

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ YẾU TỐ KHÍ HẬU ĐẾN NĂNG LƯỢNG CỦA TRẠM ĐIỆN GIÓ - ÁP DỤNG CHO DỰ ÁN ĐIỆN GIÓ SEPON CỦA CHDCND LÀO

Hồ Ngọc Dung^{1*}, Trịnh Quốc Công¹

Tóm tắt: Bài báo này nghiên cứu ảnh hưởng của một số yếu tố khí hậu như nhiệt độ, độ ẩm không khí đến sản lượng điện của các trạm điện gió. Ảnh hưởng của sự biến động mật độ không khí do yếu tố nhiệt độ và độ ẩm đến điện lượng của trạm điện gió được nghiên cứu bằng cách sử dụng dữ liệu đo lường của dự án điện gió Sepon dự kiến được xây dựng tại Lào. Các phân tích và tính toán mô phỏng xác định điện lượng được thực hiện trong phần mềm WAsP 12. Kết quả cho thấy yếu tố nhiệt độ ảnh hưởng đáng kể đến mật độ không khí dẫn đến sự giảm 6% sản lượng điện khi nhiệt độ tăng từ 10°C lên 40°C, trong khi độ ẩm có ảnh hưởng không đáng kể với sự thay đổi chỉ 0,4% sản lượng điện khi độ ẩm giảm từ 100% xuống 30%. Do nhiệt độ không khí ảnh hưởng tương đối lớn đến việc dự báo sản lượng điện của trạm điện gió nên cần đưa yếu tố nhiệt độ thực đo tại vị trí dự án vào quá trình tính toán thiết kế xác định sản lượng điện để đảm bảo đến các tính toán tài chính và hiệu quả đầu tư của dự án.

Từ khóa: Điện gió, nhiệt độ, độ ẩm.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Việt Nam được đánh giá là quốc gia có tiềm năng điện gió lớn nhất khu vực Đông Nam Á, nhờ đường bờ biển dài hơn 3.260 km và vùng biển rộng với tốc độ gió mạnh và ổn định. Theo Báo cáo của Ngân hàng Thế giới (World Bank, 2019), tổng tiềm năng điện gió ngoài khơi của Việt Nam ước tính khoảng 475 GW. Quy hoạch phát triển điện lực quốc gia giai đoạn 2021–2030, tầm nhìn đến năm 2050 (Quy hoạch Điện VIII, 2023) được phê duyệt ngày 15/5/2023, đã xác định điện gió là một trong những nguồn năng lượng trọng điểm trong chiến lược chuyển dịch năng lượng bền vững. Cụ thể, đến năm 2030, tổng công suất điện gió trên bờ và gần bờ (nearshore) dự kiến đạt 21.880 MW, chiếm khoảng 17% tổng công suất nguồn điện quốc gia, trong khi điện gió ngoài khơi dự kiến đạt 6.000 MW, tập trung phát triển tại các khu vực Bạch Long Vĩ, Cà Mau và Bình Thuận. Đến năm 2050, công suất điện gió ngoài khơi được kỳ vọng đạt từ 70.000 MW đến 91.500 MW, trở thành nguồn điện chủ lực cùng với điện mặt trời, góp phần đảm bảo an ninh năng lượng và thực hiện các cam kết quốc tế về giảm phát thải khí nhà kính.

Năng lượng gió được coi là một trong những nguồn năng lượng tái tạo tiềm năng, tuy nhiên, hiệu suất khai thác nguồn năng lượng này chịu ảnh hưởng mạnh mẽ từ các yếu tố thời tiết. Các yếu tố khí

tượng như tốc độ gió, hướng gió, nhiệt độ, độ ẩm và áp suất không khí có tác động trực tiếp đến khả năng chuyển đổi năng lượng gió thành điện năng. Tốc độ gió, yếu tố quan trọng nhất trong quá trình phát điện từ năng lượng gió, không chỉ quyết định lượng năng lượng có thể khai thác mà còn ảnh hưởng đến hiệu suất của các tua-bin gió. Ngoài ra, các yếu tố khí hậu khác như nhiệt độ và độ ẩm có thể làm thay đổi mật độ không khí, từ đó ảnh hưởng đến công suất tối đa mà tua-bin có thể sản xuất. Sự biến động của các yếu tố này theo mùa và vị trí địa lý tạo ra sự thay đổi lớn trong khả năng khai thác năng lượng gió tại các khu vực khác nhau, đặc biệt là đối với các dự án điện gió ngoài khơi. Do đó, việc phân tích và hiểu rõ ảnh hưởng của các yếu tố khí hậu này là điều kiện tiên quyết để tối ưu hóa thiết kế và vận hành các hệ thống năng lượng gió, cũng như dự đoán sản lượng điện trong các điều kiện khí hậu khác nhau.

Hiện nay, trong quá trình tính toán và thiết kế trạm điện gió, chủ yếu sử dụng số liệu đo vận tốc gió để dự báo sản lượng điện. Các yếu tố thời tiết khác như nhiệt độ và độ ẩm vẫn chưa được tính toán một cách đầy đủ và chính xác trong các mô hình năng lượng gió. Nhiệt độ cao hoặc thấp có thể làm thay đổi đặc tính vật lý của không khí, từ đó ảnh hưởng đến lượng năng lượng mà gió mang lại. Tương tự, độ ẩm có thể làm thay đổi mật độ không khí, dẫn đến việc thay đổi khả năng sinh công của các tua-bin gió. Do đó, trong bài báo này, chúng tôi sẽ tập trung nghiên cứu và phân tích tác động của nhiệt độ và độ

¹Trường Đại học Thủy lợi

* Tác giả liên hệ

âm đến năng lượng gió, nhằm cung cấp một cái nhìn toàn diện hơn về ảnh hưởng của các yếu tố khí hậu đến năng lượng của trạm điện gió.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Tính toán năng lượng gió

Công suất điện gió được xác định như sau (Burton et al., 2001)

$$P_T = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot u^3 \quad (1)$$

Trong đó:

P_T - Công suất điện gió, W

ρ - Khối lượng riêng không khí, tại nhiệt độ tiêu chuẩn 15°C $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$

A - Diện tích bề mặt cánh tua-bin, m^2

u - Vận tốc gió, m/s

C_p - Hệ số công suất hoặc hệ số sử dụng năng lượng gió

Công thức (1) cho thấy ngoài yếu tố vận tốc ảnh hưởng lớn đến năng lượng gió thì yếu tố mật độ không khí là một tham số then chốt khi tính toán năng lượng gió. Mật độ không khí, được định nghĩa là khối lượng của không khí trên một đơn vị thể tích (thường tính bằng kg/m^3), là một đại lượng vật lý quan trọng trong nhiều lĩnh vực như hàng không, khí tượng và năng lượng gió. Mật độ không khí không phải là một hằng số mà thay đổi phụ thuộc vào nhiều yếu tố môi trường như:

- Nhiệt độ: Khi nhiệt độ tăng, các phân tử khí chuyển động nhanh hơn, làm cho không khí giãn nở và mật độ giảm. Ngược lại, khi nhiệt độ giảm, không khí co lại và mật độ tăng. Do đó, ở những khu vực có khí hậu nóng, mật độ không khí thường thấp hơn so với vùng lạnh.

- Áp suất khí quyển: Mật độ không khí tỷ lệ thuận với áp suất. Khi áp suất tăng, các phân tử khí bị nén chặt lại, làm tăng mật độ không khí. Ngược lại, áp suất giảm sẽ dẫn đến mật độ thấp hơn. Áp suất khí quyển thay đổi theo độ cao và điều kiện thời tiết.

- Độ cao so với mực nước biển: Càng lên cao, áp suất khí quyển giảm do lớp không khí mỏng hơn, dẫn đến mật độ không khí giảm theo. Đây là lý do tại sao ở những khu vực núi cao, không khí loãng hơn nhiều so với vùng đồng bằng.

- Độ ẩm: Không khí ẩm chứa nhiều hơi nước hơn không khí khô. Vì phân tử nước (H_2O) nhẹ hơn các phân tử chính của không khí khô như nitơ (N_2) và oxy (O_2), nên khi độ ẩm tăng, mật độ không khí giảm. Điều này có nghĩa là cùng một điều kiện áp suất và nhiệt độ, không khí ẩm sẽ nhẹ hơn không khí khô.

Mật độ không khí là kết quả của sự tương tác phức tạp giữa nhiệt độ, áp suất, độ cao và độ ẩm.

Việc hiểu rõ các yếu tố này là rất cần thiết trong tính toán năng lượng gió.

2.2. Tương quan giữa mật độ không khí với nhiệt độ và độ ẩm môi trường

Nhiệt độ môi trường có ảnh hưởng trực tiếp và rõ rệt đến mật độ không khí. Theo phương trình khí lý tưởng (Borgnakke et al., 2022), mật độ không khí (ρ) tỉ lệ nghịch với nhiệt độ tuyệt đối (T) khi áp suất không đổi:

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \quad (2)$$

Trong đó:

ρ - Mật độ không khí (kg/m^3)

P - Áp suất khí quyển (Pa)

R - Hằng số khí (287 J/kg.K)

T - Nhiệt độ tuyệt đối (K)

Đối với không khí ẩm, áp suất toàn phần của không khí là tổng của áp suất riêng của không khí khô và áp suất riêng của phần hơi nước do đó mật độ không khí ẩm được tính như sau:

$$\rho = \rho_d + \rho_v = \frac{P_d}{R_d \cdot T} + \frac{P_v}{R_v \cdot T} \quad (3)$$

Trong đó:

ρ - Mật độ không khí (kg/m^3)

P_d - Áp suất riêng phần của không khí khô (Pa)

P_v - Áp suất riêng phần của hơi nước (Pa)

R_d - Hằng số khí riêng của không khí khô ($R_d = 287,05 \text{ J/(kg.K)}$)

R_v - Hằng số khí riêng của hơi nước ($R_v = 461,5 \text{ J/(kg.K)}$)

T - Nhiệt độ tuyệt đối (K)

Áp suất riêng phần của hơi nước (P_v) có thể được xác định từ độ ẩm tương đối (RH) và áp suất bão hòa hơi nước (P_{sat}) theo công thức:

$$P_v = RH \cdot P_{sat}$$

Trong đó:

RH - Độ ẩm tương đối của không khí

P_{sat} - là áp suất bão hòa của hơi nước ở nhiệt độ T

Công thức (2) chỉ ra mật độ không khí tỉ lệ nghịch với nhiệt độ. Khi nhiệt độ tăng, các phân tử không khí chuyển động nhanh hơn, giãn nở và làm giảm mật độ. Đối với các tua-bin gió, sự thay đổi này dẫn đến biến động công suất đáng kể, vì năng lượng gió tỉ lệ thuận với mật độ không khí. Do đó, trong thiết kế và đánh giá năng lượng của trạm điện gió, việc tính toán chính xác ảnh hưởng của nhiệt độ đến mật độ không khí từ đó ảnh hưởng đến năng lượng gió cần thiết để đảm bảo dự báo năng lượng chính xác và vận hành hệ thống hiệu quả.

Để đánh giá được mức độ ảnh hưởng của nhiệt độ và độ ẩm không khí đến năng lượng của trạm điện gió, trong bài báo này tính toán, phân tích cụ thể cho trạm điện gió Sepon dự kiến được xây dựng

tại nước Cộng hòa Dân chủ Nhân dân Lào. Lý do chọn trạm Sepon là trạm này có số liệu đo các yếu tố khí hậu đầy đủ bao gồm vận tốc gió, hướng gió, độ ẩm và nhiệt độ không khí trong khoảng thời gian 15 tháng.

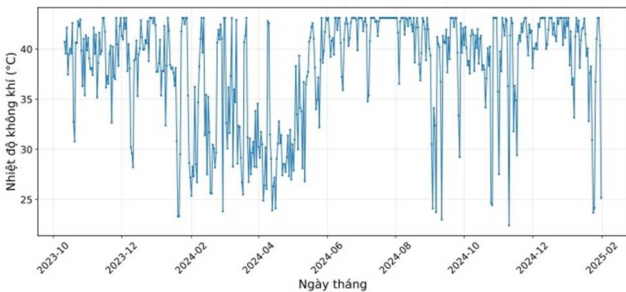
2.3. Số liệu tính toán

Dự án nhà máy điện gió Sepon (Sepon Wind Energy Plant Project, 2023) được đặt tại huyện Sepon, tỉnh Savannakhet, CHDCND Lào, nằm liền kề và ở phía Tây của huyện Hướng Hóa, tỉnh Quảng Trị, Việt Nam. Nhà máy dự kiến lắp đặt 66 tua-bin gió loại 4,5MW. Tổng công suất lắp đặt là 297MW.

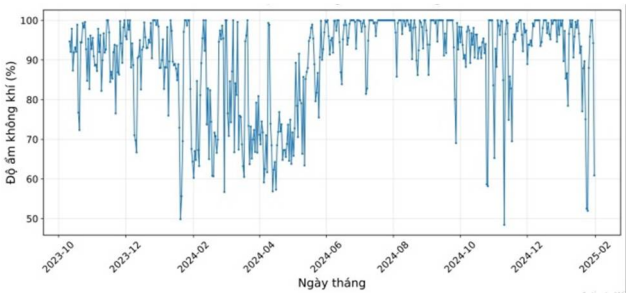
Bảng 1. Kết quả phân tích mức độ phù hợp của phân bố Weibull

TT	Thông số	Đơn vị	Giá trị
1	Loại tua-bin gió		GW-155-4.5
2	Số lượng	cái	66
3	Công suất lắp đặt	MW	297
4	Chiều cao lắp đặt	m	140
5	Điện lượng trước tổn thất	GWh	1259.55
6	Tổn thất che chắn	%	2,56
7	Điện lượng sau tổn thất	GWh	1227.28
8	Số giờ đầy tải tương đương	Giờ	4300

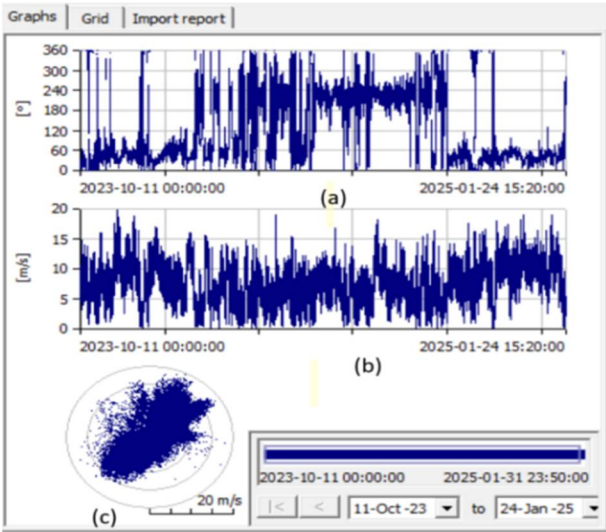
Số liệu đo gió tại vị trí dự án được thực hiện từ tháng 10 năm 2023 đến tháng 01 năm 2025. Giá trị số liệu đo tốc độ gió, nhiệt độ, độ ẩm được cho trong các biểu đồ sau:



Hình 1. Biểu đồ nhiệt độ không khí



Hình 2. Biểu đồ độ ẩm không khí



Hình 3. Biểu đồ số liệu đo gió (a-Hướng gió; b-Vận tốc gió, c-Hoa gió)

Kết quả đo tại vị trí dự án cho thấy nhiệt độ không khí tại khu vực dự án dao động từ khoảng 20°C đến 43°C. Phần lớn thời gian tại khu vực này có nhiệt độ cao từ 35°C trở lên.

Độ ẩm không khí trong khu vực dự án cũng biến đổi khá lớn. Độ ẩm lớn nhất là 100% trong khi độ ẩm thấp nhất là 30%.

Tốc độ gió trong khu vực khá lớn, tốc độ gió trung bình đạt 7.2m/s. Với vận tốc gió này rất phù hợp xây dựng trạm điện gió tại khu vực này.

2.4. Phương pháp tính toán đánh giá ảnh hưởng của độ ẩm và nhiệt độ đến năng lượng gió

Để đánh giá ảnh hưởng của độ ẩm cũng như nhiệt độ không khí đến sản lượng điện gió của trạm điện gió Sepon, bài báo sử dụng phần mềm WAsP 12 tiến hành tính toán.

Phần mềm WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) là phần mềm chuyên dụng hàng đầu trong lĩnh vực phân tích tài nguyên gió và thiết kế trang trại điện gió do Viện Công nghệ Gió của Đan Mạch (DTU Wind Energy) phát triển. WAsP 12 cho phép tính toán, phân tích:

- Phân tích dữ liệu gió từ đo đạc thực tế, dữ liệu được đưa vào mô hình bằng cách thiết lập trạm đo gió tại độ cao 140m như hình 4.
- Mô phỏng địa hình, chướng ngại vật, và bề mặt tác động đến dòng gió
- Xây dựng bản đồ gió (wind atlas) khu vực
- Tính toán sản lượng năng lượng kỳ vọng của các dự án điện gió.
- Tính đến yếu tố khí tượng như nhiệt độ không khí và độ ẩm để điều chỉnh mật độ không khí, ảnh hưởng đến công suất thực tế thu được tại hình 5.

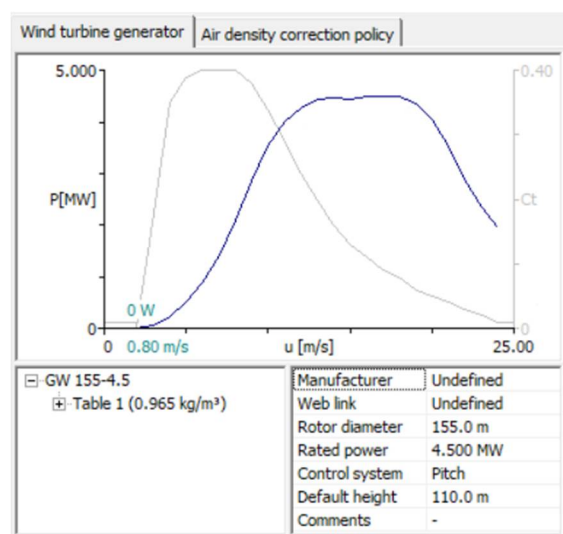
Hình 4. Thiết lập trạm đo gió

Hình 5. Thiết lập điều kiện khí hậu

3. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN

Sử dụng phần mềm WASP tiến hành tính toán điện lượng cho các kịch bản nhiệt độ và độ ẩm khác nhau để thấy được ảnh hưởng của nhiệt độ cũng như độ ẩm đến sản lượng điện của dự án.

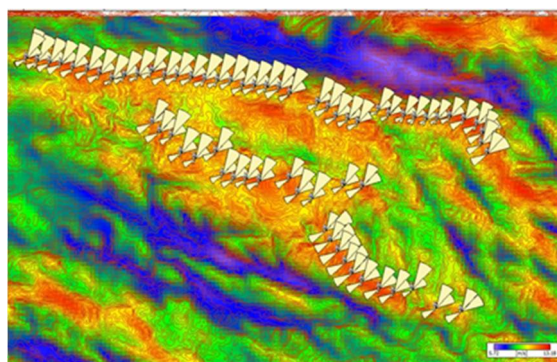
Tua-bin được sử dụng trong tính toán là loại GW-155-4.5 có đường đặc tính như hình 6



Hình 6. Đường đặc tính của tua-bin

Dựa vào bản đồ địa hình khu vực và số liệu đo gió thực tế, tiến hành xây dựng được trường phân bố

vận tốc gió bằng phần mềm WASP tại khu vực dự án từ đó lựa chọn được các vị trí bố trí tua-bin.



Hình 7. Vị trí tua-bin trên bản đồ phân bố vận tốc gió

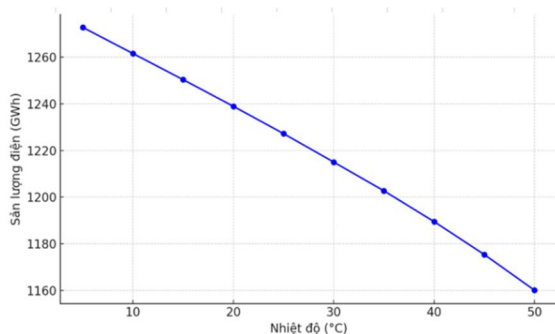
Trường hợp không có số liệu về nhiệt độ và độ ẩm, WASP tiến hành tính toán với giá trị độ ẩm và nhiệt độ mặc định được cập nhật từ Cơ sở dữ liệu khí hậu toàn cầu hoặc Bản đồ khí hậu khu vực. Đối với khu vực dự án Sepon, giá trị nhiệt độ cập nhật tự động là 25°C và độ ẩm là 85%. Kết quả tính toán cho trong hình sau:

Variable	Total	Mean	Min	Max
Total gross AEP [GWh]	1259.555	19.084	17.131	21.419
Total net AEP [GWh]	1227.288	18.595	16.547	21.137
Proportional wake loss [%]	2.56	-	0.32	5.55
Capacity factor [%]	47.1	-	41.9	53.6
Mean speed [m/s]	-	7.71	7.16	8.43
Mean speed (wake-reduced) [m/s]	-	7.59	7.08	8.36
Air density [kg/m³]	-	1.077	1.059	1.095
Power density [W/m²]	-	397	314	505
RIX [%]	-	-	13.4	24.8

Hình 8. Kết quả trích xuất từ phần mềm WASP

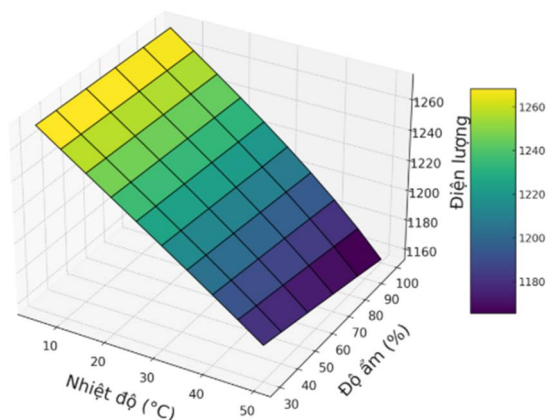
Tính toán cho các phương án nhiệt độ và độ ẩm khác nhau, kết quả cho trong Bảng 2.

Kết quả phân tích tại Bảng 2 cho thấy yếu tố nhiệt độ ảnh hưởng khá lớn đến điện lượng của trạm điện gió. Khi nhiệt độ tăng từ 10°C đến 40°C thì điện lượng giảm khoảng 6% tương ứng doanh thu của dự án giảm khoảng 120 tỷ/năm theo giá nhập khẩu điện gió từ Lào về Việt Nam là 6,4 cent/kWh đối với các dự án hoạt động từ 31/12/2025 (Bộ Công thương, 2024). Yếu tố độ ẩm không khí ảnh hưởng rất nhỏ đến sản lượng điện. Độ ẩm tăng từ 30% lên đến 100% thì sản lượng điện chỉ giảm khoảng 0.4%. Biểu đồ hình 9 cho thấy mức độ giảm sản lượng điện theo yếu tố nhiệt độ.



Hình 9. Biểu đồ quan hệ sản lượng điện với nhiệt độ không khí

Biểu đồ hình 10 cho thấy mức độ giảm sản lượng điện theo cả hai yếu tố nhiệt độ và độ ẩm không khí



Hình 10. Biểu đồ quan hệ sản lượng điện với nhiệt độ và độ ẩm không khí

Bảng 2. Kết quả phân tích điện lượng theo nhiệt độ và độ ẩm [GWh]

Nhiệt độ(°C)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Độ ẩm 30%	1273.8	1263.1	1252.5	1241.9	1231.3	1220.7	1210.0	1199.1	1188.1	1176.8
Độ ẩm 40%	1273.6	1262.8	1252.1	1241.3	1230.6	1219.7	1208.7	1197.4	1185.8	1173.8
Độ ẩm 55%	1273.3	1262.4	1251.5	1240.5	1229.5	1218.2	1206.7	1194.8	1182.4	1169.3
Độ ẩm 70 %	1273.0	1261.9	1250.9	1239.7	1228.4	1216.7	1204.7	1192.2	1178.9	1164.7
Độ ẩm 85%	1272.7	1261.5	1250.3	1238.9	1227.2	1215.0	1202.7	1189.5	1175.4	1160.1
Độ ẩm 100%	1272.4	1261.1	1249.7	1238.1	1226.1	1213.7	1200.6	1186.7	1171.8	1155.3

5. KẾT LUẬN

Quy hoạch phát triển điện lực quốc gia giai đoạn 2021–2030, tầm nhìn đến năm 2050 đã xác định điện gió là một trong những nguồn năng lượng trọng điểm trong chiến lược chuyển dịch năng lượng bền vững của Việt Nam. Nước ta hiện đã và đang có nhiều dự án điện gió được xây dựng.

Qua phân tích, tính toán năng lượng gió của trạm Sepon với các phương án nhiệt độ trung bình khác nhau cho thấy nhiệt độ không khí có ảnh hưởng lớn đến mật độ không khí và qua đó ảnh hưởng trực tiếp đến sản lượng điện của trạm điện gió. Vì mật độ không khí là đại lượng tỷ lệ thuận với công suất gió, việc bỏ qua sự thay đổi nhiệt độ có thể dẫn đến sai số đáng kể trong dự báo sản lượng. Do đó, cần đưa yếu tố nhiệt độ vào quá trình tính toán thiết kế để đảm bảo đến các tính toán tài chính và hiệu quả đầu tư của dự án. Tùy từng phương pháp tính toán điện lượng của trạm điện gió mà có các giải pháp tính toán kể đến nhiệt độ môi trường.

Đối với phương pháp sử dụng Bin hoặc Weibull khi tính toán cần hiệu chỉnh công suất của đường đặc tính của tua-bin trong phạm vi vận tốc gió nhỏ hơn vận tốc định mức theo công thức:

$$P(v, T) = P(v) \cdot \frac{\rho(T)}{\rho(\text{tiêu chuẩn})}$$

Trong đó:

$P(v, T)$ - công suất trên đường đặc tính của tua-bin được điều chỉnh theo nhiệt độ trung bình tại vị trí trạm điện gió

$P(v)$ - Công suất của đường đặc tính được xây dựng theo điều kiện tiêu chuẩn ($T = 15^\circ\text{C}$)

$\rho(T)$ - Mật độ không khí theo nhiệt độ trung bình tại trạm điện gió

$\rho(\text{tiêu chuẩn})$ - Mật độ không khí tại điều kiện tiêu chuẩn = 1.225kg/m^3

Khi sử dụng các phần mềm tính toán như WASP hoặc WindPRO để tính toán sản lượng điện của trạm điện gió, việc sử dụng số liệu về nhiệt độ trung bình của khu vực dự án từ các số liệu đo đạc thực tế là cực kỳ quan trọng. Nếu không sử dụng các dữ liệu nhiệt độ trực tiếp từ số liệu đo đạc thực tế, phần mềm sẽ tự động lấy nhiệt độ mặc định từ bản đồ khí hậu hoặc các nguồn dữ liệu tham khảo khác. Những dữ liệu nhiệt độ mặc định này thường chỉ phản ánh nhiệt độ trung bình ở một khu vực rộng lớn hoặc theo các mô hình khí hậu tổng quát, trong khi thực tế nhiệt độ tại vị trí công trình có thể có sự chênh lệch đáng kể do ảnh hưởng của các yếu tố tự nhiên như độ cao, hướng gió, và các điều kiện khí hậu đặc thù. Do đó, để đảm bảo độ chính xác trong việc tính toán mật độ không khí và sản lượng điện, các số liệu nhiệt độ và độ ẩm không khí cần được đo đạc trực tiếp tại khu vực dự án.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Bộ Công Thương (2024). *Quyết định số 2647/QĐ-BCT ngày 08 tháng 10 năm 2024 về việc phê duyệt khung giá nhập khẩu điện từ Lào về Việt Nam từ ngày 31 tháng 12 năm 2025*. Hà Nội, Việt Nam.
- Quy hoạch Điện VIII (2023). *Quyết định số 500/QĐ-TTg ngày 15/5/2023 phê duyệt Quy hoạch phát triển điện lực quốc gia thời kỳ 2021–2030, tầm nhìn đến năm 2050*. Thủ tướng Chính phủ, Việt Nam.
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. and Bossanyi, E. (2001). *Wind Energy Handbook*. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons.
- Borgnakke, C. and Sonntag, R. E. (2022). *Fundamentals of Thermodynamics*. 10th Edition. Hoboken, USA: John Wiley & Sons.
- Sepon Wind Energy Plant Project (2023). *Pre-Feasibility Study Report*. Savannakhet, Lao PDR.
- World Bank (2019). *Expanding Offshore Wind to Emerging Markets*. Washington D.C., USA: World Bank Group.

Abstract:

STUDY ON THE IMPACT OF SEVERAL CLIMATIC FACTORS ON THE ENERGY OUTPUT OF WIND POWER STATIONS: A CASE STUDY OF THE SEPON WIND FARM, LAO PDR

This paper investigates the impact of several climate factors, such as temperature and humidity, on the power output of wind power stations. The effect of air density variations due to temperature and humidity on the power output of the wind farm is studied using data from the Sepon wind farm project, which is expected to be developed in Laos. Analysis and power production simulations are performed using WAsP 12 software. The results show that temperature has a significant effect on air density, leading to a 6% decrease in power output when the temperature increases from 10°C to 40°C, while humidity has a negligible impact, with only a 0.4% variation in power output when humidity decreases from 100% to 30%. Since air temperature has a considerable influence on wind power production forecasts, it is essential to include actual temperature data from the project site in the design calculations for determining power output to ensure accuracy in financial calculations and investment efficiency of the project.

Keywords: Wind power plant, energy output, climatic factors.

Ngày nhận bài: 26/12/2025

Ngày chấp nhận đăng: 19/3/2026