

# ẢNH HƯỞNG CỦA MƯA LÊN TUABIN TRỤC NGANG CÓ CÁNH HÌNH CHỮ NHẬT

EFFECT OF RAIN ON HORIZONTAL AXIS WIND TURBINES WITH BLADE OF RECTANGLE SHAPE

Nguyễn Tuấn Anh, Nguyễn Hữu Đức

## TÓM TẮT

Một mô hình được thiết lập mô tả sự ảnh hưởng của tuabin gió trục ngang trong điều kiện khí hậu có ảnh hưởng của gió và mưa lên tuabin có cánh dạng hình chữ nhật. Sự phân bố kích thước hạt mưa được mô phỏng theo phổ M-P và lượng mưa được tính theo định lý xung lượng. Độ ướt của cánh tuabin phụ thuộc vào cường độ gió và mưa và được tính bằng các hình dạng quay của cánh. Từ đó, lực tác động của giọt mưa được xác định và ảnh hưởng của nó lên công suất ra. Kích thước và các thông số hình dạng của tuabin gió, kích thước của giọt mưa, mật độ và cường độ của mưa, các thành phần vận tốc gió và mưa có thể điều chỉnh được tùy vào tình hình thực tế. Mô hình được mô phỏng với việc xem xét sự kết hợp khác nhau của độ lệch hướng gió và cường độ mưa. Các kết quả chỉ ra rằng độ lệch hướng gió tức thời có tác động đáng kể đến sản lượng của tuabin gió và dưới ảnh hưởng của mưa, công suất ra giảm mạnh khi cường độ mưa tăng lên. Mưa đã có tác dụng gia tăng lực kéo, làm chậm tốc độ quay của tuabin gió và làm giảm công suất ra với tốc độ gió tương đương. Sự gia tăng lực kéo có tác dụng bổ sung làm giảm hệ số hiệu suất tối ưu khi lượng mưa tăng lên. Các nghiên cứu tương tự về đường đặc tính trong mưa đã chỉ ra rằng sự gia tăng lực kéo và giảm lực nâng liên quan đến độ dài của cánh tuabin và do đó mức độ ảnh hưởng lớn hơn với các cánh tuabin lớn hơn. Nghiên cứu này có ý nghĩa quan trọng trong việc phân tích tác động của mưa lên tuabin gió và để tối ưu hóa việc thiết kế các tuabin gió nằm ngang trong các điều kiện khắc nghiệt.

**Từ khóa:** Tuabin gió trục ngang; sự ảnh hưởng của mưa; suy giảm công suất tuabin.

## ABSTRACT

A model is established to study the effects of a horizontal-axis wind turbine with rectangle shape of blade during rains, heavy rains, violent typhoons and rainstorms with wind load and rain load. The raindrop size distribution is simulated by the M-P spectrum, and the rain load is calculated according to the momentum theorem. The wetness on turbine blades is dependent on wind and rain velocities and calculated using the cylinder shapes of blades' rotation. The impact force of raindrop is determined and its effect on output power. The size and shape parameters of wind turbine, size of raindrop, density and intensity of rainfall, wind and rain velocity components are adjustable depending on the actual situation. The model is simulated with considering various combinations of wind direction deflections and rainfall intensities. The results indicate that instantaneous wind direction deflection has a substantial impact on the output of wind turbines, and after introducing the effect of rain, the output power decreases sharply with increasing rainfall intensities. The rain had the effect of increasing the drag, slowing the rotational speed of the wind turbine and decreasing the output power for the equivalent wind speed. The increasing in the drag has the additional effect of decreasing the optimal coefficient of performance as the rainfall rate is increased. Similar studies in airfoil performance in the rain have shown that the increase in drag and decrease in lift is related to the length of blades and so could potentially be larger for larger turbine blades. This study has significant implications for analysing effects of rain on wind turbines and for optimising the design of horizontal-axis wind turbines under extreme typhoon conditions.

**Keywords:** Horizontal-axis wind turbine; effect of rain; power decrease of wind turbine.

Nguyễn Tuấn Anh, Nguyễn Hữu Đức

Khoa Công nghệ năng lượng, Trường Đại học Điện lực

Email: ducnh@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/09/2017

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/11/2017

Ngày chấp nhận đăng: 25/12/2017

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nhu cầu sử dụng năng lượng tái tạo trên toàn cầu đang tăng lên đã thúc đẩy sự phát triển nhanh chóng của công nghệ năng lượng gió [1]. Có thể dự đoán rằng điện gió sẽ tiếp tục phát triển trong những năm tới. Trong thiết kế tuabin gió, gió là nguồn lực chính bên ngoài. Do vậy ngoài việc gió cung cấp năng lượng cho tuabin, nó còn có tác động đến cánh và các thành phần của tuabin. Đã có một số nghiên cứu về lĩnh vực này [2-4], nhưng nói chung, các nghiên cứu hiện nay tập trung chủ yếu vào phản ứng khí động học của các tháp tuabin theo các chế độ gió thông thường.

Trong những năm gần đây, số các sự kiện ảnh hưởng đến tuabin do gió lớn, mưa lớn và bão đã tăng lên. Bão khác với gió thông thường về tốc độ, hướng tác động, độ giật, mức độ tác động và luồng gió [5]. Đã có một số công trình phân tích sự va đập của gió ngang trong điều kiện bình thường và bão tố trên các công trình xây dựng [6-9].

Với ngày càng nhiều tuabin được xây dựng cả ở trên đất liền và trên biển, chúng càng có nguy cơ bị thiệt hại do mưa lớn hoặc bão. Mặc dù có rất ít các phân tích về phản ứng khí động học của tuabin gió trong các cơn bão, nhưng những thiệt hại đối với tuabin gió trong các cơn bão vẫn được báo cáo thường xuyên [10-13]. Tất cả những tai nạn này dường như chỉ ra rằng mô hình gió thực tế trên tuabin gió có thể khác với tình

trạng giới hạn giả định trong thiết kế [10]. Tuabin gió thường được thiết kế với chức năng mà hệ thống ngắt được khóa bằng đĩa phanh khi tốc độ gió vượt quá tốc độ cắt. Tuy nhiên, hệ thống ngắt của tuabin gió cũng có thể di chuyển khi tốc độ gió vượt quá tốc độ cắt. Ví dụ, ở cơn bão Maemi, các tuabin gió số 3, 4 và 5 tại nhà máy điện gió Karimata đã di chuyển theo chiều kim đồng hồ từ 94° đến 156° khi tốc độ gió vượt quá 25 m/s [11]. Kết quả là, chúng chịu tải gió lớn hơn so với khi các cánh quay trong cơn bão. Một chế độ gió không thuận lợi xảy ra khi hướng gió của cơn bão đột ngột thay đổi do chuyển động hỗn loạn mạnh hoặc do ảnh hưởng địa hình. Khi cơn bão Maemi qua đảo Miyakojima, hướng gió quan sát đột ngột thay đổi 120° [11]. Tóm lại, do các yếu tố phức tạp liên quan đến điều khiển tuabin gió cũng như những thay đổi đột ngột về hướng gió và vận tốc gió trong điều kiện khắc nghiệt, sự ảnh hưởng lên tuabin gió thực tế lớn hơn đáng kể so với thiết kế thông thường.

Hơn nữa, khi cơn bão đổ bộ, nó luôn luôn mang đến một cơn mưa lớn. Mưa có thành phần vận tốc theo chiều ngang, gây tác động lên bề mặt cánh tuabin gió, tạo nên sự rung động, làm trầm trọng thêm sự ảnh hưởng lên các tuabin gió. Một số nghiên cứu đã bắt đầu xem xét tác động của lượng mưa lên cấu trúc xây dựng [14]. Tuy nhiên, trong trường hợp khí hậu cực đoan, chẳng hạn như giông hay bão, ảnh hưởng của mưa sẽ rất lớn. Sự kết hợp của gió và mưa rất phức tạp, nhưng một số phương pháp đơn giản để tính tác động đồng thời của gió và mưa lên các công trình xây dựng [15-18] vẫn còn giá trị để sử dụng cho tuabin gió.

Cho đến nay, chưa có mô hình nghiên cứu nào dựa trên cơ sở vật lý về tác động và cơ chế gây hại cho các tuabin gió trong các điều kiện thời tiết như mưa nhỏ, mưa vừa, mưa to, giông và bão. Mưa nhỏ đến mưa vừa có thể không gây hỏng hóc cho tuabin, nhưng chúng cũng ảnh hưởng đến sản lượng điện. Ngoài ra, tuy các sự kiện mưa bão cực đoan hiếm khi xảy ra, nhưng ảnh hưởng của chúng có thể rất thảm khốc. Vì vậy, các tác động của mưa lên tuabin gió trong những điều kiện vận hành khắc nghiệt nên được chú ý nhiều hơn. Sau khi nghiên cứu và hiểu được ảnh hưởng của các điều kiện cực trị đối với tuabin gió, việc thiết kế và phân tích tính dễ tổn thương của tuabin gió cần được phát triển thêm.

Bài báo này tập trung chủ yếu vào việc phân tích các tác động của mưa và gió lên cánh tuabin dạng hình chữ nhật trong điều kiện thời tiết xấu, đặc biệt là trong các cơn mưa lớn, giông, hay bão mạnh. Các đặc tính của lượng mưa được tính theo phổ M-P và độ ướt được tính dựa trên bảo toàn lưu lượng khối lượng. Để khảo sát sự ảnh hưởng lên công suất tuabin trong điều kiện mưa gió, một mô hình cho tuabin gió được lập và mô phỏng theo dạng cánh tuabin và sự lệch hướng gió. Tác động của cường độ mưa khác nhau cũng được nghiên cứu. Các kết quả nghiên cứu giúp làm sáng tỏ đường đặc tính của công suất tuabin gió trong các điều kiện mưa, giông và bão và từ đó giúp đánh giá an toàn cho tuabin gió.

## 2. TÁC ĐỘNG CỦA MƯA

Luôn luôn có mưa đi cùng với giông bão. Tác động của hạt mưa tới cấu trúc tuabin gió với năng lượng lớn, ngoài gây ảnh hưởng đến công suất ra mà còn gây nên sự rung động của tuabin gió. Năng lượng hạt mưa rơi xuống tuabin gió liên quan đến đường kính và tốc độ va đập của giọt mưa [19]. Cường độ mưa là một đặc trưng quan trọng của mưa và lượng mưa trong một giờ được coi là tiêu chuẩn phân loại mưa [15], như được trình bày trong bảng 1.

Bảng 1. Phân loại cường độ mưa

Phân loại	Mưa nhỏ	Mưa vừa	Mưa to	Mưa bão	Bão yếu	Bão vừa	Bão mạnh	Siêu Bão
Cường độ mưa (mm/h)	2,5	8	16	32	64	100	200	709,2

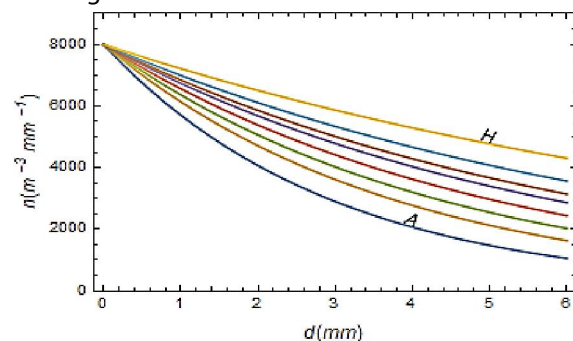
### 2.1. Sự phân bố của mưa

Trong suốt quá trình mưa rơi, các giọt mưa lớn hấp thụ các giọt mưa nhỏ, lượng mưa tăng lên và hình dạng của các giọt mưa trở thành ellipsoid. Khi đường kính của giọt mưa tăng đến một mức độ nhất định, ma sát không khí vượt quá sự gắn kết phân tử giữ giọt mưa như một toàn thể. Sau đó, những giọt mưa lớn chia thành những giọt mưa nhỏ. Các đường kính của giọt mưa thường dao động từ 0,1 mm đến 6 mm [20].

Thông thường đường kính tương đương (đường kính của quả bóng có cùng thể tích như giọt mưa) được sử dụng để mô tả kích thước của giọt mưa. Một số lượng lớn các quan sát cho thấy kích thước hạt mưa rơi tuân theo phân bố hàm mũ Marshall-Palmer được gọi là phổ M-P [21, 22] như sau:

$$n(d) = n_0 e^{-\Lambda d} \quad (1)$$

Ở đây,  $d$  là đường kính của giọt mưa ở đơn vị cm;  $n_0 = 0,08 \text{ cm}^{-4}$  với cường độ mưa bất kỳ;  $\Lambda = 4,1 \cdot I^{0,21} \text{ cm}^{-1}$  là hệ số độ dốc;  $I$  là cường độ mưa ở đơn vị mm/h. Hình 1 cho thấy sự phân bố kích thước hạt mưa theo cường độ mưa khác nhau giảm dần theo kích thước.



Hình 1. Biểu đồ phân bố theo kích thước giọt mưa  $n(d)$  ứng với các cường độ mưa khác nhau từ A đến H tương ứng là 2,5; 8; 16; 32; 64; 100; 200; và 709,2 mm/h theo quy luật hàm mũ của Marshall và Palmer

### 2.2. Độ lấp đầy của mưa

Tương ứng với kích thước giọt mưa, số lượng các giọt mưa có đường kính giữa  $[d_1, d_2]$  trong một đơn vị thể tích không khí có thể được tính như sau:

$$N = \int_{d_1}^{d_2} n(d)dd \tag{2}$$

trong đó  $d_1 = 0,1 \text{ mm}$  và  $d_2 = 6 \text{ mm}$ .

Độ lấp đầy thể tích của mỗi loại giọt mưa trong cơn mưa là:

$$\alpha = \frac{1}{6} \pi d^3 N \tag{3}$$

**2.3. Xác định lượng mưa**

Vận tốc của giọt mưa bằng 0 rất nhanh khi hạt mưa đập vào một mặt cứng. Quá trình tương tác giữa các giọt mưa và tuabin gió tuân theo định luật thứ hai của Newton [18]. Theo định lý xung lượng,

$$\int_0^\tau f(t)dt + \int_v^0 mdv = 0 \tag{4}$$

Ở đây,  $f(t)$  là lực tác động của một giọt mưa;  $v$  là vận tốc của giọt mưa;  $m$  là khối lượng của giọt mưa;  $\tau$  là khoảng thời gian thay đổi tốc độ mưa từ  $v$  về 0.

Hình dạng của giọt mưa được coi là cầu trong quá trình rơi. Khối lượng của giọt mưa là  $m = (1/6)\rho\pi d^3$  và  $\tau = vd/2$  là thời gian tác động. Lực tác động của một giọt mưa lên tuabin gió trong khoảng thời gian rất ngắn  $\tau$  có thể được tính toán bằng phương trình:

$$F(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau f(t)dt = \frac{mv}{\tau} = \frac{1}{6\tau} \rho\pi d^3 v \tag{5}$$

Ở đây,  $\rho$  là mật độ mưa rơi và  $d$  là đường kính giọt mưa. Lực tác động của một giọt mưa, có thể được chuyển thành dải phân bố đều như sau:

$$F_d = f(\tau) \frac{\alpha W}{S} = \frac{2}{9} N \rho \pi d^3 v^2 W \tag{6}$$

trong đó,  $S = \pi d^2/4$  là vùng tác động của giọt mưa;  $W$  là độ rộng của cấu trúc bị mưa tác động;  $\alpha$  là độ lấp đầy thể tích của mỗi loại giọt mưa.

Lực tác động của lượng mưa lên tuabin có thể được thể hiện dưới dạng lực theo hai hướng: hướng thẳng đứng và theo hướng gió, tùy theo thành phần của vận tốc đi của giọt mưa.

Mưa và bão có lúc xuất hiện riêng rẽ nhưng cũng có lúc xuất hiện đồng thời. Tương tự, khả năng tác động của gió và của mưa cũng là ngẫu nhiên. Đôi khi sức mạnh của gió rất lớn, nhưng của mưa lại không đáng kể và ngược lại. Sự phân bố tần suất và cường độ của gió và mưa có đặc điểm khí tượng theo từng khu vực với cơ chế phức tạp vượt quá phạm vi nghiên cứu học. Để một phân tích khả thi và đơn giản, trong bài báo này, tác động của gió là chính như mục đích thiết kế chức năng của tuabin gió và tác động của mưa chỉ như một đóng góp bổ sung. Đó là, chỉ có tác dụng của gió và mưa cùng nhau được xem xét và được giả định là một tác động thống nhất. Phương pháp mô phỏng này không chỉ có thể giải quyết được bản chất của vấn đề mà còn đơn giản hoá tính toán.

**3. ĐỘ ƯỚT DƯỚI MƯA**

Trong lúc trời đổ mưa, bạn đi vào chỗ đỗ xe gần nhất ở phía trước của một siêu thị, bạn sẽ lo bị ướt vì không có ô,

nhưng tâm trí toán học của bạn thắc mắc, làm sao chạy qua bãi đậu xe đến cửa siêu thị mà giữ được càng khô càng tốt? Liệu bạn sẽ làm được vậy nếu chạy nhanh hơn? Liệu có một tốc độ tối ưu mà sẽ giảm thiểu được mức độ ướt trên người bạn?

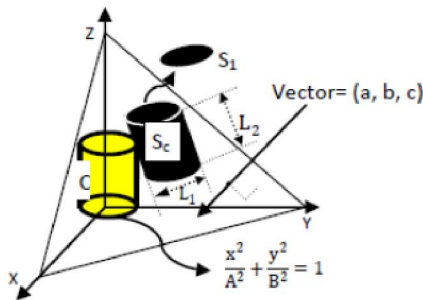
Một vấn đề tương tự như vậy với tuabin gió trong thời tiết có mưa. Liệu có một tốc độ gió hữu ích tối ưu để giảm thiểu được mức độ ướt trên cánh tuabin được không? Nếu có, thì sẽ có một công suất tối ưu cho tuabin trong thời tiết mưa?

Giả định rằng mưa rơi xuống đồng đều với vận tốc không đổi (không có lốc). Vận tốc này được biểu diễn bằng vector  $v_r$  có thành phần theo phương thẳng đứng là âm. Ý tưởng chính là: tập trung vào khu vực bị lấp đầy bởi các giọt mưa tác động vào cánh tuabin trong quá trình quay trong gió. Gọi khu vực này là vùng bị mưa. Lượng nước để lại trên cánh tuabin sẽ tỷ lệ tương ứng với vùng mưa. Theo đó, áp dụng phương pháp đo lường hình học như một chỉ số về độ ướt toàn phần.

Giả sử trước tiên cánh tuabin đứng yên. Không phụ thuộc vào hình dạng của cánh, tại mỗi điểm  $P$  trên đó sẽ có một giọt mưa rơi trúng, từ đó có thể vẽ một đoạn thẳng có độ dài cố định vào không gian từ điểm  $P$  theo hướng  $v_r$  và kết luận rằng tất cả các giọt nước mưa sẽ rơi vào khu vực quanh điểm  $P$  trong một khoảng thời gian nhất định chính xác trên quỹ đạo này. Do đó khu vực mưa có thể tổng quát hóa như một hình trụ bao gồm sự kết hợp của tất cả các quỹ đạo rơi như vậy.

Tiếp theo, giả sử rằng cánh tuabin quay ở tốc độ không đổi do nhận một lượng gió hữu ích đi vào ở tốc độ không đổi dọc theo chiều ngang. Đặt một hệ tọa độ Descartes theo cách sao cho tháp tuabin đặt ở gốc và di chuyển tương đối theo chiều dương của trục  $x$ . Như vậy, vận tốc gió hữu ích là  $v_m = \{s, 0, 0\}$ . Các cánh tuabin đã tiếp xúc với các giọt mưa trong một khoảng thời gian hữu hạn, cụ thể là  $1/s$ . Khu vực mưa bao gồm tất cả các vị trí ban đầu để một giọt mưa có thể rơi trên cánh. Đặt  $Q$  là một vị trí tương ứng với một giọt mưa sẽ rơi vào ở thời điểm  $t$ . Sau đó, nó sẽ rơi tiếp tại điểm  $Q + v_r t$ . Điểm đó lại tiếp tục chuyển động tương đối cùng với tuabin  $P = Q + v_r t - v_m t$ . Như vậy tại mỗi điểm tiếp xúc với mưa  $P$  trên cánh tuabin ở thời điểm 0, điểm  $P + (v_r - v_m)t$  nằm trong vùng mưa khi  $0 \leq t \leq 1/s$ . Điều này cho thấy vùng mưa được tạo thành từ các đoạn thẳng song song với vector mưa biểu kiến  $v = v_r - v_m$ , điểm kết thúc nằm ở điểm tiếp xúc với cánh tuabin ở thời điểm 0 và có độ dài  $\|v\|/s$ . Từ đây, độ ướt toàn phần, hay vùng không gian quét của cánh tuabin quay khi bị mưa tác động  $W$  là tích giữa diện tích tiếp xúc dưới mưa với hình chiếu của vector  $v/s$  lên phương pháp tuyến với mặt đó. Để xác định vùng không gian quét của cánh tuabin khi quay, có thể coi chúng tạo nên một hình trụ có bán kính đáy bằng chính sai cánh hình chữ nhật. Sử dụng các thành phần vận tốc của mưa  $v_r = \{v_r, v_c, -k\}$ , trong đó thành phần tới  $v_r > 0$ , thành phần ngang  $v_c$  và thành phần rơi của mưa  $k > 0$ . Từ đây, vector  $v/s = \{v_r - s, v_c, -k\}/s$ . Tham khảo [23], trong hình 2, độ ướt khi đó có dạng:

$$W(s) = \frac{\pi R^2 |v_t - s| + 2aR\sqrt{v_c^2 + k^2}}{s} \quad (7)$$



$$S_1 = \frac{\pi AB |c|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}},$$

$$L_1 = \frac{2\sqrt{(Ab)^2 + (Ba)^2}}{\sqrt{a^2 + b^2}}, \quad L_2 = \frac{C\sqrt{a^2 + b^2}}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}$$

$$S_c = S_1 + L_1 L_2 = \frac{\pi AB |c| + 2\sqrt{(BCa)^2 + (CAB)^2}}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}$$

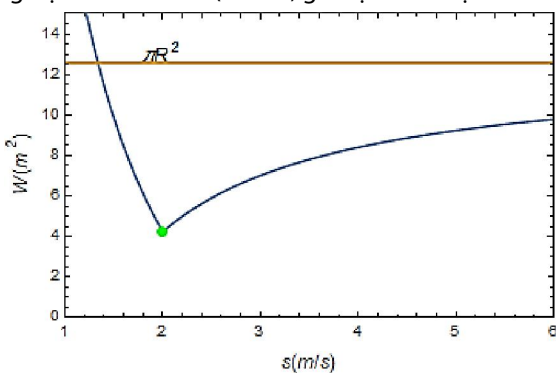
Hình 2. Diện tích bề mặt của hình trụ

Ở đây, a và R là nửa độ dày và bán kính của vùng không gian mà cánh tuabin quay tạo ra.

Để dàng nhận thấy rằng độ ướt này W có giá trị giới hạn ở  $\pi R^2$  (diện tích của hình chiếu lên mặt phẳng yz) khi  $s \rightarrow \infty$  và có một giá trị cực tiểu tuyệt đối tại điểm cực trị:

$$S_{opt} = v_t \quad (8)$$

Ví dụ, hãy xem xét một vùng không gian mà cánh tuabin quay tạo ra với các kích thước như sau:  $a = 0,3$  m (nửa độ rộng của cánh tuabin),  $R = 2$  m (độ dài sải cánh của tuabin), trong thời tiết mưa có tốc độ rơi xuống là  $k = 5$  m/s, tốc độ hướng thẳng vào tuabin  $v_t = 2$  m/s và tốc độ ngang  $v_c = 1$  m/s. Trong trường hợp này, tổng độ ướt  $W(s)$  đạt cực tiểu ở tốc độ gió hữu ích  $s = 2$  m/s bằng với tốc độ mưa hướng dọc theo tuabin (hình 3, giá trị  $s = 2$  được đánh dấu).



Hình 3. Độ ướt trên cánh tuabin trong trường hợp vùng không gian quét của cánh khi quay có dạng hình trụ

Từ hình 3, nhận thấy không gian quét của cánh có dạng hình chữ nhật, độ ướt giảm thiểu chỉ khi vận tốc gió hữu ích chính xác bằng với tốc độ mưa hướng dọc theo trục tuabin.

Từ đây, có ba tốc độ đáng được chú ý: tốc độ tới của mưa dọc theo trục tuabin, tốc độ tối ưu và tốc độ hữu ích cao nhất mà tuabin có thể nhận được, được ký hiệu là  $S_{max}$ .

Giả sử rằng thỏa mãn điều kiện  $0 < v_t < S_{max}$ . Khi đó, độ ướt được xem xét với tốc độ gió hữu ích ít lý tưởng  $v_t$  hay  $S_{max}$  so với nhận được ở tốc độ tối ưu. Hãy xem xét tỷ lệ:

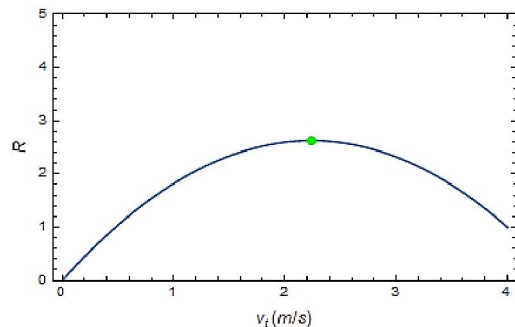
$$\chi = \frac{W(S_{max})}{W(S_{opt})} \quad (9)$$

Tỷ lệ này đo lường mức độ ướt của tuabin đang ở tốc độ cao nhất có thể so với chuyển động ở tốc độ tối ưu. Trong trường hợp vùng không gian quét của cánh có hình hình trụ, dễ dàng suy ra rằng tỷ lệ này được tối đa hóa khi vận tốc ngang  $v_c = 0$ . Nói cách khác, hướng mưa di chuyển chính xác theo hướng dọc theo trục tuabin. Trong trường hợp hình này, tỷ số  $\chi$  dễ dàng tính được:

$$\chi = \frac{v_t [2ak + \pi c(S_{max} - v_t)]}{2akS_{max}} \quad (10)$$

$$\chi_{max} = \frac{1}{2} + \frac{ak}{2\pi cS_{max}} + \frac{\pi cS_{max}}{8ak} \quad (11)$$

Nếu thay các giá trị của thông số,  $a = 0,3$  m,  $c = 2$  m, trong thời tiết mưa có tốc độ rơi xuống là  $k = 5$  m/s và sử dụng tốc độ gió hữu ích  $S_{max} = 4$  m/s, thì thấy rằng trong trường hợp xấu nhất ( $v_t = 2,24$  m/s),  $R$  xấp xỉ 2,62. Nghĩa là, cánh tuabin chịu ướt nhiều hơn 162% so với ở tốc độ tối ưu. Chú ý rằng tỷ lệ  $R$  nhạy với những thay đổi ở cả  $S_{max}$  và  $k$ . Tỷ lệ này sẽ cao hơn trong điều kiện mưa nhẹ ( $k$  nhỏ) và cũng sẽ cao hơn khi chạy nhanh hơn (hình 4).



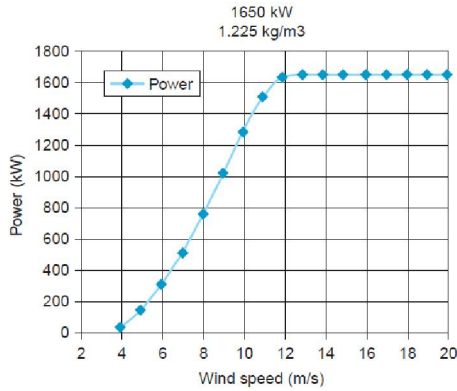
Hình 4. Tỷ số độ ướt trên cánh tuabin khi tốc độ gió hữu ích và tốc độ gió tối ưu đối với tuabin có cánh hình chữ nhật

#### 4. CÔNG SUẤT PHÁT ĐIỆN GIÓ

Sản lượng điện của tuabin gió thay đổi theo tốc độ gió và mỗi tuabin gió có một đường cong công suất đặc trưng [24]. Với đường cong như vậy, có thể đoán được sản lượng năng lượng của tuabin gió mà không cần xem xét các chi tiết kỹ thuật của các thành phần khác nhau. Đường cong công suất cho sản lượng điện như là hàm của tốc độ gió trung tâm. Công suất điện ở một tốc độ gió đã cho có dạng:

$$P(u) = \frac{1}{2} \rho A u^3 \quad (15)$$

trong đó,  $A = \pi R^2$  là diện tích vùng quét của cánh tuabin. Nhưng trong thực tế, công suất tuabin gió được biểu diễn bằng đường cong trên hình 5. Hình 5 mô tả làm sao có thể thu được đường cong trên từ một mô hình giải tích của tuabin gió (hiện nay, thông thường các đường cong này dựa trên dữ liệu thực nghiệm).



Hình 5. Đường công suất của một tuabin thực 1650 kW

Phân tích thống kê có thể được sử dụng để xác định tiềm năng năng lượng gió và đánh giá công suất ra của một tuabin gió. Để phân tích thống kê, hàm phân bố xác suất được sử dụng nhằm mô tả khả năng xảy ra các giá trị nhất định của một biến ngẫu nhiên (như ở đây là tốc độ gió).

Tần số xuất hiện của tốc độ gió có thể được mô tả bởi hàm mật độ xác suất,  $f(u)$  phụ thuộc vào tốc độ gió. Hàm mật độ xác suất có thể được sử dụng để biểu thị xác suất của một tốc độ gió xảy ra giữa  $u_a$  và  $u_b$ :

$$p(u_a \leq v \leq u_b) = \int_{u_a}^{u_b} f(u) du \tag{16}$$

Nếu biết  $f(u)$ , công suất ra của một tuabin có thể được tính theo công thức:

$$P(u_a \leq v \leq u_b) = \int_{u_a}^{u_b} P(u) f(u) du \tag{17}$$

Phân bố xác suất thường được sử dụng trong phân tích dữ liệu gió là phân bố Weibull. Phân bố Weibull dựa trên hai tham số - thông số cấu hình  $\kappa$  và thông số thang đo  $\lambda$  (tương đương với vận tốc gió trung bình, đơn vị m/s), và do đó, có thể đại diện cho nhiều chế độ gió hơn:

$$f(u) = \frac{\kappa}{\lambda} \left(\frac{u}{\lambda}\right)^{\kappa-1} e^{-\left(\frac{u}{\lambda}\right)^\kappa} \tag{18}$$

Từ đây, công suất ra rotor lớn nhất của một tuabin gió lý tưởng tính lũy tới vận tốc gió hữu ích  $s$  sử dụng phân bố Weibull có dạng:

$$P(s) = \frac{1}{2} \rho A \int_0^s u^3 f(u) du \tag{19}$$

với  $\kappa \geq 1$ .

Lấy tích phân (19), công suất ra của một tuabin gió có dạng:

$$P(s) = \frac{1}{2} \rho A s^3 \left\{ \frac{3\lambda^3 \left[ \Gamma\left(\frac{3}{\kappa}\right) - \Gamma\left(\frac{3}{\kappa}, \frac{s^\kappa}{\lambda^\kappa}\right) \right]}{\kappa s^3} - e^{-\left(\frac{s}{\lambda}\right)^\kappa} \right\} \tag{20}$$

Công suất của tuabin (15) cũng có thể được hiệu chỉnh bằng hệ số công suất gió  $C_p$  và hiệu suất truyền động  $\eta$ .

$$P(s) = \frac{1}{2} \rho A C_p \eta s^3 \tag{21}$$

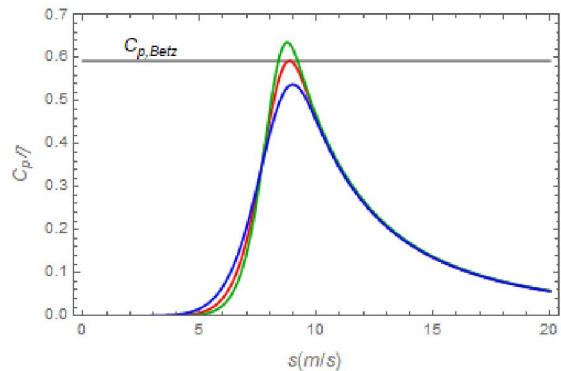
So sánh (20) và (21), có thể tìm được biểu thức hệ số công suất gió:

$$C_p \eta = \frac{3\lambda^3 \left[ \Gamma\left(\frac{3}{\kappa}\right) - \Gamma\left(\frac{3}{\kappa}, \frac{s^\kappa}{\lambda^\kappa}\right) \right]}{\kappa s^3} - e^{-\left(\frac{s}{\lambda}\right)^\kappa} \tag{22}$$

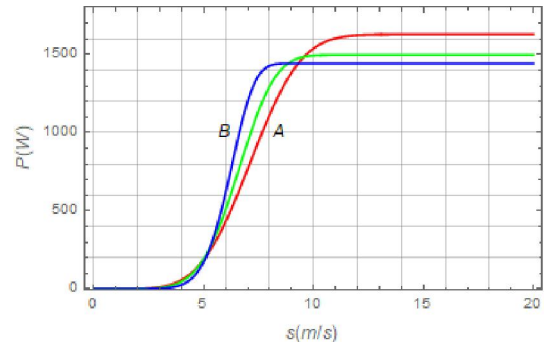
Với  $\eta \leq 1$ ,  $C_p \leq C_{p,Betz}$  ( $C_{p,Betz} = 16/27$ , gọi là giới hạn Betz), phương trình (22) suy ra:

$$\frac{3\lambda^3 \left[ \Gamma\left(\frac{3}{\kappa}\right) - \Gamma\left(\frac{3}{\kappa}, \frac{s^\kappa}{\lambda^\kappa}\right) \right]}{\kappa s^3} - e^{-\left(\frac{s}{\lambda}\right)^\kappa} \leq C_{p,Betz} \tag{23}$$

Phương trình này được giải bằng hình hình 6 cho kết quả  $\kappa \leq 10$ , với mọi giá trị của  $\lambda$ .  $\kappa$  càng lớn thì khoảng cách giữa tốc độ gió ở điểm bật công suất (cut-in) và tốc độ gió ở công suất định mức (rated power) sẽ càng nhỏ. Một số minh họa được cho trên hình 7 cho thấy sự thay đổi của công suất theo thông số cấu hình  $\kappa$ , với  $R = 2$  m,  $\rho = 1,2$  kg/m<sup>3</sup>. Trong đó, đường A (màu đỏ) tương tự như đường công suất trên hình 5, với giá trị  $C_p \eta \approx 0,3$  được xác định khi  $\kappa = 3$  và  $\lambda = 6$  m/s.

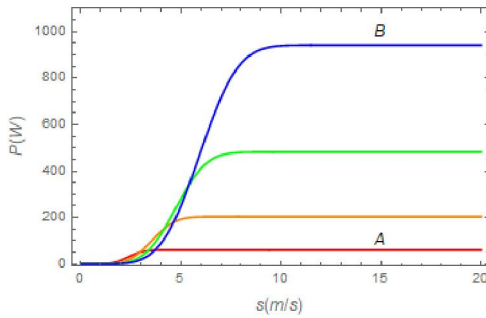


Hình 6. Hệ số công suất phụ thuộc vào tốc độ gió ứng với các thông số cấu hình ( $\kappa = 8, 10, 12$  tương ứng với các đường màu lam, đỏ, lục) với thông số  $\lambda = 8$  m/s.



Hình 7. Đường công suất với sự thay đổi của thông số cấu hình ( $\kappa = 3, 4$  và  $6$  tương ứng từ A đến B) với thông số  $\lambda = 6$  m/s. Đường A (màu đỏ) tương tự như đường công suất của một tuabin thực 1650kW (hình 5).

Ở đây,  $\lambda$  xấp xỉ gần điểm vận tốc ứng với công suất trung bình từ điểm bật đến điểm định mức. Như vậy, giá trị công suất định mức tăng lên khi thông số  $\lambda$  tăng (hình 8).

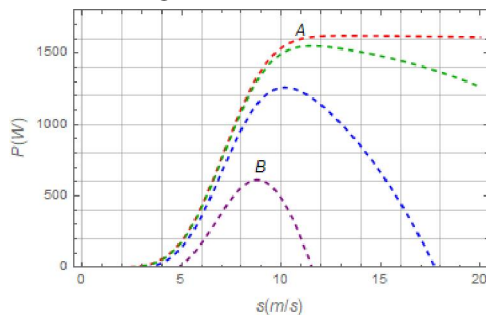


Hình 8. Đường công suất với sự thay đổi của thông số  $\lambda$  ( $\lambda = 2, 3, 4$ , và  $5$  m/s tương ứng từ A đến B) với thông số  $\kappa = 3$ .

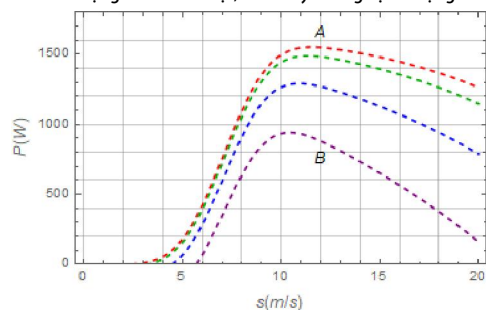
Khi tính đến tác động của mưa, công suất bị suy giảm một lượng  $F_d s$ :

$$P(d)s = P(s) - F_d s \quad (24)$$

với  $F_d$  từ biểu thức (6) và độ ướt  $W$  từ biểu thức (7a) hoặc (7b). Sự ảnh hưởng của kích thước giọt mưa lên công suất được cho ở hình 9, ứng với  $l = 50$  mm/h,  $v_t = 2$  m/s,  $v_c = 1$  m/s,  $k = 5$  m/s, và các thông số  $\kappa = 3$  và  $\lambda = 6$  m/s. Tương tự, khi các thông số khác tăng lên, như vận tốc tới của mưa, vận tốc ngang, vận tốc rơi và lượng mưa cũng làm suy giảm công suất theo chiều hướng như vậy, nhưng không ảnh hưởng mạnh như đường kính của giọt mưa. Ví dụ như trường hợp công suất sụt giảm do vận tốc mưa ngang tăng lên (hình 10), ứng với  $l = 50$  mm/h,  $d = 0,2$  cm,  $v_t = 2$  m/s,  $k = 5$  m/s và các thông số  $\kappa = 3$  và  $\lambda = 6$  m/s.



Hình 9. Đường công suất bị sụt giảm do ảnh hưởng của kích thước giọt mưa ( $d = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$  cm tương ứng với các đường từ A đến B). Các đường đứt nét ứng với cánh tuabin dạng hình chữ nhật, cho thấy chúng bị tác động nhiều hơn



Hình 10. Đường công suất bị sụt giảm do ảnh hưởng của vận tốc ngang của mưa ( $v_c = 0,1; 10; 20; 30$  m/s tương ứng với các đường từ A đến B). Các đường đứt nét ứng với cánh tuabin dạng hình chữ nhật, cho thấy bị tác động nhiều hơn

## 5. KẾT LUẬN

Với sự phát triển của điện gió cũng như sự gia tăng của các sự kiện mưa và gió cực kỳ mạnh, các tuabin gió có thể bị

ảnh hưởng do gió và mưa. Trong bài báo này, đề xuất một phương pháp phân tích năng lượng của tuabin gió dưới điều kiện của mưa và mưa bão. Các kết luận chính như sau:

- (1) Bài báo này là bài đầu tiên tìm hiểu sự ảnh hưởng của mưa lên công suất của tuabin gió. Phân bố kích thước hạt mưa được mô phỏng bằng phổ M-P, và lực tác động của mưa được tính theo định lý xung lượng.
- (2) Độ ướt trên cánh tuabin có mối liên quan chặt chẽ với lực tác động của mưa. Kết quả cho thấy có một độ ướt tối ưu ứng với vận tốc hữu ích mà tuabin nhận được để tạo nên công suất phát điện. Ở giá trị tối ưu này, lực tác động của mưa lên cánh tuabin cũng nhỏ nhất và do đó sự sụt giảm công suất do mưa cũng nhỏ nhất.
- (3) Đường đặc tính của công suất được tính theo phân tích thống kê khá phù hợp với đường đặc tính đo được thực tế, chỉ với cách chọn các thông số cấu hình và thang đo phù hợp.
- (4) Sự sụt giảm của công suất do mưa thể hiện đáng kể khi kích thước của giọt mưa tăng lên. Điều đó dễ hiểu, vì khi mưa càng nặng hạt, thì càng ảnh hưởng đến tốc độ quay của cánh tuabin. Sự sụt giảm của công suất cũng ảnh hưởng mạnh khi vận tốc mưa ngang tăng lên. Nghĩa là khi có mưa tạt nhiều, cũng ảnh hưởng đến tốc độ quay của cánh tuabin. Sự sụt giảm công suất cũng bị ảnh hưởng nhẹ khi các thông số khác như lượng mưa, vận tốc mưa tới, vận tốc mưa rơi tăng lên. Tuy nhiên, vẫn có thể tìm được công suất tốt nhất tùy từng trường hợp ứng với vận tốc gió hữu ích tại độ ướt tối ưu, hay lực tác động của mưa là nhỏ nhất. Như vậy, để giảm thiểu ảnh hưởng của mưa và bão, có thể cần phải cải tiến các chiến lược kiểm soát cho tuabin gió để chống lại các tình huống đặc biệt, chẳng hạn như sự thay đổi đột ngột của hướng gió hay hướng mưa.

Bài báo này cũng là kết quả của phương pháp mô phỏng để dự đoán những tính chất cho tuabin có kích thước hình học và điều kiện bị ảnh hưởng khác nhau của mưa. Hình ảnh về độ ướt, lực tác động của mưa và công suất phát điện được minh họa trực quan bằng hình ảnh động có tương tác và điều chỉnh tùy theo mục đích sử dụng. Kết quả mô phỏng cho thấy, độ ướt và lực tác động của mưa có giá trị tối ưu và công suất bị suy giảm khi tăng các thông số như lượng mưa, kích thước giọt mưa, tốc độ tới, ngang và rơi của mưa. Từ mô phỏng này còn có thể dự toán được công suất tốt nhất ứng với độ ướt tối ưu, hay lực tác động của mưa là nhỏ nhất.

Khả năng kinh tế yêu cầu các cấu hình tối ưu của các thành phần của tuabin gió. Để phát triển một hệ thống tối ưu, điều cần thiết là phải có một mô hình khả thi. Mặc dù đã có những nghiên cứu trước, nhưng chủ yếu là cho những dao động cơ học trong điều kiện gió lớn, hay mưa bão lớn, mà chưa đưa ra được sự ảnh hưởng của mưa lên công suất với các dự đoán cụ thể ứng với nhiều điều kiện

khác nhau. Mô hình được đưa vào mô phỏng trong nghiên cứu này tương đối đơn giản nhưng vẫn cho những kết quả khá chính xác. Bởi vậy mô hình này có thể được sử dụng để tìm những điều kiện tối ưu khi vận hành tuabin trong điều kiện mưa gió.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. B. K. Sahu, M. Hiloidhari, and D. C. Baruah, 2012. "Global trend in wind power with special focus on the top five wind power producing countries". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 348-359.
- [2]. I. Lavassas, G. Nikolaidis, P. Zervas, E. Efthimiou, I. N. Doudoumis, and C. C. Baniotopoulos, 2003. "Analysis and design of the prototype of a steel 1-MW wind turbine tower". *Engineering Structures*, vol. 25, no. 8, pp. 1097-1106.
- [3]. P. J. Murtagh, B. Basu, and B. M. Broderick, 2005. "Along-wind response of a wind turbine tower with blade coupling subjected to rotationally sampled wind loading". *Engineering Structures*, vol. 27, no. 8, pp. 1209-1219.
- [4]. J. Li, J. Chen, and X. Chen, 2011. "Aerodynamic response analysis of wind turbines". *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 25, no. 1, pp. 89-95.
- [5]. E. C. C. Choi, 1983. "Gradient height and velocity profile during typhoons". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 13, no. 1-3, pp. 31-41.
- [6]. Y. L. Xu and L. D. Zhu, 2005. "Buffeting response of long-span cable supported bridges under skew winds. Part 2: case study". *Journal of Sound and Vibration*, vol. 281, no. 3-5, pp. 675-697.
- [7]. J. R. Wu, P. F. Liu, and Q. S. Li, 2007. "Effects of amplitude-dependent damping and time constant on wind-induced responses of super tall building". *Computers and Structures*, vol. 85, no. 15-16, pp. 1165-1176.
- [8]. Q. S. Li and J. R. Wu, 2007. "Time-frequency analysis of typhoon effects on a 79-storey tall building". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 95, no. 12, pp. 1648-1666.
- [9]. Q. S. Li, Y. Q. Xiao, J. R. Wu, J. Y. Fu, and Z. N. Li, 2008. "Typhoon effects on super-tall buildings". *Journal of Sound and Vibration*, vol. 313, no. 3-5, pp. 581-602.
- [10]. S. Rose, P. Jaramillo, M. J. Small, I. Grossmann, and J. Apt, 2012. "Quantifying the hurricane risk to offshore wind turbines". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 109, no. 9, pp. 3247-3252.
- [11]. T. Ishihara, A. Yamaguchi, K. Takahara, T. Mekar, and S. Matsuura, 2005. "An analysis of damaged wind turbines by typhoon maemi in 2003". *Proceedings of the 6th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering*, pp. 1413-1428, Seoul, Korea.
- [12]. L. X. Hong and B. Moller, 2012. "An economic assessment of tropical cyclone risk on offshore wind farms". *Renewable Energy*, vol. 44, pp. 180-192.
- [13]. Z.Q. Li, S. J. Chen, H. Ma, and T. Feng, 2012. "Design defect of wind turbine operating in typhoon activity zone". *Engineering Failure Analysis*, vol. 27, pp. 165-172.
- [14]. E. C. C. Choi, 2001. "Wind-driven rain and driving rain coefficient during thunderstorms and non-thunderstorms". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 89, no. 3-4, pp. 293-308.
- [15]. S. F. Chen and X. P. Wu, 2011. "Numerical study of wind-driven rain distribution on low-rise buildings with different roof styles". *Proceedings of the International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE '11)*, pp. 3282-3285, April 2011.
- [16]. D. B. Xin, H. Li, L. Wang, and J. P. Ou, 2012. "Experimental study on static characteristics of the bridge deck section under simultaneous actions of wind and rain". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 107-108, pp. 17-27.
- [17]. H. N. Li and H. F. Bai, 2006. "High-voltage transmission tower-line system subjected to disaster loads". *Progress in Natural Science*, vol. 16, no. 9, pp. 899-911.
- [18]. H.N. Li, Y.M. Ren, and H. F. Bai, 2007. "Rain-wind-induced dynamic model for transmission tower system". *Proceedings of the CSEE*, vol. 27, no. 30, pp. 43-48.
- [19]. M. Abuku, H. Janssen, J. Poesen, and S. Roels, 2009. "Impact, absorption and evaporation of raindrops on building facades". *Building and Environment*, vol. 44, no. 1, pp. 113-124.
- [20]. W. L. Chen and Z. L. Wang, 1991. "The trial research on the behaviours of artificial rainfall by simulation". *Bulletin of Soil and Water Conservation*, vol. 11, no. 2, pp. 55-62.
- [21]. J. Marshall and W. Palmer, 1948. "The distribution of raindrops with size". *Journal of Meteorology*, vol. 5, pp. 165-166.
- [22]. E. Villermaux and B. Bossa, 2009. "Single-drop fragmentation determines size distribution of raindrops". *Nature Physics*, vol. 5, no. 9, pp. 697-702.
- [23]. Seongtaek Seo, 2015. "Run or walk in the rain? (orthogonal projected area of ellipsoid)". *IOSR Journal of Applied Physics (IOSR-JAP)*, e-ISSN: 2278-4861. Volume 7, Issue 2 Ver. I, pp. 139-150.
- [24]. J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, 2009. "Wind energy explained: theory, design and application". 2nd Edition, John Wiley & Sons Publishing.