

ĐẶC TÍNH LÀM VIỆC CỦA TURBINE GIÓ TRỰC ĐỨNG CÔNG SUẤT NHỎ Ở CÁC CHẾ ĐỘ TỐC ĐỘ KHÁC NHAU CỦA Ô TÔ

PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF A LOW-CAPACITY VERTICAL AXIS WIND TURBINE AT DIFFERENT CAR SPEEDS

Lê Minh Đức*, Phan Thanh Đạt, Lê Công Tín

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng¹

*Tác giả liên hệ: minhducle@dut.udn.vn

(Nhận bài: 19/10/2022; Chấp nhận đăng: 13/12/2022)

Tóm tắt - Nghiên cứu này trình bày thiết kế của turbine gió trực đứng công suất nhỏ được sử dụng để tận dụng nguồn năng lượng gió sinh ra từ việc di chuyển của xe ô tô trên đường. Turbine được thiết kế đặt trên giải phân cách hai làn đường di chuyển ngược chiều. Mô hình tính toán động lực học của chất lỏng được thực hiện để đánh giá công suất hoạt động của turbine thông qua phần mềm ANSYS Fluent. Các nhân tố chính ảnh hưởng đến hiệu suất hoạt động của turbine là vận tốc ô tô di chuyển, khoảng cách giữa xe ô tô và turbine, khoảng cách giữa các turbine. Vận tốc chuyển động của xe ô tô được thay đổi trong khoảng từ 60 km/h tới 120 km/h; Khoảng cách giữa ô tô và turbine và khoảng cách giữa các trục turbine được giữ không đổi. Kết quả tính toán chỉ ra quy luật diễn biến dòng chảy phía sau xe ảnh hưởng trực tiếp tới chế độ làm việc của turbine. Công suất hoạt động của turbine gió trực đứng có thể đạt tối đa 4,8W ở tốc độ di chuyển xe 120 km/h.

Từ khóa - Năng lượng tái tạo; turbine trực đứng; công suất; số vòng quay; mô phỏng số

1. Giới thiệu

An ninh năng lượng thế giới đang là một vấn đề thách thức đối với các quốc gia hiện nay trên các phương diện cụ thể như: (a) Mức độ tiêu thụ các nguồn năng lượng hóa thạch gia tăng, chi phí nhiên liệu tăng cao; (b) Tài nguyên thiên nhiên cạn kiệt; (c) Sự phụ thuộc của nhiều quốc gia vào các nguồn cung từ một số quốc gia giàu tài nguyên khác; (d) và Các nguy cơ tác động đến môi trường gây ra sự nóng lên của nhiệt độ trái đất. Chính vì vậy mà thế giới cần những nguồn năng lượng thay thế cho sự phụ thuộc vào nhiên liệu hóa thạch. Điện hạt nhân và các nguồn năng lượng tái tạo khác như năng lượng gió và năng lượng mặt trời là những nguồn năng lượng thay thế cho các dạng nhiên liệu truyền thống không thải ra khí CO₂ vào khí quyển. Trong những nguồn năng lượng kể trên thì năng lượng gió không gây ra những tác động xấu đối với môi trường như năng lượng thủy điện phải chặt phá rừng.

Đường cao tốc Việt Nam là một mạng lưới đường cao tốc kéo dài từ bắc đến nam ở Việt Nam, thuộc hệ thống giao thông đường bộ ở Việt Nam, bắt đầu được xây dựng từ đầu thế kỉ 21. Hệ thống đường cao tốc ở Việt Nam bao gồm các tuyến và đoạn cao tốc riêng lẻ trải dài phân bố từ Bắc đến Nam. Hiện nay, các đường cao tốc ở Việt Nam đều được xây dựng với quy mô từ 4 - 6 làn bao gồm 2 - 3 làn mỗi chiều và đều liên kết đến các quốc lộ và các đường cao tốc khác ở nơi mà đường cao tốc đi qua. Tốc độ xe chạy trên các đường cao tốc ở Việt Nam đều được thiết kế tối đa từ 80 - 120 km/h [1-2].

Abstract - In this study, vertical axis wind turbine with low-capacity was used to take advantage of the energy from the car wake. The vertical axis wind turbine was designed to be placed on a median strip of two lanes traveling in opposite directions. Computational fluid dynamics modeling was performed to evaluate the performance of wind turbine with the help of ANSYS Fluent software. Some factors affecting turbine performance were listed as the speed of cars, the number of cars, the distance between the car and the turbine, and the distance between the turbines. The velocity of car was varied in the range of 60 km/h to 120 km/h, while the distances between car and turbine and between turbine and turbine were fixed. The results show that the evolution of car wake significantly affects the performance of turbines. The power of vertical axis wind turbine could be attained about 4.8W at the velocity of 120 km/h.

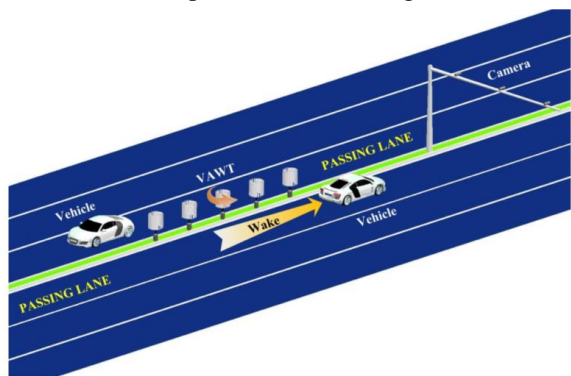
Key words - Renewable energy; Vertical Axis Wind Turbine; Power; Revolution; Computational Fluid Dynamics (CFD)

Các phương tiện tốc độ cao di chuyển trên đường cao tốc tạo ra khu vực nhiễu động mạnh sau xe và tạo ra một dạng năng lượng gió cục bộ [3]. Tiềm năng của năng lượng gió trên đường cao tốc là rất cao, xét trên quãng đường dài và lưu lượng xe giao thông qua lại cao. Việc tận dụng năng lượng gió trong phạm vi quy mô nhỏ của loại năng lượng gió cục bộ này có thể tạo ra đủ điện năng để cung cấp năng lượng cho các hệ thống cảm biến hoặc đèn đường cũng như các tín hiệu đèn giao thông. Trong khi đó, đối với các ứng dụng quy mô lớn hơn, điện năng sẽ được thu hồi và có thể được kết nối hòa vào lưới điện. Ý tưởng thu hồi năng lượng từ quá trình hình thành xoáy phía sau của các phương tiện giao thông đã được nghiên cứu và đề xuất trước đây [4-8]. Trong các nghiên cứu này, turbine gió trực đứng (Vertical Axis Wind Turbine-VAWT) được sử dụng thay cho turbine gió trục ngang. Các hướng gió ở cả hai phía của rôto là ngược nhau vì chuyển động ngược chiều của các phương tiện và các lực khí động học ngược chiều có thể dẫn động cho rôto [4]. Taskin và cộng sự [5] thiết kế một hệ thống năng lượng mặt trời và gió kết hợp được lắp trên đại phân cách của đường cao tốc. Đây là một hệ thống sử dụng rôto Savonius nhiều tầng để tạo ra năng lượng từ gió khi có ô tô chạy ngang qua. Krishnaprasanth và cộng sự [4] đã thiết kế một turbine Maglev để sản xuất điện gió trên đường cao tốc. Tuy nhiên, hai nghiên cứu trên vẫn đang trong quá trình thiết kế, phân tích lý thuyết số hoặc thực nghiệm về thiết kế của họ vẫn chưa được tiến hành. Turbine

¹ The University of Danang - University of Science and Technology (Minh Duc Le, Thanh Dat Phan, Cong Tin Le)

Savonius [6] và turbine gió hỗn hợp bao gồm rôto Darrieus và rôto Savonius [7, 8] đã được thiết kế và đem vào thử nghiệm. Các nghiên cứu nguyên mẫu này cho thấy, tính khả thi của việc sử dụng turbine gió để tạo ra năng lượng từ hoạt động của các phương tiện di chuyển. Tuy nhiên, những thử nghiệm này còn đơn giản, không có phép đo tính toán hoặc đo lường thực địa nào được thực hiện để cho thấy khả năng ứng dụng thực tiễn của các phương pháp này. Hơn nữa cơ chế tương tác giữa phương tiện giao thông di chuyển và rôto là chưa rõ ràng.

Khi phương tiện giao thông di chuyển trên đường với vận tốc cao thì sẽ tạo ra những vệt xoáy lớn phía sau xe (thường được gọi là bằng thuật ngữ *car wake*), năng lượng gió từ những vệt xoáy đó là một nguồn năng lượng tiềm năng và có thể tận dụng để tái tạo ra năng lượng điện. Trong nghiên cứu này turbine gió trực đứng được sử dụng để tạo ra năng lượng điện khi phương tiện giao thông di chuyển qua vị trí lắp đặt turbine. Mô phỏng tính toán CFD được thực hiện để đánh giá hoạt động của turbine dưới những điều kiện làm việc khác nhau. Công suất hoạt động của turbine được đánh giá dựa trên tốc độ di chuyển của xe, khoảng cách giữa xe, cánh turbine, và khoảng cách giữa các turbine trên dải phân cách của đường.



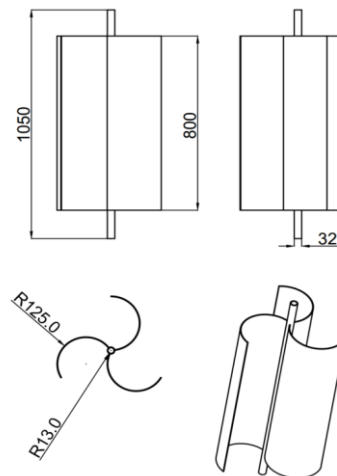
Hình 1. Mô hình turbine trực đứng lắp đặt trên dải phân cách đường hai làn xe ngược chiều [9]

2. Mô hình nghiên cứu

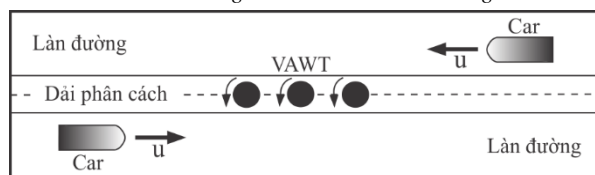
Turbine gió trực đứng được đặt giữa giải phân cách của hai làn đường do đó gió tác động vào hai bên cánh của turbine sẽ làm cho turbine quay được và tạo ra điện. Để đánh giá ảnh hưởng của vệt xoáy sau xe tới chế độ làm việc của turbine, trong nghiên cứu này sẽ tiến hành thực hiện tính toán mô phỏng số cho nhiều trường hợp khác nhau của vận tốc xe ô tô. Để đơn giản hóa bài toán, giảm thời gian tính toán và tài nguyên máy tính, bài báo này trình bày kết quả tính toán trên mô hình 2D. Mặc dù, sử dụng mô hình toán 2D đơn giản nhưng nhiều nghiên cứu trước đây đã chứng minh được rằng, sử dụng mô hình 2D khi mô phỏng có thể dự đoán được hiệu suất của turbine với kết quả chính xác cao [9-10].

Thiết kế của turbine trực đứng được thể hiện ở trong Hình 2. Mô hình turbine trực đứng có 3 cánh với bán kính 125 mm, chiều dài cánh 800 mm [11-13]. Trong phạm vi nghiên cứu này, phương tiện được sử dụng để mô phỏng là mô hình xe ô tô có kích thước cơ bản là 4,5m x 1,8m x 1,5m [14]. Ảnh hưởng của các loại hình dạng xe (xe con, xe tải, xe container,...) tới chế độ làm việc của turbine gió

trực đứng sẽ được trình bày ở những nghiên cứu tiếp theo. Theo tiêu chuẩn kỹ thuật của đường bộ Việt Nam thì chiều rộng của làn đường là 3,5 m, chiều rộng dải phân cách từ 0,3 – 0,8 m, tối đa là 1,27m. Dải tốc độ ô tô dùng để đánh giá khả năng làm việc của turbine gió được lấy theo dải tốc độ quy định dành cho xe ô tô trên đường Việt Nam. Theo quy định này, vận tốc tối đa cho phép của xe ô tô khi di chuyển trong khu vực đông dân cư là 60 km/h, tốc độ xe ô tô cho phép ngoài khu đông dân cư là 90 km/h, và tốc độ xe ô tô cho phép di chuyển trên đường cao tốc là 120 km/h [1-2].



Hình 2. Thông số thiết kế cánh turbine gió



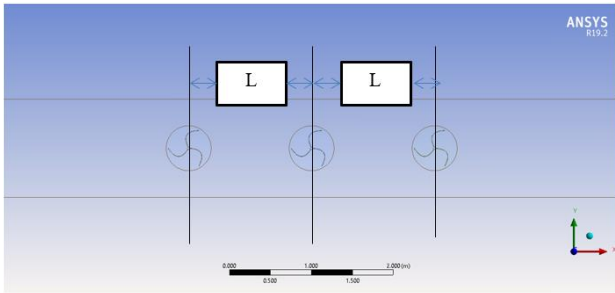
Hình 3. Mô hình mô phỏng turbine gió trực đứng đặt trên đường hai làn xe ngược chiều

2.1. Xây dựng mô hình

Turbine gió trực đứng được sử dụng để mô phỏng trong nghiên cứu này bởi nó có thể hoạt động được trong điều kiện vận tốc gió thấp, phù hợp sử dụng ở trên đường. Do hướng gió trên đường tới từ nhiều hướng khác nhau và không đồng đều nên việc sử dụng turbine gió trực đứng 3 cánh là một phương án tốt để thực hiện tiến hành mô phỏng [9-10]. Turbine gió trực đứng 3 cánh có thể hoạt động ổn định khi mà hướng gió thay đổi theo nhiều hướng khác nhau với nhiều tốc độ khác nhau. Biết được hiệu suất hoạt động của từng turbine từ đó sẽ xác định toàn bộ hiệu suất thu được từ hệ thống turbine đặt trên đường. Để đánh giá hiệu suất làm việc của một hệ thống turbine đặt trên dải phân cách của đường thì khoảng cách giữa các cánh turbine là một trong những yếu tố quan trọng.

Nghiên cứu này tập trung phân tích và đánh giá ảnh hưởng của vệt xoáy sau xe tới các chế độ làm việc của turbine (số vòng quay và công suất) trong các điều kiện vận tốc xe ô tô khác nhau. Một hệ thống gồm 3 turbine được sử dụng trong nghiên cứu này. Khoảng cách giữa ba turbine trực đứng xếp thẳng hàng được lựa chọn đặt cách đều nhau. Khoảng cách từ tâm trục turbine này đến tâm trục của turbine kế tiếp là L (m), $L = 4D$ (D là đường kính của turbine). Khoảng cách

d từ cánh turbine đến xe ô tô chọn bằng 1 m để tương ứng điều kiện thực tế có thể đảm bảo an toàn khi xe vận hành trên đường ở gần khu vực dải phân cách.

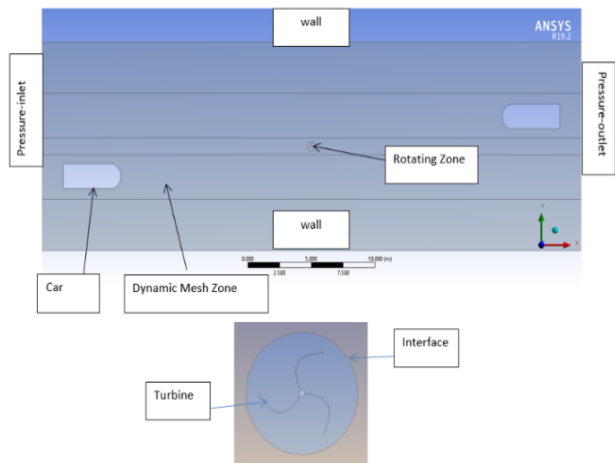


Hình 4. Khoảng cách giữa các cánh turbine

Nghiên cứu này tập trung vào việc đánh giá công suất của turbine trực đứng khi xe ô tô di chuyển với các chế độ tốc độ khác nhau. Cố định khoảng cách từ turbine tới xe ô tô và khoảng cách giữa các turbine với nhau, như vậy nhân tố chính ảnh hưởng đến các thông số hoạt động của turbine sẽ là vận tốc xe di chuyển.

2.2. Mô hình tính toán

Ảnh hưởng của tốc độ xe tới hoạt động của turbine gió trực đứng được xác định nhờ sự hỗ trợ của phần mềm Ansys Fluent R19.2. Giới hạn miền hình tính toán (domain) có kích thước chiều dài là 150 m và chiều rộng là 15 m, kích thước này được đề xuất bởi Tian và các cộng sự [15-16]. Turbine được đặt ở tâm của domain. Xe ô tô di chuyển song song theo phương x và cách turbine một khoảng d cố định (d = 1m). Vị trí của xe ô tô có tọa độ (x, y). Toàn bộ miền tính toán được chia thành những vùng khác nhau bao gồm (a) vùng để cho turbine quay được, (b) vùng để cho ô tô di chuyển là vùng kết hợp giữa vùng di chuyển và vùng lưới động học, (c) và vùng tĩnh là các phần tử bên ngoài các vùng trên (Hình 4).



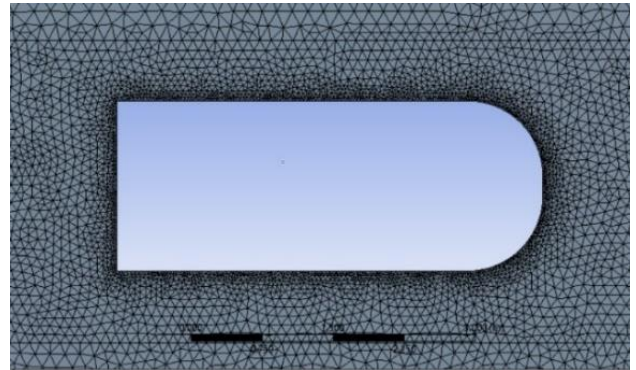
Hình 5. Thiết lập điều kiện biên trong Ansys Fluent

2.3. Tạo lưới

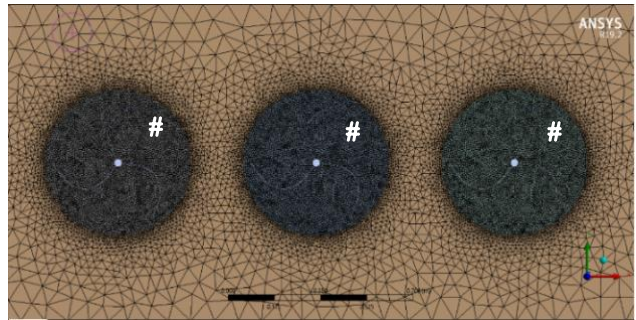
Lưới tính toán cho mô hình được chia theo dạng lưới không cấu trúc (lưới tam giác). Mật độ lưới được chia mịn hơn ở vùng quay (rotating zone) của hệ thống cánh turbine và vùng mà xe ô tô di chuyển (dynamic mesh zone). Thông số kích thước lưới được thể hiện trong Bảng 1. Chi tiết về kích thước lưới tính toán được thể hiện trong Hình 6.

Bảng 1. Thông số lưới tính toán

| Kiểu phần tử | Elements | Nodes |
|--------------|----------|--------|
| Triangle | 323591 | 164471 |



(a) Chia lưới mô hình ô tô



(b) Chia lưới mô hình 3 turbine

Hình 6. Chi tiết lưới tính toán

2.4. Thiết lập mô phỏng

Mô hình rối k- ω được sử dụng để tính toán mô phỏng trong nghiên cứu này [15-16]. Vị trí ban đầu của xe cách trục của turbine một khoảng x = -15 m (vị trí ở đầu domain mô hình tính toán). Bước thời gian tính toán (time step) thiết lập là 0,002 s, và sự di chuyển vị trí của xe ở mỗi time step không vượt quá kích thước nhỏ nhất ở vùng biên đổi của lưới. Thuật toán Second-Order Upwind được sử dụng cho toàn bộ phương trình tính toán bao gồm áp suất, momen, cường độ rối. Thuật toán Least Squares Cell-based được sử dụng cho toán tử gradients. Thuật toán Second-order Algorithms sẽ cho kết quả chính xác hơn thuật toán First-order Algorithms bởi vì nó giảm các lỗi liên quan đến nội suy và các lỗi liên quan đến khuếch tán sai số. Lựa chọn các thuật toán trên khi tiến hành mô phỏng bằng phần mềm Ansys Fluent có thể giúp bài toán mô phỏng dễ dàng hội tụ hơn [15-16].

3. Kết quả mô phỏng số

3.1. Tính toán thông số làm việc của turbine

Số vòng quay turbine được xác định theo [15]:

$$\omega = V / R \tag{1}$$

Trong đó, ω : Số vòng quay (Rad/s); V: Vận tốc tiếp tuyến của cánh turbine (m/s); R: Bán kính cánh turbine (m).

Công suất của turbine được xác định theo [15]:

$$P = T \cdot \omega \tag{2}$$

Trong đó, T: Momen xoắn (N.m); ω : Số vòng quay (rad/s); P: Công suất (W).

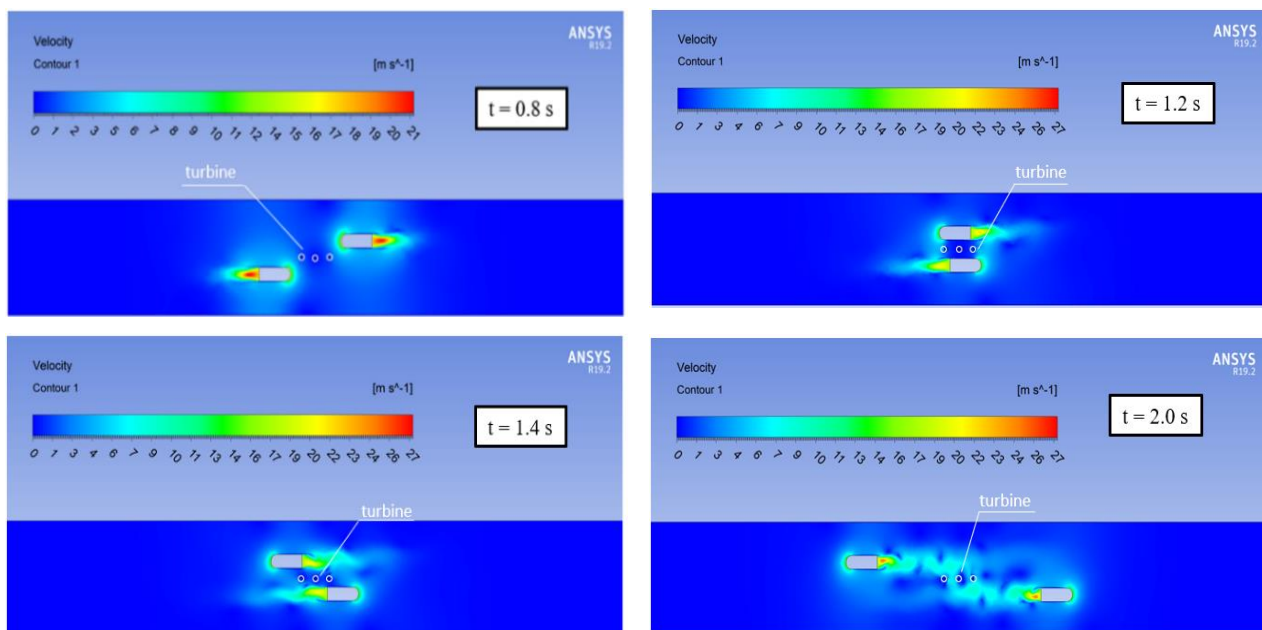
3.2. Ảnh hưởng của tốc độ xe di chuyển tới số vòng quay, công suất của turbine

(a) Phân bố trường vận tốc vệt xoáy sau xe

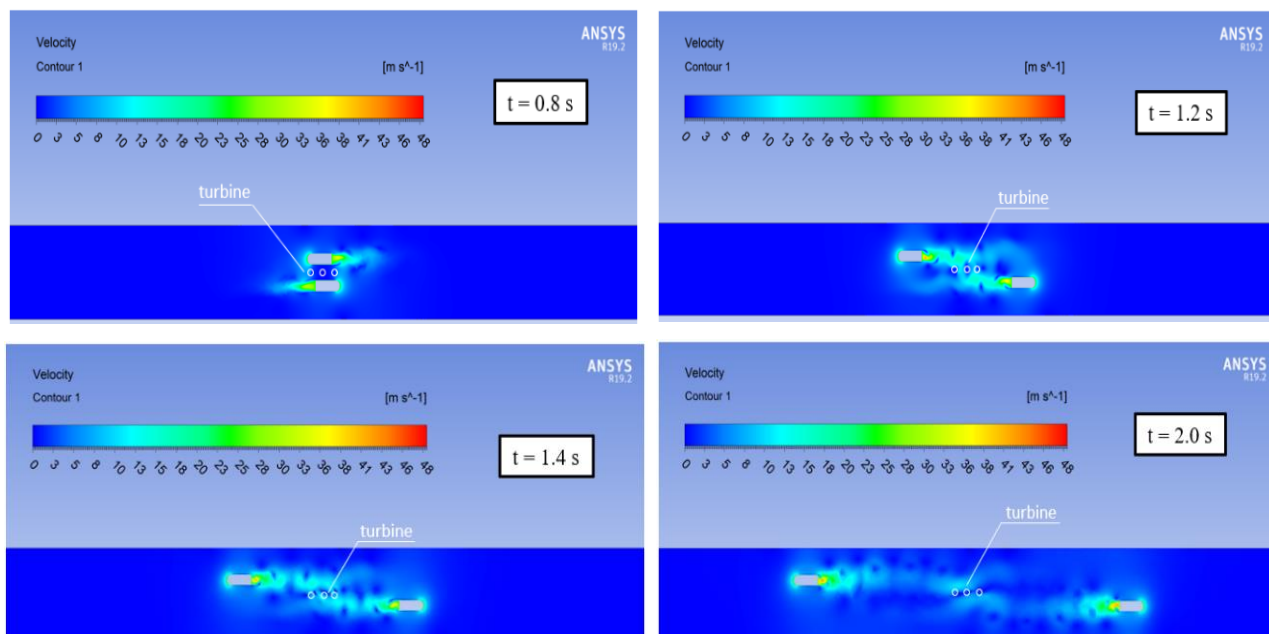
Hình 7, 8 và 9 mô tả diễn biến trường vận tốc của vệt xoáy sau xe (car wake) khi xe di chuyển với vận tốc lần lượt $v = 60, 90, \text{ và } 120 \text{ km/h}$. Khi ô tô di chuyển với tốc độ khác nhau thì thông số làm việc của turbine cũng thay đổi. Cả chiều dài và chiều rộng của dòng xoáy phía sau xe tăng lên tương ứng với vận tốc di chuyển của xe ô tô. Khi xe di chuyển, nó tạo ra các dòng xoáy tách rời nhau, dạng cấu trúc xoáy hình thành phía sau xe phổ biến là xoáy Kármán [17]. Do hai xe di chuyển ngược chiều nên các vùng xoáy

Kármán hình thành phía sau xe cũng có xu hướng chuyển động ngược chiều nhau.

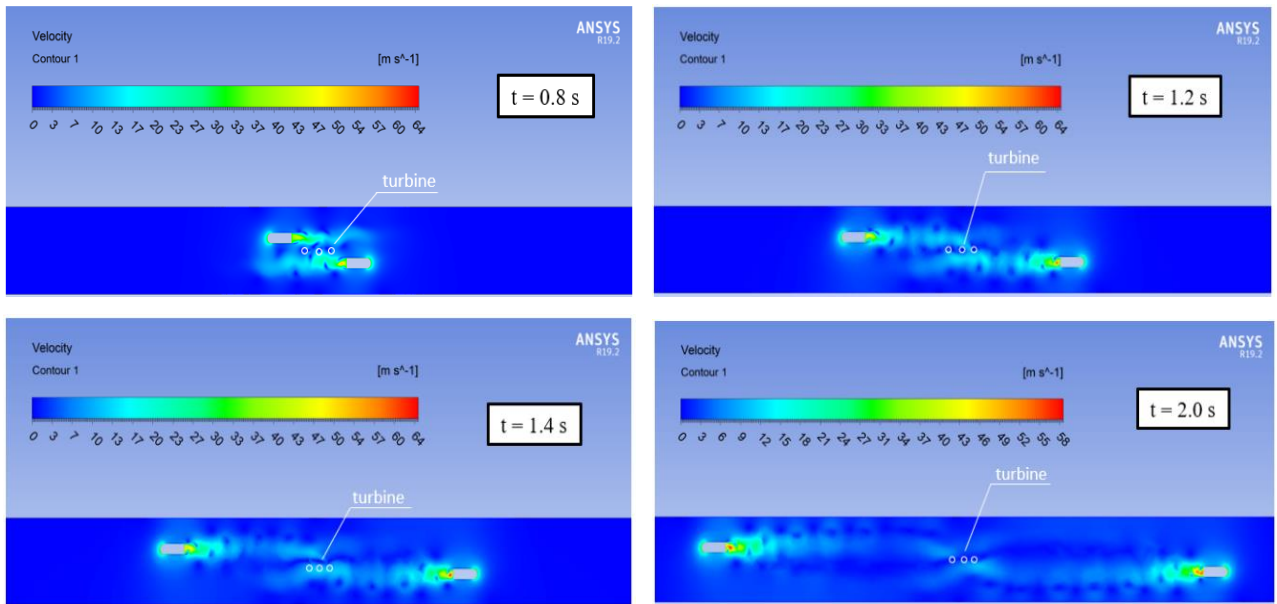
Diễn biến trường vận tốc của vệt xoáy sau xe khi xe di chuyển với tốc độ tăng từ 60 km/h tới 120 km/h ở các thời điểm $t = 0,8, 1,2, 1,4, \text{ và } 2,0 \text{ s}$ cho thấy các xoáy Kármán hình thành sau xe có tần số dao động tăng dần (vortex shedding frequency). Điều này có nghĩa là ảnh hưởng của vệt xoáy Kármán tới số vòng quay sẽ càng rõ rệt, do đó công suất của các turbine sẽ thay đổi khi thay đổi tốc độ chuyển động của xe ô tô. Vùng ảnh hưởng của nhiễu động sau xe cũng mở rộng dần khi tăng tốc độ chuyển động của xe ô tô.



Hình 7. Diễn biến vận tốc dòng khí nhiễu động phía sau xe khi xe di chuyển với tốc độ 60 km/h



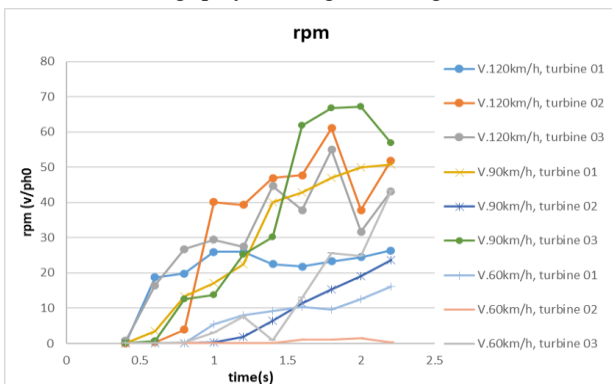
Hình 8. Diễn biến vận tốc dòng khí nhiễu động phía sau xe khi xe di chuyển với tốc độ 90 km/h



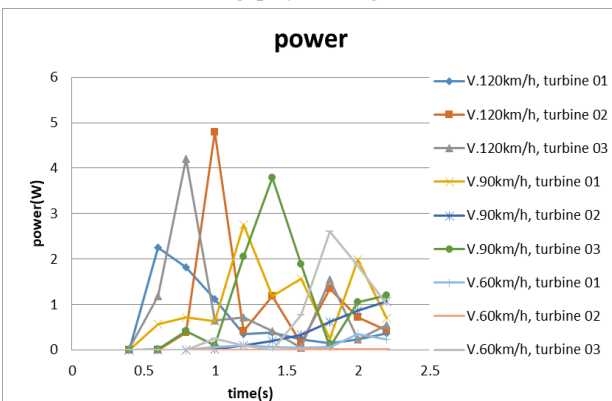
Hình 9. Diễn biến vận tốc dòng khí nhiễu động phía sau xe khi xe di chuyển với tốc độ 120 km/h

(b) Số vòng quay và công suất làm việc của turbine

Hình 10 và 11 thể hiện số vòng quay và công suất của turbine tạo ra tương ứng khi xe di chuyển với tốc độ 60, 90, và 120 km/h. Với tốc độ xe di chuyển càng lớn thì cường độ xoáy Kármán sau xe tạo ra càng lớn, dẫn đến turbine có thể tạo ra số vòng quay và công suất càng lớn.



Hình 10. Số vòng quay và công suất của turbine



Hình 11. Số vòng quay và công suất của turbine

Khi xe di chuyển với tốc độ 60 km/h, kết quả tính toán cho thấy turbine tạo ra số vòng quay và công suất thấp nhất. Số vòng quay và công suất của turbine trong trường hợp

này tăng chậm. Với số vòng quay turbine #3 tạo ra gần 45 v/ph, cao hơn so với turbine #1 và turbine #2. Công suất turbine #3 đạt cực đại 2,6 W tại $t = 1,8$ s.

Khi xe di chuyển với tốc độ 90 km/h, số vòng quay của turbine #1 và #3 tăng nhanh. Turbine #1 đạt số vòng quay cực đại gần 70 v/ph và turbine #3 có số vòng quay cực đại là 51 v/ph. Trong khi đó tốc độ của turbine #2 tăng chậm và chỉ đạt giá trị tối đa gần 25 v/ph. Chính vì vậy mà công suất của turbine #1 và #3 cao hơn hẳn so với công suất của turbine #2. Điều này có thể lý giải ở chế độ tốc độ 90 km/h của xe, ảnh hưởng của dòng chảy qua cánh các turbine #1 và #3 cản trở chuyển động của turbine #2 khiến cho turbine #2 quay chậm và phát ra công suất bé. Công suất cực đại của turbine #3 trong trường hợp này có thể đạt tới 3,8 W.

Khi xe di chuyển với tốc độ 120 km/h, trường hợp này turbine tạo ra số vòng quay và công suất cao hơn so với khi xe di chuyển với tốc độ 60 km/h và 90 km/h. Ở chế độ tốc độ này, số vòng quay và công suất của turbine tăng nhanh, turbine #2 và turbine #3 có số vòng quay và công suất cao hơn so với turbine #1. Cụ thể, turbine #2 có số vòng quay gần 62 v/ph và công suất đạt cực đại 4,8 W tại 1 s, turbine #3 có số vòng quay 55 v/ph và công suất đạt 4,2 W tại 0,8 s, turbine #1 có số vòng quay gần 28 v/ph và công suất đạt gần 2,3 W tại 0,6 s. Tuy nhiên, công suất của turbine #1 sau khi tăng đến thời gian 0,6 s thì giảm nhanh, điều này được lý giải là do dòng chảy qua cánh turbine #2, #3 ảnh hưởng tới chế độ hoạt động của turbine này. Điều này mở ra hướng nghiên cứu mới về ảnh hưởng của khoảng cách trục giữa các turbine #1, #2, và #3 tới số vòng quay cũng như công suất của các turbine.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, một thiết kế mô hình turbine trực đứng công suất nhỏ được thực hiện, mô phỏng số CFD được tiến hành để đánh giá số vòng quay và công suất hoạt động của hệ thống 3 turbine trực đứng ở các chế độ vận tốc ô tô trên đường. Các kết quả quan trọng của

nghiên cứu này có thể liệt kê:

- Turbine quay với tốc độ lớn nhất và phát ra công suất lớn nhất khi xe di chuyển với tốc độ 120 km/h. Lúc này công suất lớn nhất mà turbine tạo ra đạt tới 4,8W.

- Khi xe di chuyển với tốc độ 60 km/h và 90 km/h thì turbine #1 và #3 tạo ra số vòng quay cao hơn so với turbine #2. Tuy nhiên, khi xe di chuyển với tốc độ 120 km/h thì turbine #2 và #3 có số vòng quay và công suất cao hơn so với turbine #1. Điều này được lý giải có thể do khoảng cách bố trí giữa các turbine gần, làm ảnh hưởng đến đặc điểm khí động học dòng chảy qua cánh turbine.

- Số vòng quay và công suất phát ra của turbine giảm tương ứng với vận tốc xe di chuyển giảm, điều này có thể lý giải là do khi xe di chuyển với tốc độ thấp thì hiện tượng xoáy Kármán với tần số dao động tạo ra phía sau xe yếu hơn so với trường hợp xe di chuyển với tốc độ cao.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Thông tư 31/2019/TT-BGTVT, ban hành ngày 29/08/2019.
- [2] Danh sách các tuyến đường cao tốc Việt Nam hiện nay: <https://www.invert.vn/danh-sach-cac-tuyen-duong-cao-toc-viet-nam-hien-nay-ar2244>, truy cập: 10/10/2022.
- [3] Lapointe C. and Gopalan H., "Numerical Investigation of Mini Wind Turbines near Highways". *Journal of Solar Energy Engineering*, vol.138, no. 2, pp. 1-4, 2016.
- [4] Krishnaprasanth B., Akshaya P.R., Manivannan L., Dhivya N., "A new fangled highway wind power generation". *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 31-34, 2016.
- [5] Taskin S. and Dursun B., "Performance assessment of a combined solar and wind system". *Arabian Journal Forence & Engineering*, vol. 34, no. 1, pp. 217-27, 2009.
- [6] Murodiya, R. and H. Naidu, "Design and Fabrication of Vertical Wind Turbine for Power Generation at Highway Medians". *Int. Eng. J. Res. Dev.*, Vol. 1 pp. 1-10, 2016.
- [7] Basilio, M. A., et al., "Harnessing of electrical energy through vehicular air drag on highways for lighting load applications". *2019 IEEE 11th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management*. IEEE, 2019.
- [8] Champagnie B., Altenor G., Simonis A., "Highway Wind Energy". *Florida International University*, 2013.
- [9] W. Tian, Z. Mao, and Y. Li, "Numerical investigation of wind turbines and turbine arrays on highways". *Renewable Energy*, vol. 147, no. 1, pp. 384-398, 2020.
- [10] W. Tian, Z. Mao, X. An, B. Zhang, and H. Wen, "Numerical study of energy recovery from the wakes of moving vehicles on highways by using a vertical axis wind turbine". *Energy*, vol. 141, pp. 715-728, 2017.
- [11] I. Paraschivoiu, "Wind turbine design: with emphasis on Darrieus concept". Presses inter Polytechnique, 2002.
- [12] N.C. Batista, R. Melício, V.M. Mendes, J. Figueiredo, and A. H. Reis, "Darrieus wind turbine performance prediction: Computational modeling". *Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [13] S.R. Shah, R. Kumar, K. Raahemifar, and A.S. Fung, "Design, modeling and economic performance of a vertical axis wind turbine". *Energy Reports*, vol. 4, pp. 619-623, 2018.
- [14] R. Murodiya and H. Naidu, "Design and Fabrication of Vertical Wind Turbine for Power Generation at Highway Medians". *Int. Eng. J. Res. Dev.*, vol. 1, pp. 1-10, 2016.
- [15] Q. Wang, W. Fang, R. de Richter, C. Peng, T. Ming, "Effect of moving vehicles on pollutant dispersion in street canyon by using dynamic mesh updating method". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 187, pp. 15-25, 2019.
- [16] W. Tian, B. Song, J. H. VanZwieten, P. Pyakurel, "Computational fluid dynamics prediction of a modified Savonius wind turbine with novel blade shapes". *Energies*, vol. 8, no. 8, pp.7915-7929, 2015.
- [17] Owen, J., Szewczyk, A., and Bearman, P., "Suppression of Karman vortex shedding," *Physics of Fluids*, Vol. 12, No. 9, pp. S9-S9, 2000.