Journal of Mining and Earth Sciences

Website: https://jmes.humg.edu.vn

A methodology for modelling the vertical-axis turbine in two-dimensional (2D) based on the theory of actuator cylinder model

Thinh Van Nguyen [1,2,*]

[1] *Faculty of Petroleum and Energy, Hanoi University of Mining and Geology, Vietnam*
[2] *Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg (LUSAC), Caen - Normandy University (UNICAEN), France*

ARTICLE INFO

Article history:
Received 23rd Apr. 2024
Revised 11th Aug. 2024
Accepted 31st Aug. 2024

Keywords:
Actuator Cylinder model,
Modelling,
Vertical-axis turbine.

ABSTRACT

Turbines are the most common devices used in the field of wind energy and tidal energy. They are also the main research objectives of scientists worldwide. Different research methods are applied to study these devices, including the numerical simulation method. This is an advanced approach that helps to save costs of calculation, but it still keeps the accuracy. In the numerical simulation method, building and selecting a suitable model as well as ensuring the high accuracy of the model is essential. It helps to determine the success of the research method. The article presents the results of the research and development of a methodology to model the vertical axis turbine in 2D dimension based on the theory of the Actuator Cylinder model combined with the use of the Navier-Stokes equations and standard k-ε turbulence model applied in the ANSYS FLUENT software. The lift force (normal force) and drag force (tangential force) acting on the turbine blades are compared with experimental results to verify the model's reliability. Additionally, the simulation results are compared with those obtained from Strickland's theoretical model, further highlighting the accuracy of the research. The research results demonstrate a strong correlation between the numerical simulation model and the experimental data.

Copyright © 2024 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author
E - mail: nguyenvanthinh@humg.edu.vn
DOI: 10.46326/JMES.2024.65(5).01

Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: https://tapchi.humg.edu.vn

Nghiên cứu phương pháp mô phỏng turbine trục đứng trong không gian 2 chiều dựa trên lý thuyết của mô hình Actuator Cylinder

Nguyễn Văn Thịnh [1, 2,*]

[1] *Khoa Dầu khí và Năng lượng, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Việt Nam*
[2] *Phòng Thí nghiệm các Khoa học Ứng dụng (LUSAC), Đại học Caen-Normandy (UNICAEN), Pháp*

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:
Nhận bài 23/4/2024
Sửa xong 11/8/2024
Chấp nhận đăng 31/8/2024

Từ khóa:
Actuator Cylinder,
Mô hình hóa,
Turbine trục đứng.

TÓM TẮT

Trong lĩnh vực năng lượng gió và thủy triều, turbine là thiết bị được dùng chủ yếu và cũng là đối tượng chính trong các công trình nghiên cứu của các nhà khoa học trên thế giới. Có nhiều phương pháp để nghiên cứu các thiết bị này, trong đó có phương pháp mô phỏng số. Đây là phương pháp tiên tiến, giúp tiết kiệm chi phí nhưng vẫn đảm bảo độ chính xác. Trong phương pháp mô phỏng số, việc xây dựng và lựa chọn được mô hình phù hợp, đảm bảo độ chính xác cao là rất quan trọng, quyết định sự thành công của phương pháp nghiên cứu. Bài báo trình bày các kết quả nghiên cứu và xây dựng phương pháp mô hình hóa turbine trục đứng trong không gian 2 chiều dựa trên lý thuyết của mô hình Actuator Cylinder kết hợp với phương trình Navier-Stokes và mô hình rối k-ε Standard trong chương trình ANSYS FLUENT. Đại lượng lực nâng (lực pháp tuyến) và lực kéo (lực tiếp tuyến) tác dụng lên cánh của turbine được so sánh với kết quả thực nghiệm để kiểm chứng độ tin cậy của mô hình. Ngoài ra kết quả tính toán cũng được so sánh với kết quả trong mô hình lý thuyết của tác giả Strickland làm nổi bật hơn độ chính xác của kết quả nghiên cứu. Kết quả nghiên cứu của bài báo đã chỉ ra sự tương đồng giữa mô hình mô phỏng số với các số liệu thực nghiệm.

© 2024 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

1. Mở đầu

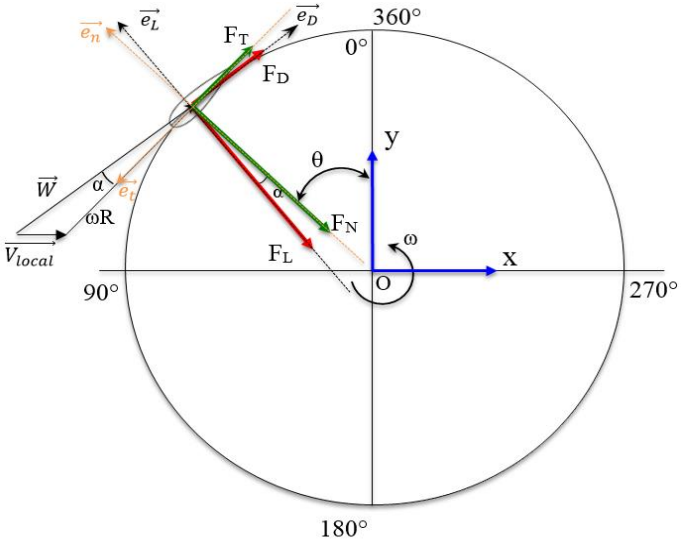
Biến đổi khí hậu trên thế giới đã và đang gây ra những hậu quả nghiêm trọng, tác động tiêu cực và làm ảnh hưởng đến các hệ sinh thái, tài nguyên môi trường và con người. Chính điều này đã tạo ra những thách thức lớn nhất đối với nhân loại trong thế kỷ 21. Biến đổi khí hậu có thể bắt nguồn từ sự tác động của các điều kiện tự nhiên và con người. Việc khai thác và sử dụng các nguồn nhiên liệu hóa thạch cũng như các hoạt động sản xuất công nghiệp khác của con người là nguyên nhân dẫn đến sự gia tăng lượng khí CO_2 cũng như các loại khí độc hại, khác gây ra các tác động xấu đến môi

*Tác giả liên hệ
E - mail: nguyenvanthinh@humg.edu.vn
DOI: 10.46326/JMES.2024.65(5).01

trên, nhiều giải pháp đã được đưa ra. Trong các giải giải pháp đó, giải pháp về chuyển dịch năng lượng đang là xu hướng chính trên thế giới nói chung và Việt Nam nói riêng. Việc khai thác và sử dụng các nguồn năng lượng xanh, năng lượng tái tạo, năng lượng thân thiện với môi trường sẽ có những tác động tích cực đối với môi trường, đồng thời giảm dần sự phụ thuộc vào các nguồn năng lượng hóa thạch. Bên cạnh các nguồn năng lượng tái tạo như: mặt trời, gió, địa nhiệt, sinh khối…, việc khai thác nguồn năng lượng về dòng chảy thủy triều đang được thế giới quan tâm. Nhiều nghiên cứu đã tập trung vào nghiên cứu về thiết bị để chuyển đổi nguồn năng lượng này thành năng lượng điện, turbine điện thủy triều (Tidal turbine) (Madsen, 1982; Nguyen và nnk., 2014, 2016; Bachant và nnk., 2016; Roc và nnk., 2014). Để hiểu rõ về sự tác động của turbine điện thủy triều lên dòng chảy và sự biến đổi trường vận tốc của dòng chảy đằng sau turbine, người ta đã sử dụng các phương pháp nghiên cứu khác nhau. Trong số đó, phương pháp mô hình hóa được coi là rất hiệu quả để nghiên cứu về nội dung này. Nhiều công trình nghiên cứu của các tác giả đã tập trung nghiên cứu trong lĩnh vực mô phỏng số (Shen và nnk., 2009; Nguyen và nnk., 2014, 2016; Shives và Crawford., 2016; Sudhamshu và nnk., 2016; Abdolrahim và nnk., 2017). Ngày nay, mô phỏng số được sử dụng khá phổ biến trong khoa học. Lợi thế của phương pháp này chính là việc cho kết quả nhanh, nhưng vẫn đảm bảo độ chính xác. Đồng thời phương pháp này sẽ tiết kiệm về chi phí so với làm các thí nghiệm. Trong nghiên cứu này, tác giả xin giới thiệu phương pháp mô hình hóa turbine trục đứng bằng việc ứng dụng phần mềm ANSYS FLUENT để mô phỏng sự biến thiên của lực pháp tuyến và tiếp tuyến tác động lên cánh turbine. Mô hình rối (Turbulence model) k-ε Standard của ANSYS FLUENT được sử dụng kết hợp với lý thuyết của mô hình Actuator Cylinder trong không gian 2 chiều để biểu diễn sự tương tác của turbine với dòng chảy của môi trường nghiên cứu.

2. Cơ sở lý thuyết

Cơ sở lý thuyết của mô hình Actuator Cylinder lần đầu tiên được nghiên cứu và phát triển bởi Madsen (1982) đề cập đến turbine trục đứng. Về cơ bản, lý thuyết này có điểm tương đồng với lý thuyết của mô hình đĩa truyền động (Actuator Disk). Quá trình turbine hoạt động và chiết xuất năng lượng của dòng chảy được biểu diễn bằng một lực khối tác dụng lên khu vực được quét bởi cánh quạt của turbine. Lực này được phân tích thành hai thành phần là lực pháp tuyến (F_N) và lực tiếp tuyến (F_T). Đối với turbine trục đứng, tiết diện quét của các cánh turbine có dạng một hình trụ đứng (Hình 1). Khi turbine quay, nó tạo ra một sự giảm vận tốc của dòng chảy ở khu vực đằng sau của thiết bị. Lúc này năng lượng của dòng chảy ở khu vực phía sau và phía trước turbine có sự chênh lệch. Hay nói cách khác, khi turbine hoạt động, nó đã chiết xuất năng lượng động học của dòng chảy (Biadgo và nnk., 2013).



Hình 1. Sơ đồ biểu diễn các thành phần lực tác dụng lên cánh turbine.

Hình 1 biểu diễn mặt cắt ngang tiết diện quét của turbine trục đứng kiểu Darrieus (Sheldahl và Klimas, 1981; Paraschivoiu, 2009; Aumelas, 2011). Chuyển động quay của một cánh turbine xung quanh một trục thẳng đứng (trục của turbine) với góc quay θ theo chiều kim đồng hồ (góc phương vị). Đại lượng ω là vận tốc góc của turbine. Khi trục turbine chuyển động, các cánh quạt của turbine sẽ quay với giá trị vận tốc được xác định theo công thức (1). Vận tốc tương đối của chất lỏng được xác định theo công thức (2).

$$\vec{V} = \omega R\overrightarrow{e_t} \quad (1)$$

$$\overrightarrow{W} = V_{local-n}\overrightarrow{e_n} + (V_{local-t}\overrightarrow{e_t} - \omega R)\overrightarrow{e_t} \quad (2)$$

Trong đó: R - bán kính turbine; $\overrightarrow{e_t}$ và $\overrightarrow{e_n}$ - vector đơn vị tiếp tuyến và pháp tuyến của mặt phẳng quay; V_{local} - vector vận tốc tới của dòng chảy, chứa hai thành phần là vận tốc hướng tâm $V_{local-n}$ và vận tốc tiếp tuyến $V_{local-t}$. Độ lớn của W được xác định như công thức (3).

$$W = \sqrt{V_{local-n}^2 + (V_{local-t} - \omega R)^2} \quad (3)$$

Góc tới α của dòng chảy được xác định theo công thức (4).

$$\alpha = tan^{-1}\left(\frac{V_{local-n}}{V_{local-t}-\omega R}\right) \quad (4)$$

Lực tác dụng lên cánh của turbine bao gồm hai thành phần là lực nâng (F_L) và lực kéo (F_D). Lực tổng hợp được xác định theo công thức (5). Độ lớn của lực nâng (F_L) và lực kéo (F_D) được xác định theo công thức (6) và (7).

$$\vec{F} = F_L\overrightarrow{e_L} + F_D\overrightarrow{e_D} \quad (5)$$

$$F_L = \rho\frac{W^2}{2}C\Delta l C_L \quad (6)$$

$$F_D = \rho\frac{W^2}{2}C\Delta l C_D \quad (7)$$

Trong đó: $\overrightarrow{e_L}$ và $\overrightarrow{e_D}$ - vector đơn vị của lực F_L và F_D tương ứng; Δl - độ dài đơn vị của phần tử cánh turbine; C_L và C_D - hệ số của lực nâng và lực kéo tương ứng; C - độ rộng của cánh turbine.

Nếu coi số cánh của turbine là N_b, từ các công thức (5), (6) và (7), ta có lực tổng hợp tác dụng lên mặt phẳng quét của turbine được xác định theo công thức (8):

$$\vec{F} = N_b\frac{\rho W^2}{2}C\Delta l\begin{Bmatrix}[-C_L\sin(\theta-\alpha) - C_D\cos(\theta-\alpha)]\overrightarrow{e_x}\\ +[C_L\cos(\theta-\alpha) - C_D\cos(\theta-\alpha)]\overrightarrow{e_y}\end{Bmatrix} \quad (8)$$

Độ lớn của lực pháp tuyến và lực tiếp tuyến được xác định như sau:

$$F_N = N_b\frac{\rho W^2}{2}C\Delta l[-C_L\cos(\alpha) - C_D\sin(\alpha)] \quad (9)$$

$$F_T = N_b\frac{\rho W^2}{2}C\Delta l[C_L\sin(\alpha) - C_D\cos(\alpha)] \quad (10)$$

Ở dạng không thứ nguyên, giá trị của các lực này được xác định theo công thức (11) và (12):

$$F_N^* = \frac{F_N}{N_b\frac{\rho U_\infty^2}{2}C\Delta l} \quad (11)$$

$$F_T^* = \frac{F_T}{N_b\frac{\rho U_\infty^2}{2}C\Delta l} \quad (12)$$

3. Xây dựng và kiểm chứng mô hình

3.1. Xây dựng mô hình

Trong phần này, tác giả áp dụng phương trình Navier-Stokes kết hợp với lý thuyết của mô hình Actuator Cylinder vừa phân tích ở trên để tiến hành mô hình hóa tương tác của turbine với dòng chảy của môi trường.

$$\frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right) + R_{ij}\right] + \rho g_i + S_i \quad (13)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0;\ R_{ij} = \mu_t\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right);\ \mu_t = C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \quad (14)$$

Trong đó: U_i, U_j - thành phần vận tốc theo các phương trong không gian; x_i, x_j - các điểm trong không gian; μ - độ nhớt phân tử của nước; R_{ij} - các thành phần của tenseur Reynolds; μ_t - độ nhớt động lực học; k - năng lượng động học của môi trường rối; ε - độ phân tán môi trường rối; g - gia tốc trọng trường; C_μ - hệ số (C_μ=0,09); S_i - ẩn số trong phương trình Navier-Stokes. Theo như phân tích ở trên, lực của môi trường chất lỏng tác dụng lên turbine là một lực khối. Khi turbine quay, sẽ chịu tác động bởi một lực thể tích lên toàn bộ tiết diện quét và được xác định bởi đại lượng S_i trong phương trình (13). Đại lượng này được xác định theo công thức (15).

$$S_i = \frac{F_i}{e_c 2\pi R\Delta l} \quad (15)$$

Trong đó: e_c - chiều dày của hình trụ được tạo bởi turbine; F_i - lực được xác định từ công thức (8).

Để xác định giá trị của hai hệ số C_L và C_D, trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng giá trị đo thực nghiệm trong nghiên cứu của tác giả Sheldahl and Klimas (1981). Từ giá trị thực nhiệm chúng ta xác định được hệ số C_L và C_D theo công thức (16) và (17):

$$C_L = 0{,}1\alpha \quad (16)$$

$$C_D = Max\ (0{,}02|\alpha| - 0{,}8; 0{,}02) \quad (17)$$

Để tiến hành mô hình hóa, tác giả sử dụng mô hình rối k-ε Standard trong chương trình ANSYS FLUENT với thuật toán SIMPLEC. Đây là mô hình đơn giản, tiết kiệm tài nguyên của máy tính, dễ thực hiện và cho độ chính xác cao. Mô hình rối k-ε Standard đã được kiểm chứng về độ tin cậy khi mô phỏng trong công trình nghiên cứu của Nguyen và nnk. (2016). Phương trình tổng quát của mô hình được thể hiện trong các biểu thức (18) và (19):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k U_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + \rho\wp - \rho\varepsilon + S_k \quad (18)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon U_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}\rho\wp - C_{\varepsilon 2}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (19)$$

Trong đó: $C_{\varepsilon 1}$,$C_{\varepsilon 2}$ - các hệ số của phương trình, $\wp$ - đại lượng biểu thị sự tạo năng lượng rối (production of turbulent kinetic energy), được xác định như công thức (20):

$$\wp = -\overline{u_i' u_j'}\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = \frac{1}{2}\frac{\mu_t}{\rho}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)^2 \quad (20)$$

Độ nhớt động lực học được xác định theo biểu thức (21):

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (21)$$

Độ phân tán rối ε được xác định theo công thức sau:

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4}\frac{k^{3/2}}{l} \quad (22)$$

Trong đó: l - chiều dài đặc trưng của xoáy.

Trong biểu thức (18) và (19), đại lượng S_k, S_ε - các tham số biến đổi phụ thuộc từng mô hình. Đối với mô hình k-ε Standard, các hệ số của mô hình được biểu diễn trong Bảng 1 (Launder và Spalding, 1974).

3.2. Các thông số hình học của mô hình

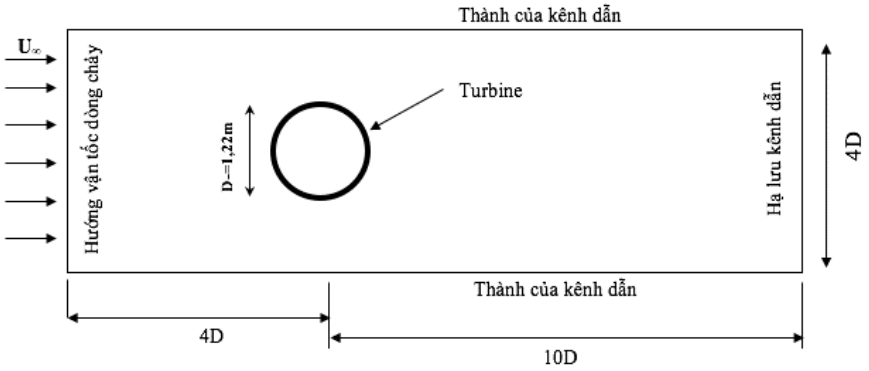
Để xây dựng các thông số hình học và kiểm chứng độ tin cậy của phương pháp nghiên cứu cũng như các số liệu tính toán của mô hình, tác giả đã sử dụng các số liệu đo thực nghiệm về các giá trị lực pháp tuyến (F_N^*)và lực tiếp tuyến (F_T^*) trong công trình khoa học của tác giả Strickland và nnk. (1979) để làm số liệu tham chiếu. Đó là các phép đo giá trị lực pháp tuyến và tiếp tuyến đối với turbine trục đứng kiểu Darrieus có biên dạng cánh kiểu NACA 0012, đường kính 1,22 m. Các thông số hình học của turbine trong thí nghiệm và đặc trưng của dòng chảy được thể hiện chi tiết trong Bảng 2. Các lực pháp tuyến và tiếp tuyến tác dụng lên cánh turbine được đo ở các giá trị khác nhau

Bảng 1. Hệ số của mô hình k-ε Standard.

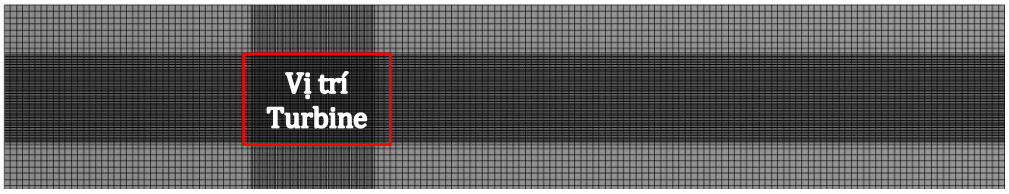
$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	C_μ	σ_k	σ_ε
1,44	1,92	0,09	1,00	1,30

Bảng 2. Các thông số và điều kiện thí nghiệm trong nghiên cứu của Strickland và nnk. (1979).

Loại thông số	**Giá trị**
Biên dạng cánh	NACA 0012
Độ rộng của cánh (C)	0,0194 m
Bán kính turbine (R)	0,61 m
Số Reynolds	40x10^3
Thông số λ	5
Số cánh của turbine	1; 2; 3
Độ cứng của cánh (σ = N_bC/R) turbine	0,15; 0,3; 0,45
Vận tốc của dòng chảy tới	0,091 m/s



Hình 2. Vị trí của turbine trong miền tính toán.



Hình 3. Lưới cấu trúc trong mô hình mô phỏng.

của góc phương vị θ. Trong nghiên cứu này, miền tính toán trong mô hình mô phỏng số được xây dựng như Hình 2. Turbine được đặt trong một kênh dẫn có chiều dài 17,1 m, chiều rộng 4,88 m. Vị trí đặt turbine miền tính toán được xác định bằng 4 lần đường kính turbine, tính theo hướng dòng chảy tới (4D) và 10 lần đường kính turbine (10D) về phía hạ lưu của kênh và cách đều thành kênh dẫn 2 bên (2D) (Hình 2).

Miền tính toán trong mô phỏng số của nghiên cứu này được thực hiện trong không gian hai chiều và được bao phủ bởi một lưới cấu trúc "hexahedral" với 244.866 phần tử. Kích thước lưới được lựa chọn là 16.10^{-4} lần đường kính turbine ($16x10^{-4}$ D). Vùng biểu thị turbine mật độ lưới được làm mịn hơn các khu vực xung quanh, kích thước lưới là $8x10^{-4}$ D (Hình 3). Các điều kiện ban đầu của mô hình số như sau: Điều kiện đối xứng được áp dụng cho mặt trên và hai mặt bên của kênh dẫn. Tại đầu vào của kênh dẫn, vận tốc của dòng chảy được được xác định như trong thực nghiệm (0,091 m/s), chiều dày của hình trụ được tạo bởi turbine (e_c) là 0,01 m. Mô hình rối k-ε Standard trong chương trình ANSYS FLUENT với thuật toán SIMPLEC được sử dụng. Cường độ rối của môi trường là 5%, độ phân tán rối ε được xác định theo công thức (22). Đại lượng *l* trong công thức (22) được xác định như trong công thức (23).

$$l = 0{,}07L_c \quad (23)$$

Nghiên cứu của tác giả Menchaca Roa (2011) đã chỉ ra, đối với trường hợp là turbine, giá trị L_c trong công thức (23) chính là độ rộng của cánh turbine. Các hệ số còn lại của mô hình k-ε Standard được lấy theo Bảng 1.

3.3. Kết quả và thảo luận

Với các thông số của mô hình và các điều kiện tính toán như trình bày ở trên, kết quả tính toán các thông số về lực pháp tuyến và tiếp tuyến được tính cho các trường hợp 1, 2 và 3 cánh như sau:

3.3.1. Trường hợp turbine 1 cánh

Kết quả mô hình hóa đối với trường hợp 1 cánh được biểu diễn như trong Hình 4. Hình 4 cho thấy, lực pháp tuyến (F_N^*)và tiếp tuyến (F_T^*) trong mô hình mô phỏng gần như trùng khớp với giá trị đo thực nghiệm. Trong đó, giá trị của lực pháp tuyến có sự trùng khớp với giá trị thực nghiệm hơn giá trị của lực tiếp tuyến. Để tăng gí trị tham chiếu của mô hình, kết quả mô phỏng của nghiên cứu này còn được so sánh với kết quả tính toán theo lý thyết trong công trình nghiên cứu của tác giả Strickland và nnk. (1979). Kết quả của mô hình cũng cho thấy, gần như có sự trùng khớp với kết quả tính toán theo lý thyết trong công trình nghiên cứu của tác giả Strickland. Trên Hình 4, giá trị của lực tiếp tuyến ở vùng phía trước của turbine có sự sai lệch so với giá trị thực nghiệm (Hình 4b). Sự sai lệch này được thể hiện rõ ở giá trị góc phương vị θ

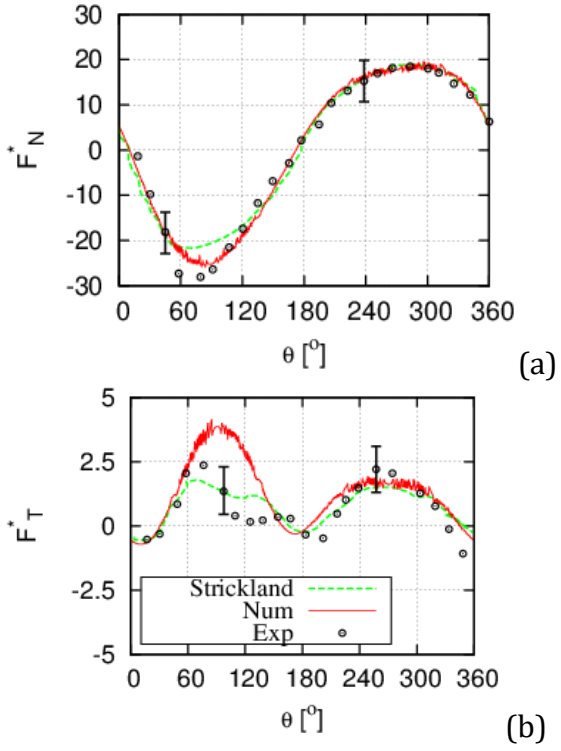
trong khoảng từ $90^0 \div 130^0$, nguyên nhân chính là do hiện tượng "dynamic stall". Do turbine được mô phỏng trong mô hình mô của nghiên cứu này được dựa trên lý thuyết của mô hình Actuator Cylinder, nó hoạt động như một môi trường xốp. Do đó, không có hiện tượng "dynamic stall" và không có sự xuất hiện của các xoáy tái sinh khi dòng chảy đi qua bề mặt các cánh của turbine. Điều này giải thích cho sự khác nhau về sự biến thiên của lực tiếp tuyến ở khu vực phía trước của turbine như đã chỉ ra trong Hình 4b.

3.3.2. Trường hợp turbine 2 cánh

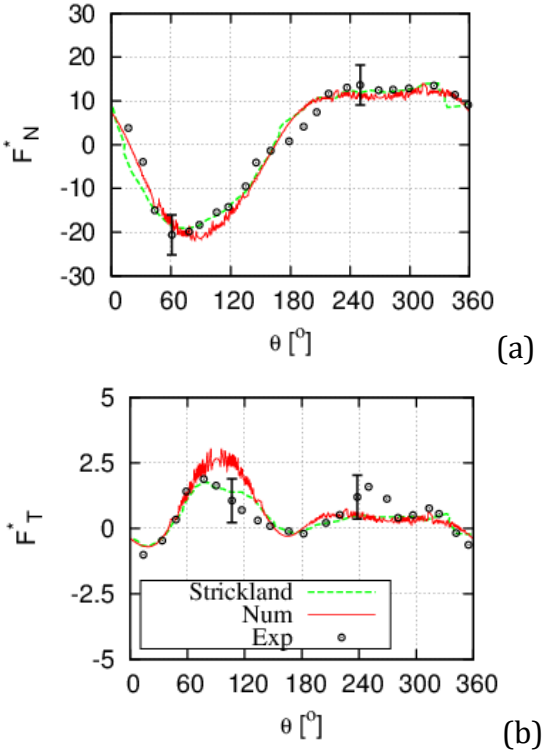
Đối với trường hợp hai cánh, các kết quả trong mô hình số của nghiên cứu này đối với lực pháp tuyến (Hình 5a) và lực tiếp tuyến (Hình 5b) cho thấy sự phù hợp rất sát so với dữ liệu thực nghiệm. So với trường hợp 1 cánh, chúng ta nhận thấy sự khác biệt về lực tiếp tuyến ở khu vực phía trước turbine đã giảm đi đáng kể và chúng có xu hướng tiệm cận dần so với dữ liệu thực nghiệm và kết quả trong mô hình số của Strickland và nnk. (1979). Xét ở góc độ tổng thể, khi tham chiếu kết quả mô phỏng về sự biến thiên của lực pháp tuyến và tiếp tuyến với kết quả trong mô hình số của Strickland và nnk. (1979), chúng ta nhận thấy hầu như không có sự khác biệt.

3.3.3. Trường hợp turbine 3 cánh

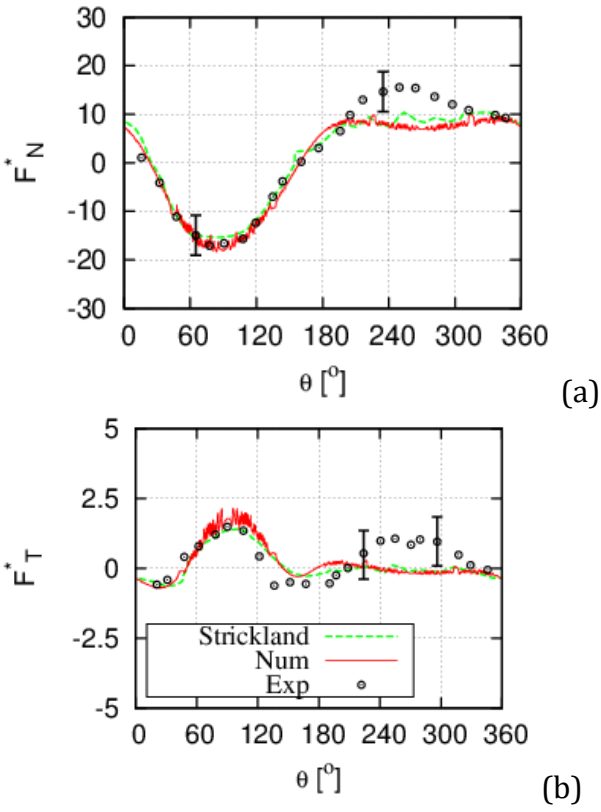
Giống như hai trường hợp trên, kết quả cho trường hợp ba cánh sẽ đối chiếu với kết quả thực nghiệm và kết quả tính toán do Strickland và nnk. (1979) thực hiện. Trong Hình 6, chúng ta quan sát thấy rằng ở khu vực phía trước turbine, các kết quả nhận được từ mô hình nghiên cứu gần như trùng hợp với các kết quả thực nghiệm đối với cả lực pháp tuyến (Hình 6a) và lực tiếp tuyến (Hình 6b). Đặc biệt, kết quả trong mô hình của nghiên cứu này trùng khớp với kết quả trong mô hình số của Strickland và nnk. (1979). Ở khu vực phía hạ lưu của turbine, các lực pháp tuyến và tiếp tuyến



Hình 4. Biến thiên lực pháp tuyến (a) và tiếp tuyến (b) không thứ nguyên phụ thuộc vào góc phương vị θ đối với trường hợp turbine 1 cánh. So sánh giữa kết quả mô phỏng số (Num) với thực nghiệm (Exp) và kết quả trong mô hình lý thuyết của Strickland và nnk. (1979).



Hình 5. Biến thiên lực pháp tuyến (a) và tiếp tuyến (b) không thứ nguyên phụ thuộc vào góc phương vị θ đối với trường hợp turbine 2 cánh. So sánh giữa kết quả mô phỏng số (Num) với thực nghiệm (Exp) và kết quả trong mô hình lý thuyết của Strickland và nnk. (1979).



Hình 6. Biến thiên lực pháp tuyến (a) và tiếp tuyến (b) không thứ nguyên phụ thuộc vào góc phương vị θ đối với trường hợp turbine 3 cánh. So sánh giữa kết quả mô phỏng số (Num) với thực nghiệm (Exp) và kết quả trong mô hình lý thuyết của Strickland và nnk. (1979).

gần như trùng khớp với các kết quả thu được từ mô hình số của Strickland và nnk. (1979).

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày một phương pháp tiếp cận mới khi nghiên cứu về turbine trục đứng, dựa trên lý thuyết của mô hình Actuator Cylinder. Các lực tác động lên cánh của turbine trong quá trình hoạt động bao gồm chủ yếu là 2 lực: lực pháp tuyến và lực tiếp tuyến. Nghiên cứu này cũng đã xác định được sự biến thiên của lực pháp tuyến (F_N^*) và tiếp tuyến (F_T^*) theo góc phương vị θ và so sánh với giá trị đo thực nghiệm. Kết quả nghiên cứu cho thấy sự biến thiên này gần như trùng khớp với giá trị đo thực nghiệm. Bên cạnh đó, các kết quả tính toán cũng đạt được độ tương thích với các kết quả trong mô hình lý thuyết của Strickland và nnk. (1979). Trong nghiên cứu này, turbine hoạt động như một môi trường xốp để chiết suất năng lượng của môi trường. Do đó, đặc tính của môi trường (dòng chảy) tác động lên cánh turbine đã bị bỏ qua, dẫn đến sự không có mặt của các xoáy thứ sinh suất hiện trên cánh turbine như trong thí nghiệm thực tế. Điều đó cũng đã dẫn đến sự sai khác giữa kết quả mô phỏng với các kết quả thực nghiệm như đã phân tích ở trên. Tuy nhiên, sự sai khác này là hợp lý trong điều kiện turbine hoạt động như một môi trường xốp. Có thể khẳng định rằng, phương pháp mô hình hóa turbine trục đứng dựa trên lý thuyết của mô hình Actuator Cylinder kết hợp với phương trình Navier-Stokes trong không gian hai chiều được thực hiện trong nghiên cứu này là phù hợp và đảm bảo độ tin cậy. Phương pháp nghiên cứu này sẽ tiết kiệm được tài nguyên của máy tính, một yếu tố rất quan trọng trong mô phỏng số. Kết quả nghiên cứu có thể được áp dụng để mô hình hóa turbine trong cả lĩnh vực điện thủy triều và điện gió. Ngoài ra, việc khẳng định độ tin cậy và tính tiện dụng của phương pháp sẽ là cơ sở rất quan trọng để áp dụng cho việc mô hình hóa ở quy mô công nghiệp với nhiều turbine trong 1 trang trại, giúp giải quyết các bài toán ngoài thực tế sản xuất.

Lời cảm ơn

Tác giả gửi lời cảm ơn đến Phòng Thí nghiệm các Khoa học ứng dụng (LUSAC), Đại học Caen-Normandy (UNICAEN), Cộng hòa Pháp đã hỗ trợ và cung cấp công cụ để thực hiện các tính toán liên quan đến kết quả nghiên cứu.

Đóng góp của tác giả

Nguyễn Văn Thịnh - xây dựng ý tưởng khoa học, thực hiện mô phỏng, xử lý số liệu, viết bản thảo, rà soát và hiệu đính nội dung bài báo.

Tài liệu tham khảo

Abdolrahim, R., Ivo, K., Bert, B. (2017). CFD simulation of a vertical axis wind turbine operating at a moderate tip speed ratio: Guidelines for minimum domain size and azimuthal increment. *Renewable Energy*, 107, 373-385. http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.006

Aumelas, V. (2011). *Modélisation des hydroliennes à axe vertical libres ou carénées: développement d'un moyen expérimental et d'un moyen*

numérique pour l'étude de la cavitation. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.

Bachant, P., Goude, A., Wosnik, M. (2016). Actuator line modeling of vertical-axis turbines. *Wind Energy*, 1-23.

Biadgo, A.M., Simonovic, A., Komarov, D., Stupar, S. (2013). Numerical and Analytical Investigation of Vertical Axis Wind Turbine, *FME Transactions*, 49-58.

Launder, B.E & Spalding, D.B. (1974). The numerical computation of turbulent flow, *Comput Methods Appl Mech Eng*, 3, 269-289.

Madsen, H.A. (1982). *The Actuator Cylinder, A Flow Model for Vertical Axis Wind Turbines*. PhD thesis, Aalborg University.

Menchaca Roa, A. (2011). *Analyse numérique des hydroliennes à axe vertical munies d'un carénage.* Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.

Nguyen, V.T., Guillou, S., Thiébot, J., Santa Cruz, A. (2014). *Numerical simulation of a pilot tidal farm using actuator disks, influence of a time-varying current direction*. Grand Renewable Energy 2014 Proceeding, O-Oc-6-1, Tokyo Japan, 8p.

Nguyen, V.T., Guillou, S.S., Thiébot, J., Santa Cruz, A. (2016). Modelling turbulence with an Actuator Disk representing a tidal turbine. *Renewable Energy*, 97, 625-635. http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.014

Paraschivoiu, I, (2009). *Wind Turbine design with emphasis on Darrieurs concept*, Presses internationals polytechnique.

Roc, T., Greaves, D., Thyng, K.M., Conley, D.C. (2014). Tidal turbine representation: towards realistic applications. *Ocean Engineering*, 78, 95-111.

Sheldahl, R.E., Klimas, P.C. (1981). *Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attach for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines*. Report SAND80-2114, Sandia National Laboratories.

Shen, W.Z., Zhang, J.H., Sørensen J.N. (2009). The actuator surface model: A new Navier–Stokes based model for rotor computations. *Journal of Solar Energy Engineering*, 131, 011002-1-011002-9.

Shives, M & Crawford C. (2016). Adapted two-equation turbulence closures for actuator disk RANS simulations of wind & tidal turbine wakes. *Renewable Energy*, 92, 273–292. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.026

Strickland, J.H., Webster, B.T., Nguyen, T.A. (1979). Vortex model of the Darrieus turbine: an analytical and experimental study. *Trans ASME Journal of Fluids Engineering*, 101, 500-505.

Sudhamshu, A.R., Pandey, M.C., Sunil, N., Satish, N.S., Mugundhan, V., Velamati, R.K. (2016). Numerical study of effect of pitch angle on performance characteristics of a HAWT. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19, 632–641.