle) tại đó mô men khí động tác dụng lên rotor gần như bằng không, làm suy giảm khả năng tự khởi động của turbine. Trên cơ sở đó, chiều cao cánh được thay đổi nhằm cải thiện khả năng thu nhận năng lượng gió, hình thành cấu hình Aeroleaf cải tiến hình dạng cánh. Mặc dù cấu hình này cho thấy khả năng khởi động được cải thiện, hiện tượng góc chết vẫn còn tồn tại, ảnh hưởng đến hiệu quả vận hành. Để tiếp tục khắc phục các hạn chế trên, cấu hình Aeroleaf cải tiến số lượng cánh được đề xuất với số cánh tăng lên, giúp phân bố lực khí động đồng đều hơn, loại bỏ góc chết và nâng cao khả năng đón gió theo nhiều hướng. Nhờ đó, turbine có khả năng khởi động sớm hơn trong điều kiện gió thấp.

Hình 5 là ba cấu hình cánh quạt được thiết kế và chế tạo bao gồm: (i) Aeroleaf thường với hai cánh; (ii) Aeroleaf cải tiến hình dạng nhằm gia tăng diện tích đón gió; và (iii) Aeroleaf cải tiến số lượng cánh với ba cánh phân bố đều theo chu vi rotor. Các mô hình sau khi hoàn thiện được xuất sang định dạng STL và chế tạo bằng công nghệ in 3D FDM sử dụng vật liệu PLA Plus. Công nghệ in 3D cho phép chế tạo nhanh các mẫu thử với độ chính xác hình học cao, thuận lợi cho việc đánh giá và so sánh thực nghiệm giữa các cấu hình cánh khác nhau (Bảng 1).

Bảng 1. *Thông số và kích thước tổng thể của từng loại cánh quạt*

Thông số	Cánh quạt 2 cánh thường	Cánh quạt 2 cánh cải tiến hình dạng cánh	Aeroleaf cải tiến số lượng cánh
Chiều cao tổng thể (mm)	828,5	695,25	828,5
Chiều rộng tổng thể (mm)	368	439,23	368
Diện tích quét của turbine (m^2)	0,305	0,305	0,305
Số lượng cánh	2	2	3
Góc mở giữa 2 mép cánh (độ)	180	180	120
Lỗ trục gắn (mm)	32	32	32

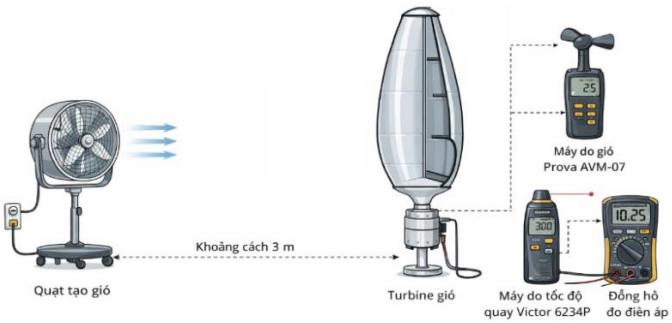
2.2. Phương pháp thực nghiệm

2.2.1. Sơ đồ bố trí thí nghiệm

Bố trí thí nghiệm được thiết lập trong phòng thí nghiệm, gồm quạt tạo gió, turbine thử nghiệm, hệ thống đo tốc độ gió, tốc độ quay và điện áp đầu ra. Turbine được đặt cố định trên giá đỡ, trục rotor thẳng đứng, hướng gió thổi vuông góc với mặt phẳng quét của rotor. Khoảng cách từ nguồn gió đến tâm turbine được giữ không đổi là 3 m nhằm đảm bảo trường gió tương đối ổn

định và giảm ảnh hưởng của nhiễu loạn dòng chảy. Sơ đồ bố trí thí nghiệm được trình bày trong Hình 6.

Hình 5. *Các cấu hình cánh quạt Aeroleaf*



Hình 6. *Sơ đồ bố trí thí nghiệm*

2.2.2. Nguồn gió và điều kiện thí nghiệm

Nguồn gió nhân tạo được tạo bởi quạt công nghiệp nhiều cấp tốc độ. Vận tốc gió tại vị trí rotor được điều chỉnh trong khoảng 2–5 m/s, phù hợp với điều kiện gió thấp đặc trưng cho khu vực đô thị và Đồng bằng sông Cửu Long.

Tốc độ gió được đo trực tiếp tại mặt phẳng quét của turbine bằng máy đo tốc độ gió cầm tay, và được duy trì ổn định trong suốt mỗi lượt đo. Nhiệt độ môi trường trong phòng thí nghiệm dao động trong khoảng 28–32°C.

2.2.3. Thiết bị đo và độ chính xác

Các thiết bị đo sử dụng trong nghiên cứu bao gồm:

- Máy đo tốc độ gió Prova AVM-07, độ phân giải 0,01 m/s, sai số ±3%;
- Máy đo tốc độ quay laser Victor 6234P, độ phân giải 0,1 vòng/phút;
- Đồng hồ đo điện vạn năng số Sanwa CD800A, độ chính xác ±0,5%.

Các thiết bị được hiệu chuẩn trước khi tiến hành thí nghiệm nhằm đảm bảo độ tin cậy của số liệu đo.

2.2.4. Quy trình đo

Quy trình đo được thực hiện theo các bước:

Bước 1: Điều chỉnh quạt tạo gió theo từng cấp độ.

Bước 2: Đo và ghi nhận tốc độ gió thực tế.

Bước 3: Theo dõi quá trình khởi động của turbine để xác định tốc độ gió khởi động.

Bước 4: Khi turbine đạt trạng thái quay ổn định, tiến hành đo tốc độ quay rotor (vòng/phút) và điện áp đầu ra của máy phát. Điện áp đầu ra được đo trong điều kiện hở mạch, tức là không mắc tải ngoài vào máy phát. Mục đích của phép đo này nhằm đánh giá đặc tính khởi động và khả năng tạo điện áp ban đầu của turbine trong điều kiện gió thấp, thay vì xác định công suất phát điện thực tế. Việc đo điện áp hở mạch cho phép phản ánh trực tiếp trạng thái vận hành của rotor và khả năng tạo suất điện động của máy phát khi turbine bắt đầu quay.

Bước 5: Mỗi phép đo được lặp lại bốn lần, sau đó lấy giá trị trung bình nhằm giảm sai số.

Để đánh giá hiệu quả của các phương án cải tiến, kết quả thực nghiệm của các mẫu cánh Aeroleaf được so sánh trực tiếp với turbine gió thương mại SH-200R (Hình 7, Bảng 2) trong cùng điều kiện thử nghiệm. Việc so sánh được thực hiện dựa trên các tiêu chí chính gồm tốc độ gió khởi động, tốc độ quay trung bình và điện áp đầu ra.

Hình 7. *Turbine gió SH-200R*

Bảng 2. *Thông số cánh quạt Turbine SH-200R*

Thông số kỹ thuật	Giá trị (chi tiết)
Loại cánh quạt	SH-200R
Công suất định mức	200 W
Điện áp định mức	12 V hoặc 24 V
Tốc độ gió khởi động	3 m/s
Tốc độ gió định mức	12 m/s
Tốc độ gió giới hạn	45 m/s
Đường kính Turbine	900 mm
Chiều cao Turbine	340 mm
Diện tích quét của turbine	0,305 (m^2)
Số lượng cánh	5 cánh
Máy phát điện	Máy phát điện nam châm vĩnh cửu
Nhiệt độ hoạt động	- 40^0C ~ 80^0C

Các chỉ tiêu đánh giá:
- Tốc độ gió khởi động (tốc độ gió tối thiểu để cánh quạt bắt đầu quay).
- Tốc độ quay (vòng/phút).
- Điện áp đầu ra.

2.2.5. Phương pháp xử lý số liệu

Số liệu thu thập được xử lý bằng phương pháp thống kê mô tả. Giá trị trung bình của mỗi thông số được sử dụng để phân tích và so sánh giữa các cấu hình cánh khác nhau. Việc so sánh được thực hiện trong cùng điều kiện gió và cùng thiết lập thí nghiệm nhằm đảm bảo tính khách quan và khả năng tái lập của kết quả.

3. Kết quả và bàn luận

Bảng 3. *Thông số đo thực tế của cánh quạt Turbine gió SH-200R*

Số lần đo	Cấp độ gió 1				Cấp độ gió 2				Cấp độ gió 3			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Tốc độ gió khởi động (m/s)	2,9	2,8	2,9	2,8	2,9	2,85	3,0	3,05	3	3,1	2,97	3,03
Tốc độ gió (m/s)	3,0	3,1	2,97	3	3,8	3,87	3,8	3,84	5,5	5,5	5,45	5,55
Điện áp (V)	2,9	3	2,85	2,9	3,9	4,0	3,9	3,96	5,4	5,33	5,27	5,41
Tốc độ quay (vòng/phút)	30	31	28	29	40	42	39	40	59	57	53	54

Tiến hành thực nghiệm mô hình trong điều kiện thực tế tại phòng thí nghiệm khu 2 - Đại học Cần Thơ. Với nghiên cứu trong bài báo này sử dụng Máy đo tốc độ động cơ Laser VICTOR 6234P, đồng hồ đo điện vạn năng, máy đo tốc độ gió Prova AVM-07 để đo lần lượt các thông số:

tốc độ quay của cánh quạt (vòng/phút), điện áp đầu ra của máy phát và tốc độ gió thể hiện ở Bảng 3, Bảng 4, Bảng 5 và Bảng 6. Mỗi thông số đo được tiến hành bốn lần và giá trị trung bình được sử dụng phân tích để đảm bảo độ tin cậy của kết quả.

Thông số ở Bảng 3 được thu thập của cánh quạt Turbine SH-200R để so sánh với các mô hình cánh quạt Turbine cải tiến để cho thấy trực quan hơn về tính khả thi khi ứng dụng thực tế của các mô hình cải tiến được nghiên cứu và chế tạo.

Bảng 4. *Thông số đo thực tế của cánh quạt Aeroleaf thường*

	Cấp độ gió 1				**Cấp độ gió 2**				**Cấp độ gió 3**			
Số lần đo	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**
Tốc độ gió khởi động (m/s)	0	0	0	0	3,41	3,39	3,44	3,42	3,48	3,52	3,47	3,53
Tốc độ gió (m/s)	3	3	3	3	3,85	3,8	3,79	3,87	5,48	5,52	5,45	5,6
Điện áp (V)	0	0	0	0	8	7,8	7,5	8,4	19,2	19,9	19	20,4
Tốc độ quay (vòng/phút)	0	0	0	0	82	81	79	88	201	206	199	210

Bảng 5. *Thông số đo thực tế của cánh quạt Aeroleaf cải tiến hình dạng cánh*

	Cấp độ gió 1				**Cấp độ gió 2**				**Cấp độ gió 3**			
Số lần đo	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**
Tốc độ gió khởi động (m/s)	0	0	0	0	3	2,99	3,17	3,03	3,14	3,08	3,03	3,07
Tốc độ gió (m/s)	3	3	3	3	3,77	3,73	3,8	3,8	5,62	5,48	5,53	5,5
Điện áp (V)	0	0	0	0	5,1	4,9	5,3	5,3	15,5	14,6	15	14,8
Tốc độ quay (vòng/phút)	0	0	0	0	51	50	55	54	158	147	153	150

Bảng 6. *Thông số đo thực tế của cánh quạt Aeroleaf cải tiến số lượng cánh*

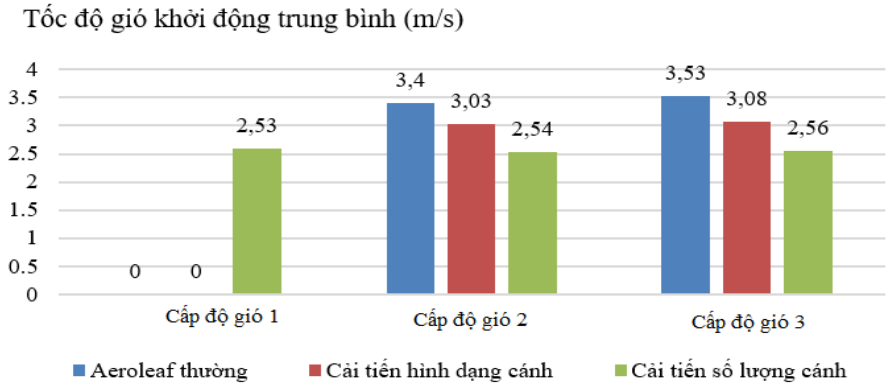
	Cấp độ gió 1				**Cấp độ gió 2**				**Cấp độ gió 3**			
Số lần đo	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**
Tốc độ gió khởi động (m/s)	2,51	2,52	2,53	2,55	2,5	2,55	2,57	2,55	2,57	2,54	2,59	2,57
Tốc độ gió (m/s)	3,02	2,95	3,1	2,99	3,79	3,83	3,86	3,8	5,52	5,6	5,54	5,57
Điện áp (V)	8,1	7,6	8,4	7,9	12,8	13,2	13,4	13	15,8	16,5	15,9	16,2
Tốc độ quay (vòng/phút)	83	77	87	80	129	135	137	134	161	170	163	165

Số liệu Bảng 4, Bảng 5 và Bảng 6 thu được có xét đến góc chết. Kết quả đo lường cho thấy ở cấp độ gió từ quạt thấp (cấp độ gió 1) chỉ có cánh quạt Aeroleaf cải tiến số lượng cánh là khởi động được và hoạt động nên có thể nhận thấy cánh quạt loại Aeroleaf cải tiến số lượng cánh hoạt động tốt ở tốc độ gió thấp. Ngược lại cánh quạt Aeroleaf thường khởi động không tốt ở tốc độ gió thấp nhưng khi tốc độ gió ở cùng 1 mức gió cao (Cấp độ gió 3) lại cho đặc tính phát điện tốt nhất.

Cánh quạt Aeroleaf thường ban đầu cần gió mạnh mới quay, với tốc độ khởi động trung bình 3,4–3,5 m/s, nên kém hiệu quả trong điều kiện gió thấp. Mẫu cải tiến hình dạng cho thấy cải thiện rõ rệt, tốc độ khởi động giảm còn khoảng 3,0 m/s. Đáng chú ý nhất là mẫu cải tiến tăng số lượng cánh, chỉ cần 2,5 m/s để bắt đầu quay, thể hiện khả năng tự khởi động vượt trội trong gió thấp.

Từ biểu đồ Hình 8 cho thấy thiết kế cánh quạt ba cánh giúp turbine khởi động dễ hơn và phù hợp với điều kiện gió thấp tại khu dân cư. Việc giảm chiều cao và tăng chiều ngang giúp cải thiện khả năng bắt gió dù tốc độ quay không vượt trội. Trong khi đó, mẫu 2 cánh thường tuy cho tốc độ quay của cánh quạt (vòng/phút) và điện áp cao hơn nhưng kém hiệu quả ở gió thấp. Nhìn chung,

mẫu Aeroleaf cải tiến ba cánh là lựa chọn tối ưu cho khả năng khởi động sớm trong môi trường gió thấp.



Hình 8. *Biểu đồ biểu diễn tốc độ gió khởi động trung bình của các dạng cánh quạt*

Bảng 7. *Bảng số liệu so sánh Aeroleaf cải tiến số lượng cánh và turbine gió thương mại SH-200R*

Tiêu chí	Cấp độ gió	Aeroleaf cải tiến số lượng cánh	SH-200R
Tốc độ gió khởi động trung bình (m/s)	1	2,53	2,85
	2	2,54	2,95
	3	2,56	3,03
Tốc độ quay (vòng/phút)	1	81,75	29,5
	2	133,75	40,3
	3	164,75	55,8
Điện áp đầu ra trung bình (V)	1	8,0	2,91
	2	13,1	3,94
	3	16,1	5,35

Kết quả thực nghiệm trình bày trong Bảng 7 cho thấy mô hình Aeroleaf cải tiến số lượng cánh có khả năng khởi động tốt và vận hành ổn định trong điều kiện gió thấp. Tốc độ gió khởi động trung bình của mô hình, được tính trung bình từ ba cấp độ gió khảo sát, đạt khoảng 2,54 m/s. Ứng với các cấp độ gió 1, 2 và 3, tốc độ quay trung bình lần lượt đạt 81,75 vòng/phút, 133,75 vòng/phút và 164,75 vòng/phút, trong khi điện áp đầu ra tương ứng đạt 8,0 V, 13,1 V và 16,1 V, cho thấy xu hướng tăng ổn định của các thông số vận hành theo mức gió.

So sánh với cánh quạt SH-200R cho thấy sự khác biệt rõ rệt về hiệu suất làm việc. Tốc độ gió khởi động trung bình của SH-200R, tính theo ba cấp độ gió, đạt khoảng 2,94 m/s, cao hơn so với mô hình Aeroleaf cải tiến số lượng cánh. Bên cạnh đó, tốc độ quay trung bình của SH-200R tại các cấp độ gió 1, 2 và 3 chỉ đạt lần lượt 29,5 vòng/phút, 40,3 vòng/phút và 55,8 vòng/phút, cùng với điện áp đầu ra tương ứng 2,91 V, 3,94 V và 5,35 V. Các kết quả này cho thấy cánh quạt Aeroleaf cải tiến số lượng cánh vượt trội hơn về khả năng khởi động trong điều kiện gió thấp, qua đó khẳng định hiệu quả của cấu hình cải tiến trong phạm vi thực nghiệm.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã đề xuất và đánh giá thực nghiệm các cấu hình cánh Aeroleaf cải tiến cho turbine gió trục đứng hoạt động trong điều kiện gió thấp (2–5 m/s). Kết quả cho thấy cấu hình Aeroleaf ba cánh cải tiến thể hiện đặc tính khởi động sớm và khả năng phát điện tốt hơn, với tốc độ gió khởi động thấp hơn đáng kể so với các cấu hình khác và turbine thương mại tham chiếu. Các kết quả này cung cấp cơ sở thực nghiệm quan trọng cho phát triển turbine gió công suất nhỏ phục vụ môi trường đô thị và khu vực gió thấp tại Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

[1] E. Hau, *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 3 ed., Springer, Berlin Heidelberg, 2013.

[2] J. Manwell, J. McGowan, and A. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, 2 ed., John Wiley & Sons, 2009.

[3] Q. N. Tran and T. T. H. Tran, "Assessment of 100 m Wind Energy Potential in Viet Nam," *Journal of Climate Change Science*, vol. 33, pp. 12-23, 2025, doi: 10.55659/2525-2496/33.110635.

[4] A. Rezaeiha, H. Montazeri, and B. Blocken, "Towards optimal aerodynamic design of vertical axis wind turbines: Impact of solidity and number of blades," *Energy*, vol. 165, pp. 1129-1148, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.09.192.

[5] M. Bošnjaković, R. Santa, J. Božič, and S. Muhic, "The Future of Vertical-Axis Wind Turbines: Opportunities, Challenges, and Sustainability Perspectives," *Energies*, vol. 18, 2025, doi: 10.3390/en18236369.

[6] A. Ibrahim, R. Saeed, and R. Saeed, "A Comprehensive Review of Vertical Axis Wind Turbines For Urban Usage," *International Journal of Novel Research and Development*, vol. 7, no. 4, pp. 336-343, 2022.

[7] A. Fazylova, K. Alipbayev, A. Aden, F. Oraz, T. Iliev, and I. Stoyanov, "A Comparative Review of Vertical Axis Wind Turbine Designs: Savonius Rotor vs. Darrieus Rotor," *Inventions*, vol. 10, 2025, doi: 10.3390/inventions10060095.

[8] Z. Zhao, D. Wang, T. Wang, W. Shen, H. Liu, and M. Chen, "A review: Approaches for aerodynamic performance improvement of lift-type vertical axis wind turbine," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 49, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2021.101789.

[9] K.-Y. Lee, A. Cruden, J.-H. Ng, and K. H. Wong, "Variable designs of vertical axis wind turbines—a review," *Frontiers in Energy Research*, vol. 12, 2024, doi: 10.3389/fenrg.2024.1437800.

[10] A. Abdolahifar and A. Zanj, "A review of available solutions for enhancing aerodynamic performance in Darrieus vertical-axis wind turbines: A comparative discussion," *Energy Conversion and Management*, vol. 327, 2025, doi: 10.1016/j.enconman.2025.119575.

[11] M. Järvinen and H. Paulomäki, *Designing renewable energy systems within planetary boundaries: A textbook for energy engineers*, Springer Nature Switzerland AG, 2025.

[12] A. G. Ajay *et al.*, "Aerodynamic model comparison for an X-shaped vertical-axis wind turbine," *Wind Energy Science*, vol. 9, pp. 453-470, 2024, doi: 10.5194/wes-9-453-2024.

[13] A. García Auyanet, R. E. Santoso, H. Mohan, S. S. Rathore, D. Chakraborty, and P. G. Verdin, "CFD-Based J-Shaped Blade Design Improvement for Vertical Axis Wind Turbines," *Sustainability*, vol. 14, no. 22, 2022, doi: 10.3390/su142215343.

[14] S. Roy and U. K. Saha, "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*, vol. 227, no. 4, pp. 528-542, 2013, doi: 10.1177/0957650913480992.