

Stator blades effect on thrust of an electric ducted propulsion fan

Article info

Type of article:

Original research paper

DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2023.vn.3.4.38-46>

*Corresponding author:

E-mail address:

truong.dinhcong@hust.edu.vn

Received: 30/8/2023

Accepted: 30/11/2023

Published: 5/12/2023

Thai-Son Vu¹, The-Manh Le¹, Cong-Thanh Nguyen¹, Van-Thuc Tran¹, Hoang-Quan Chu², Cong-Truong Dinh^{1,*}

¹School of Mechanical Engineering, Hanoi University of Science and Technology, No. 1, Dai Co Viet Road, Hai Ba Trung District, Hanoi 11615, Vietnam

²Faculty of Aerospace Engineering, Le Quy Don Technical University, 236 Hoang Quoc Viet Street, Bac Tu Liem District, Hanoi 11917, Vietnam

Abstract: Nowadays, the electric Ducted Propulsion Fan (eDPF) with high-thrust and high-efficiency are researched and developed for hybrid or electric aircraft, including electric vertical take-off and landing (eVTOL) aircraft. The stator blades not only serve struts connecting the fan casing with the center object containing the electric motor, but also play a role in helping to reduce the eddy air flow created by the fan blades. Therefore, the stator blades can help increase thrust, reduce noise and improve efficiency of the eDPF. The parameters such as chord length, thickness ratio, arc of blade profile and blade angle are changed and compared with VasyFan's experiment on a 570mm diameter eDPF. In fact, the stator improvements have shown a 6.09% increase in thrust.

Keywords: eVTOL, eDPF, Stator blade, CFD simulation, Thrust.

Ảnh hưởng của lá cánh tĩnh đến lực đẩy của quạt đẩy điện có ống hướng dòng

Thông tin bài viết
Dạng bài viết:
Bài báo nghiên cứu

DOI:
<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2023.vn.3.4.38-46>

***Tác giả liên hệ:**
Địa chỉ E-mail:
truong.dinhcong@hust.edu.vn

Ngày nộp bài: 30/8/2023
Ngày chấp nhận: 30/11/2023
Ngày đăng bài: 5/12/2023

Vũ Thái Sơn¹, Lê Thế Mạnh¹, Nguyễn Công Thành¹, Trần Văn Thực¹, Chu Hoàng Quân², Đinh Công Trường^{1,*}

¹Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội, Số 1 Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội 11615, Việt Nam

²Khoa Hàng không vũ trụ, Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn, Số 236 Hoàng Quốc Việt, Bắc Từ Liêm, Hà Nội 11917, Việt Nam

Tóm tắt: Ngày nay, quạt đẩy điện có ống hướng dòng (eDPF) với lực đẩy và hiệu suất cao được nghiên cứu và phát triển cho các thiết bị bay lai hoặc sử dụng điện, bao gồm cả phương tiện bay cất hạ cánh thẳng đứng bằng điện (eVTOL). Các lá cánh tĩnh vừa có công dụng làm thanh chống nối giữa phần vỏ ống hướng dòng với phần vật ở tâm chứa mô-tơ điện, vừa có vai trò giúp giảm bớt dòng khí xoáy tạo bởi các lá cánh quay. Từ đó, các lá cánh tĩnh có thể giúp tăng lực đẩy, giảm độ ồn và nâng cao hiệu suất của quạt đẩy điện có ống hướng dòng. Các thông số về chiều dài dây cung, tỷ số độ dày, đường vòng của biên dạng lá cánh và góc đặt cánh được thay đổi và đối chiếu với thực nghiệm của VasyFan trên quạt đẩy điện đường kính 570mm. Các cải tiến về lá cánh tĩnh đã cho thấy lực đẩy tăng thêm 6.09%.

Từ khóa: Phương tiện bay cất hạ cánh thẳng đứng, Quạt đẩy điện có ống hướng dòng, Lá cánh tĩnh, Mô phỏng số, Lực đẩy.

1. Giới thiệu

“Ducted fan” hay khái niệm cánh quạt có ống bao, lần đầu tiên được Luongo và các cộng sự [1] kiểm tra bằng thực nghiệm vào những năm 1930, và ngay sau đó nó đã được nghiên cứu rộng rãi bằng cách sử dụng lý thuyết và các thí nghiệm tiếp theo. Trước năm 1962, Sacks và Burnell đã trình bày tổng quan về các nghiên cứu ban đầu về UAV [2]. Trong những năm gần đây, do mối quan tâm ngày càng tăng đối với UAV /MAV (Micro Aerial Vehicle), PAV (Personal Aerial Vehicle) và động cơ điện, những nghiên cứu về quạt đẩy điện có ống hướng dòng đã được đẩy mạnh và phát triển mạnh mẽ.

Quạt đẩy có ống hướng dòng là một hệ thống bao gồm các lá cánh được lắp trên trục đặt trong một ống dài thường có hình dạng trụ tròn [3]. Quạt

đẩy có ống hướng dòng đã được chứng minh có thể tăng hiệu suất của lực đẩy lên đến thêm 90% trong hầu hết các trường hợp khi so sánh với quạt không có ống hướng dòng có cùng kích thước. [4-6]

Quạt đẩy điện là một quạt tạo ra lực đẩy lớn sử dụng năng lượng điện. Về mặt cấu tạo, quạt đẩy điện có hai phần là cánh quạt (Fan) giúp tạo ra lực đẩy và mô-tơ điện (Electric Motor) giúp quay các cánh quạt. Quạt đẩy điện có hai dạng là quạt đẩy điện có ống hướng dòng (Electric Ducted Fan) [7-12] và quạt đẩy điện không có ống hướng dòng (Electric Propeller) [13].

Trong quạt đẩy điện, các cánh gạt dẫn hướng tại đầu ra có tác dụng điều chỉnh góc của trường dòng vận tốc khí đi ra khỏi quạt. Theo Bleier [14], hình của cánh gạt dẫn hướng tại đầu ra không

quan trọng bằng hình dạng của các lá cánh rotor. Điều này có thể được giải thích do vận tốc của dòng chất lỏng trước và sau khi đi qua các lá cánh tĩnh không có sự chênh lệch đáng kể như vận tốc của dòng chất lỏng trước và sau khi đi qua các lá cánh rotor.

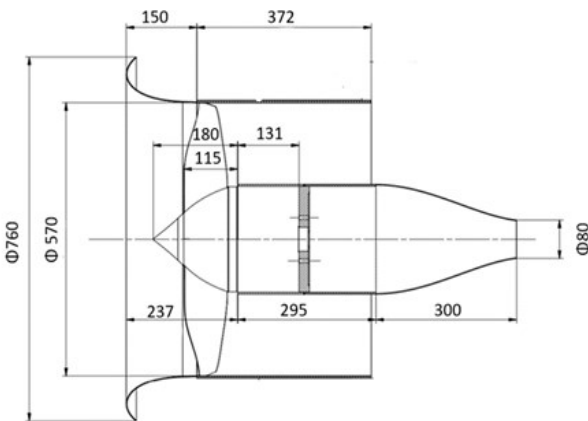
Trong nghiên cứu này, tác giả sẽ khảo sát các thông số của lá cánh tĩnh để tiến hành nghiên cứu ảnh hưởng của lá cánh tĩnh đến lực đẩy của quạt đẩy điện có ống hướng dòng, sau đó sẽ tiến hành tối ưu lá cánh tĩnh để đưa ra mô hình của lá cánh tĩnh với lực đẩy tối ưu nhất.

Với kết quả của nghiên cứu này có thể giúp ích cho việc nghiên cứu về lá cánh tĩnh trong các quạt đẩy điện có ống hướng dòng, sau này có thể nghiên cứu về ảnh hưởng của lá cánh tĩnh đến các thông số khác như kết cấu, tương tác khí động học hay độ ồn của động cơ đẩy điện.

2. Đối tượng nghiên cứu

Bảng 1. Thông số mô hình quạt đẩy nghiên cứu

| Thông số | Giá trị |
|--------------------|----------|
| Số lượng cánh quay | 10 cánh |
| Số lượng cánh tĩnh | 6 cánh |
| Tốc độ thiết kế | 5500 rpm |
| Đường kính quạt | 570 mm |



Hình 1. Kích thước chi tiết của mô hình quạt



Hình 2. Mẫu quạt đẩy VF-570 Standard hãng Vasyfan

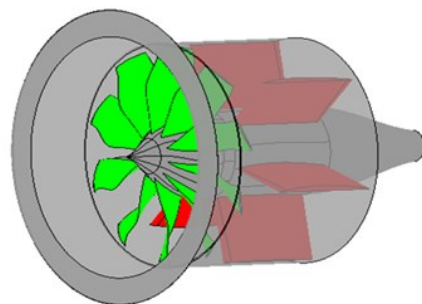
Các thông số mô hình và điều kiện vận hành được lấy theo VasyFan VF-570 (Bảng 1) [15]. Hình 1 và 2 mô tả kích thước chi tiết và mẫu quạt “VF-570 Standard” của hãng Vasyfan.

3. Mô phỏng số

Phương pháp mô phỏng số cho dòng khí trong các loại máy cánh trong máy nén dọc trục đã được TS. Đình Công Trường và các cộng sự [16-26] nghiên cứu rất chi tiết và cụ thể. Từ những nghiên cứu này, tác giả đã ứng dụng để thiết lập các mô hình mô phỏng, thiết lập miền tính toán mô phỏng tối ưu cũng như các phương pháp chia lưới và thiết lập điều kiện biên trong nghiên cứu của mình.

3.1. Thiết lập mô hình mô phỏng

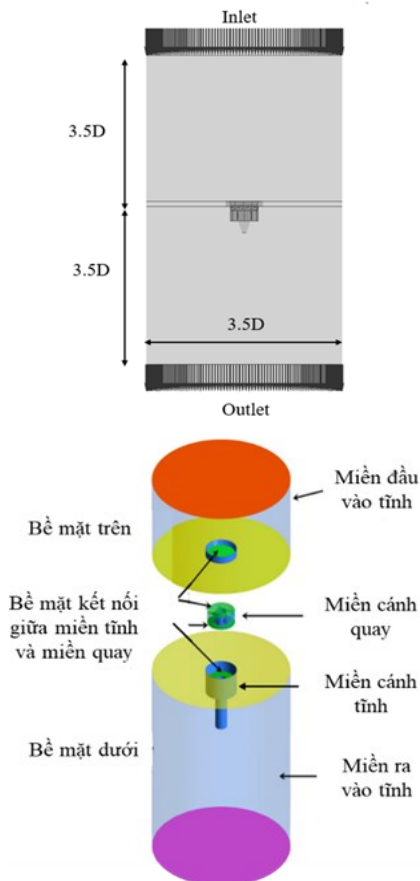
Mô hình mô phỏng của nghiên cứu được thiết kế sử dụng DesignModeler trong phần mềm ANSYS 19.1 [27]. Quạt đẩy điện có ống hướng dòng được thiết kế với 10 cánh rotor, 6 lá cánh stator và ống hướng dòng.



Hình 3. Mô hình hình học của quạt đẩy

Miền tính toán của quạt đẩy điện có ống hướng dòng được thiết lập là bội số của thông số đường kính quạt D=570mm, các thông số này đã được nghiên cứu và chứng minh là tối ưu đối với bài toán mô phỏng dòng chảy khí động học của các loại máy hướng trục nói chung [18]. Kích thước miền tính toán được thiết lập sao cho khi mô phỏng

các điều kiện biên của các miền bao này không ảnh hưởng đến khối khí bao quanh quạt đồng thời kích thước không nên quá lớn làm ảnh hưởng đến thời gian và tài nguyên khi mô phỏng. Kích thước miền bao và phân chia các miền được đưa ra ở Hình 4.



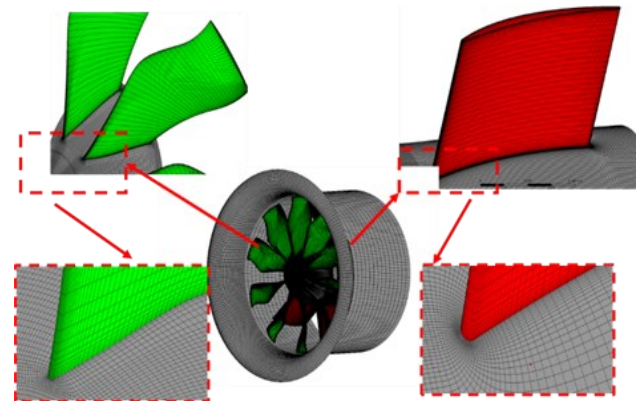
Hình 4. Miền tính toán được xây dựng trên Design Modeler (a) Kích thước miền tính toán, (b) Các miền tính toán và bề mặt kết nối

3.2. Chia lưới

Trong một bài toán mô phỏng dòng chảy nói riêng và bài toán mô phỏng nói chung, lưới là tham số rất quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến kết quả mô phỏng. Trong nghiên cứu này, miền tính toán của bài toán mô phỏng quạt đẩy điện có ống hướng dòng được tiến hành chia thành 4 phần liên kết với nhau trong đó có 1 miền quay và 3 miền tĩnh bao gồm: miền cánh tĩnh, miền đầu vào và miền đầu ra tĩnh. Do là bài toán mô phỏng khảo sát lực đẩy và các hiện tượng của dòng khí khi đi qua miền lá cánh tĩnh nên cần chia lưới tốt hai miền lá cánh quay và lá cánh tĩnh.

Trong bài toán mô phỏng, sử dụng

TurboGrid® trong ANSYS 19.1 [27] để tạo lưới tại miền lá cánh quay, như được thể hiện trên Hình 5. Trong đó, lưới trong miền lá cánh quay và lá cánh tĩnh được tạo nên từ các phần tử lục giác. Vùng gần các lá cánh được chia bằng các lưới loại O, các khu vực khác trong miền lá cánh quay và lá cánh tĩnh được chia bằng các lưới loại C/H/J/L. Các thông số về lưới tại các vùng lá cánh quay và lá cánh tĩnh được trình bày như trong bảng 2.



Hình 5. Cấu trúc lưới

Bảng 2. Thông số phần tử lưới

| Chỉ số | Rotor | Stator |
|------------|-----------|-----------|
| Số nodes | 2.276.220 | 4.115.088 |
| Số phần tử | 2.009.040 | 3.870.240 |

Lưới của vỏ động cơ và miền bao tính toán được chia cấu trúc bằng ICEM-CFD được tích hợp trong ANSYS 19.1 [27]. Số lượng phần tử lưới ở trường hợp tham chiếu của khe rãnh là 2.303.394 phần tử với chất lượng lưới cao hơn 0,8, được đánh giá là lưới tốt [18].

3.3. Điều kiện biên

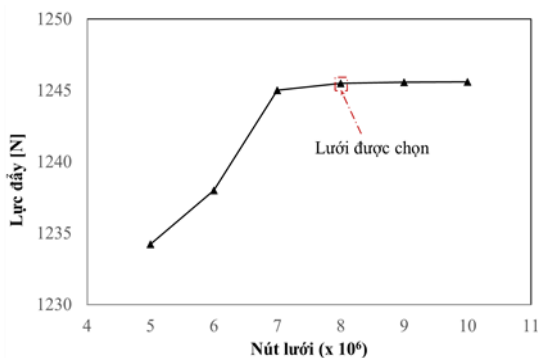
Chất lỏng làm việc được coi là không khí lý tưởng. Với trường hợp mô phỏng tính toán quạt đẩy đang ở chế độ tĩnh. Không xét đến vận tốc và ảnh hưởng dòng khí bên ngoài động cơ: Một áp suất tĩnh trung bình được đặt ở ranh giới đầu ra của rotor để mô phỏng trạng thái ổn định. Áp suất đầu ra được đặt ở áp suất tĩnh trung bình là 0 Pa. Cường độ rối 5% được đặt tại lớp biên đầu vào rotor. Các điều kiện tường mịn và đoạn nhiệt đã được sử dụng tại các bề mặt của lá cánh, vỏ trong và vỏ ngoài. Các điều kiện chu kỳ được sử dụng ở các ranh giới mặt tiếp giáp hai bên của miền tính

toán. Phương pháp mặt tiếp giao lưới chung (GGI) đã được sử dụng để kết nối giữa miền rotor, stator với vỏ động cơ. Phương pháp rotor frozen sử dụng các góc độ xác định là 360° được áp dụng tại mặt tiếp giao giữa các mặt tiếp giao. Mô hình rối hai phương trình $k-\epsilon$ sử dụng với các giá trị $y+$ của các phần tử đầu tiên gần các tường trong phạm vi từ 20 đến 100. Các thông số về điều kiện biên đã được chứng minh là tối ưu trong các nghiên cứu từ trước đó của nhóm nghiên cứu Đinh Công Trường [18].

4. Kết quả và thảo luận

4.1. Khảo sát sự ảnh hưởng của lưới

Ảnh hưởng của số lượng phần tử lưới đến lực đẩy của quạt đẩy điện có ống hướng dòng được thể hiện thông qua đồ thị trên Hình 6. Kết quả thông qua khảo sát cho thấy với các lưới có số lượng lưới từ 7 triệu lưới trở lên, số lượng phần tử trong lưới không còn ảnh hưởng nhiều đến lực đẩy của quạt đẩy điện khi so sánh với các lưới có số lượng phần tử lưới nhỏ hơn 7 triệu. Sai số về lực đẩy của quạt đẩy điện chỉ thay đổi 0,48% đối với các lưới có số lượng phần tử lớn hơn 7 triệu lưới. Do đó để đảm bảo độ chính xác cũng như vẫn giữ được số lượng lưới không quá lớn nhằm tiết kiệm tài nguyên và thời gian tính toán, lưới với số lượng phần tử là 8 triệu lưới được lựa chọn để tiến hành mô phỏng.



Hình 6. Đồ thị đánh giá chất lượng lưới

4.2. Kiểm nghiệm kết quả với thực nghiệm

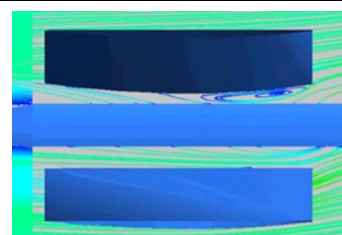
Mô hình quạt “VF-570 Standard” được tiến hành mô phỏng bằng phương pháp sử dụng mô hình rối $k-\epsilon$. Sau khi khảo sát sự ảnh hưởng của chất lượng lưới đến thông số lực đẩy của quạt đẩy

điện có ống hướng dòng, lưới với số lượng phần tử là 8 triệu lưới đã được lựa chọn để tiến hành mô phỏng.

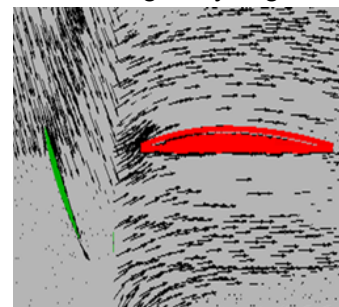
Kết quả từ mô phỏng được so sánh với kết quả từ thực nghiệm, thể hiện trong Bảng 3. Kết quả so sánh cho thấy đối với hiệu suất của quạt đẩy điện, sai số chỉ là 0.625%, đối với thông số khảo sát chính là lực đẩy, sai số là 10.1% và thông số mô-men quay của quạt cho sai số lớn nhất: 15%. Kết quả sai số này có thể được giải thích từ sự thiếu chính xác trong mô phỏng khe hở giữa đầu lá cánh và vỏ của ống hướng dòng và bỏ qua các góc lượn tại vùng chân của các lá cánh. Tuy nhiên với các giá trị sai số này ta có thể chấp nhận, sau đó dùng phần mềm mô phỏng ANSYS CFX 19.1 [27] để tiến hành khảo sát ảnh hưởng từ các thông số của lá cánh tĩnh đến lực đẩy của quạt đẩy điện có ống hướng dòng.

Bảng 3. So sánh đối chiếu kết quả mô phỏng với thực nghiệm

| Tham số | Thứ nguyên | Thực nghiệm | CFD | Sai lệch |
|-----------|------------|-------------|---------|----------|
| Lực đẩy | [N] | 1396 | 1245.2 | 10.1 % |
| Công suất | [kW] | 55 | 59.86 | 7.2 % |
| Hiệu suất | [%] | 80 | 79.5 | 0.625 % |
| Mô-men | [Nm] | 123.4 | 103.843 | 15 % |



a) Hiện tượng xoáy ở gốc cánh



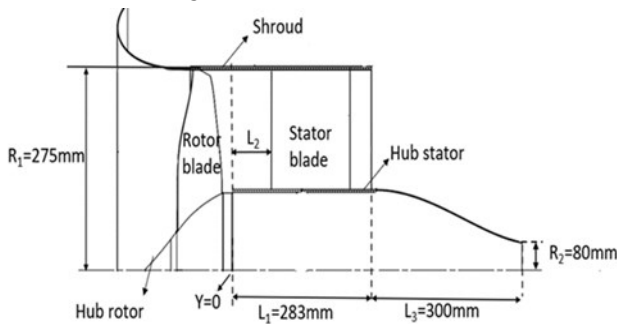
b) Hiện tượng tách dòng trên bề mặt cánh

Hình 7. Hiện tượng của dòng chảy ở quạt nguyên mẫu

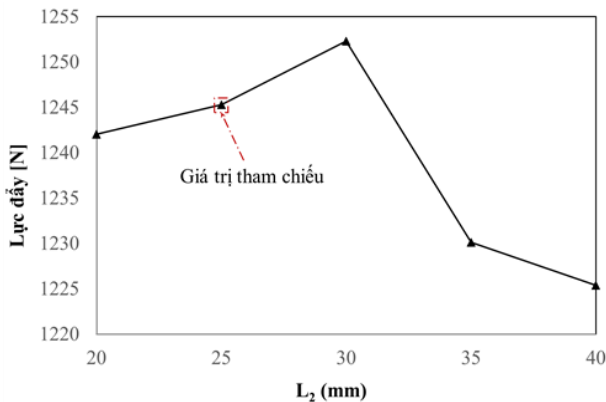
Hình 7 mô tả hiện tượng xoáy trên bề mặt lưng của lá cánh tĩnh, hiện tượng này sẽ làm giảm lực đẩy của quạt đẩy. Do đó, nghiên cứu này chỉ tập chung vào thay đổi khoảng cách giữa lá cánh tĩnh và lá cánh động, góc đặt cánh và chiều dài dây cung của lá cánh tĩnh lên lực đẩy của quạt đẩy điện có ống hướng dòng.

4.3. Đánh giá ảnh hưởng của lá cánh tĩnh

4.3.1. Khảo sát khoảng cách L_2 giữa lá cánh tĩnh và lá cánh quay



Hình 8. Kích thước và các thông số L_2 của quạt đẩy điện



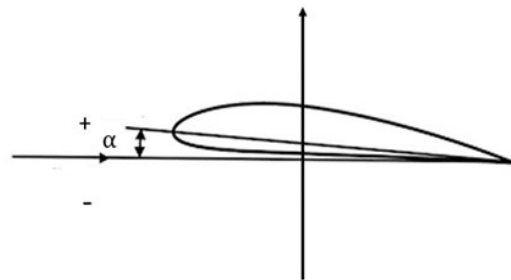
Hình 9. Lực đẩy của quạt phụ thuộc và khoảng cách

Khoảng cách L_2 giữa lá cánh tĩnh và lá cánh quay là tham số đầu tiên được lựa chọn để tiến hành khảo sát ảnh hưởng của lá cánh tĩnh.

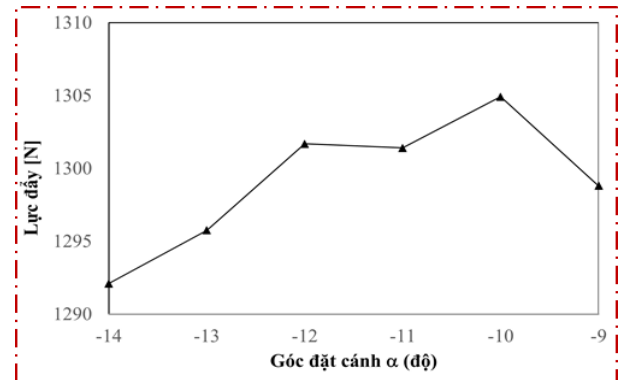
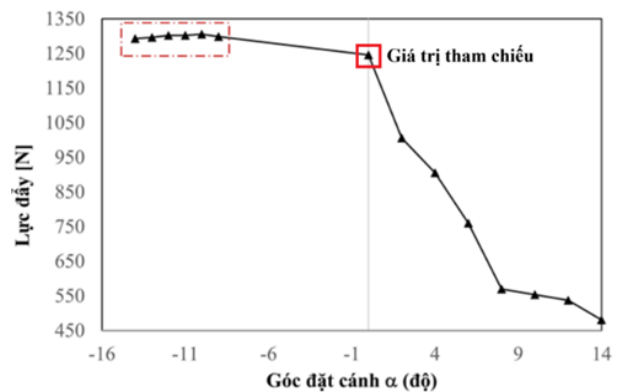
Lực đẩy của quạt đẩy điện có ống hướng dòng thay đổi khi thay đổi khoảng cách L_2 giữa lá cánh tĩnh và lá cánh quay. Lực đẩy của quạt đạt giá trị 1245.28N tương ứng với giá trị khoảng cách $L_2 = 25\text{mm}$, giá trị này sẽ được sử dụng làm giá trị tham chiếu để tiến hành khảo sát. Khi khoảng cách L_2 thay đổi từ $L_2 = 20\text{mm}$ đến $L_2 = 40\text{mm}$ thông qua đồ thị trên Hình 9 có thể thấy tại giá trị $L_2 = 30\text{mm}$,

lực đẩy của quạt đạt giá trị 1252.34N, tăng thêm 0.57% khi so sánh với giá trị tham chiếu.

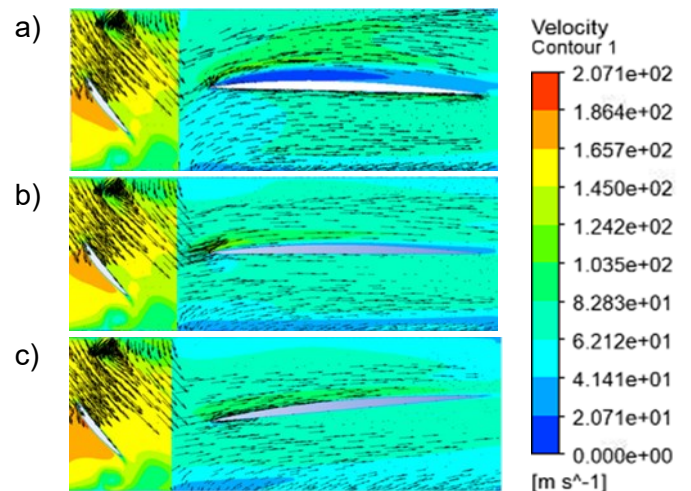
4.3.2. Khảo sát góc đặt của lá cánh tĩnh



Hình 10. Góc đặt cánh α của lá cánh tĩnh



Hình 11. Đồ thị phụ thuộc lực đẩy quạt đẩy điện vào góc đặt cánh tĩnh α



Hình 12. Hình ảnh phân bố trường dòng và vận tốc trên mặt cắt qua động cơ tại những góc đặt α khác nhau: (a) $\alpha = 2^\circ$; (b) $\alpha = 0^\circ$; và (c) $\alpha = -10^\circ$

Tham số góc đặt của lá cánh tĩnh sẽ ảnh hưởng đến đường dòng chảy đầu ra sau khi dòng này đi qua các lá cánh tĩnh, đồng thời dòng sau khi đi qua các lá cánh quay sẽ bị xoáy do đó việc điều chỉnh góc đặt tối ưu nhất của lá cánh tĩnh sẽ giúp dòng sau lá cánh tĩnh hội tụ, đạt hiệu suất lớn nhất. Trong nghiên cứu này, góc đặt của lá cánh tĩnh α sẽ được tiến hành khảo sát và thay đổi theo 2 chiều âm, dương được thể hiện trong Hình 10.

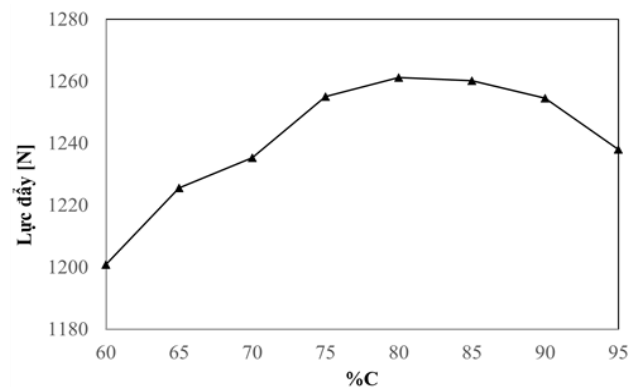
Hình 11 thể hiện mối quan hệ giữa góc đặt α của lá cánh tĩnh đến lực đẩy của quạt đẩy điện có ống hướng dòng. Đối với trường hợp giảm góc α từ 0 độ xuống -14 độ, tại góc $\alpha = -10$ độ giá trị lực đẩy đạt giá trị lớn nhất 1304.91N tăng 4.7% khi so sánh với góc $\alpha = 0$ độ. Trường hợp thay đổi giá trị góc α tăng theo chiều dương, có thể dễ dàng thấy rằng lực đẩy của quạt đẩy điện giảm nhanh từ 1235.08N tại $\alpha = 0$ xuống chỉ còn 480.184N tại $\alpha = 14$ độ.

Hình 12 thể hiện sự thay đổi trong phân bố trường dòng và vận tốc của quạt đẩy điện có ống hướng dòng đối với 3 trường hợp khác nhau của góc đặt lá cánh tĩnh α . Tại góc đặt lá cánh tĩnh $\alpha = 2$ độ (Hình 12(a)) ta có thể thấy sự tách rời hoàn toàn của dòng chảy trên bề mặt lá cánh tĩnh làm giảm lực đẩy của quạt đẩy điện. Đối với 2 trường hợp còn lại: $\alpha = 0$ độ (Hình 12(b)) và $\alpha = -10$ độ (Hình 12(c)) ta không còn thấy sự tách rời này.

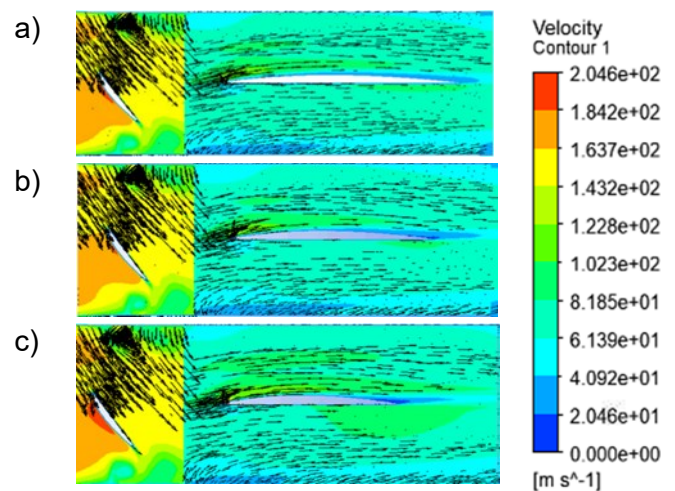
4.3.3. Trường hợp thay đổi độ dài dây cung C

Với chiều dài dây cung ban đầu là $C = 240\text{mm}$, các thông số của profile được giữ nguyên và bằng cách quan sát các kết quả (Hình 13) với sự thay đổi chiều dài của dây cung ta thấy rằng với chiều dài dây cung $C = 192\text{mm}$ (tương ứng 80% chiều dài C) sẽ đạt được lực đẩy lớn nhất 1261.16N tăng 1.27% so với trường hợp nguyên mẫu ban đầu. Quan sát phân bố trường dòng và vận tốc trong Hình 14, ta thấy xuất hiện vùng vận tốc cao ngay dưới vùng bụng đuôi cánh đối với trường hợp 60%C, đây chính là nguyên nhân làm

giảm lực đẩy của quạt.



Hình 13. Đồ thị phụ thuộc lực đẩy vào dây cung C của profile



Hình 14. Phân bố trường dòng và vận tốc trong trường hợp thay đổi chiều dài dây cung C: (a) 95%C; (b) 80%C; và (c) 60%C

5. Kết luận

Sự ảnh hưởng từ các tham số của lá cánh tĩnh đến lực đẩy của động cơ đẩy điện có ống hướng dòng đã được nghiên cứu và phân tích. Các tham số khoảng cách giữa lá cánh tĩnh và lá cánh quay L2, góc đặt lá cánh tĩnh α và độ dài dây cung C đã được lựa chọn để tiến hành khảo sát. Kết quả cho thấy sự ảnh hưởng lớn của các tham số này đến lực đẩy của quạt đẩy điện.

Trong tương lai, nhờ vào kết quả của nghiên cứu này, ta có thể tiến hành tối ưu các tham số giúp xây dựng mô hình lá cánh tĩnh tối ưu. Đồng thời có thể nghiên cứu thêm ảnh hưởng của lá cánh tĩnh đến kết cấu, tương tác khí động lực học và độ ồn của động cơ đẩy điện sẽ được phân tích, đồng thời tối ưu hóa các tham số còn lại của stator

và các bộ phận khác của động cơ điện.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài mã số B2023-BKA-11.

(This research is funded by the Ministry of Education and Training (MoET) under Project No. B2023-BKA-11).

Tài liệu tham khảo

- [1] C.A. Luongo, P.J. Masson, T. Nam, D. Mavris, H.D. Kim, G.V. Brown, D. Hall. (2009). Next generation more-electric aircraft: a potential application for hts superconductors. In IEEE Transactions on Applied Superconductivity. Vol. 19 pp. 1055–1068.
- [2] A. Sacks and J. Burnell. (1962). Ducted propellers: a critical review of the state of the art. Prog AeronautSci. Vol. 3, pp 85–135.
- [3] H.S. Fletcher, (1957). Experimental investigation of lift, drag, and pitching moment of five annularairfoils. Tech Rep, NACA-TN-4117.
- [4] W. Krüger. (1949). On wind tunnel tests and computations concerning the problem of shroudedpropellers. Tech Rep, National Advisory Committee for Aeronautics.
- [5] R.J. Platt. (1948). Static tests of a shrouded and an unshrouded propeller. Tech Rep, National Advisory Committee for Aeronautics..
- [6] K.J. Grunwald and K.W. Goodson. (1962). Aerodynamic loads on an isolated shrouded-propeller configuration for angles of attack from –10 degrees to 110 degrees. Tech Rep, NASA. Washington DC.
- [7] R.K. Luo, X.P. Wu, A. Spinks. (2009). Heat generation analysis of a rubber wheel using the steady-state transport analysis capability in abaqus. Proc. of SIMULIA Customer Conference. London, England.
- [8] J.M. Carlton. (2018). Propellers and Propulsion. 4th ed, Butterworth-Heinemann. London.
- [9] Y. Ohya, T. Karasudani, A. Sakurai, K.I. Abe and M. Inoue. (2008). Development of a shrouded wind turbine with a flanged diffuser. J Wind Eng Ind Aerodyn. 96(5), pp 524–539.
- [10] B. Gilbert, R. Oman and K. Foreman. (1978). Fluid dynamics of diffuser-augmented wind turbines. J.Energy. Vol. 2(6), pp 368–374.
- [11] T.M. Gaffey, C. Zhang, T.R. Quackenbush, C. Sheng and M. Hasbun. (2015). Aeromechanics of the coaxial compound helicopter. 56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference.
- [12] W. Johnson, J.F. Elmore, E.B. Keen, A.T. Gallaher, and G.F. Nunez. (2016). Coaxial compound helicopter for confined urban operations. In American Helicopter Society International - AHS Specialists' Conference on Aeromechanics Design for Vertical Lift 2016. pp. 210–239.
- [13] T. Neff and A. Lahm. (2014). Structural Statics and Dynamics on Axial Fan Blades. 10th International Mine Verification Congress, IMVC2014. South Africa.
- [14] F.B. Bleier. (1997). Fan Handbook. New York: McGraw-Hill.
- [15] VasyFan. (2023). EDF VF-570 Data Sheet and Instruction Manual. <https://www.vasyfan.com/Edf570/PlusVF570.html>.
- [16] C.T. Dinh, M.W. Heo and K.Y. Kim. (2015). Aerodynamic performance of transonic axial compressor with a casing groove combined with blade tip injection and ejection. Aerospace Science and Technology. Vol. 46, pp. 176–187.
- [17] C.T. Dinh and K.Y. Kim. (2019). Effects of Non-axisymmetric Casing Grooves Combined with Airflow Injection on Stability Enhancement of an Axial Compressor. International Journal of Turbo and Jet Engines. Vol. 36(3), pp. 283–296.
- [18] C.T. Dinh, S.B. Ma and K.Y. Kim. (2017). Effects of a circumferential feed-back channel on aerodynamic performance of a single-stage transonic axial compressor. In Proceedings of the ASME Turbo Expo. Vol. 2A-2017.
- [19] C.T. Dinh, S.B. Ma and K.Y. Kim. (2017).

- Aerodynamic optimization of a single-stage axial compressor with stator shroud air injection. *AIAA Journal*. Vol. 55(8), pp. 2739–2754.
- [20] C.T. Dinh, D.Q. Vu and K.Y. Kim, K. Y. (2020). Effects of Rotor-Bleeding Airflow on Aerodynamic and Structural Performances of a Single-Stage Transonic Axial Compressor. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. Vol. 21(3), pp. 599–611.
- [21] C.T. Dinh, T.D. Vuong, X.T. Le, T.M. Nguyen, and Q.H. Nguyen. (2023). Aeromechanic performance of a single-stage transonic axial compressor with recirculation-bleeding channels. *Australian Journal of Mechanical Engineering*. Vol. 21(1), pp. 154–167.
- [22] T.D. Vuong, K.Y. Kim, K. Y and C.T. Dinh. (2021). Recirculation-groove coupled casing treatment for a transonic axial compressor. *Aerospace Science and Technology*. Vol. 111.
- [23] H.Q. Chu and C.T. Dinh. (2022). Aerodynamic and structural performances of a single-stage transonic axial compressor with blade fillet radius. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems*.
- [24] A.T. Nguyen, H.D. Vo, C.T. Dinh and H.Q. Chu. (2022). Aerodynamic Performances of a Single-Stage Transonic Axial Compressor using an Inclined Casing Groove. *Australian Journal of Mechanical Engineering*.
- [25] D.Q. Tran, X.T. Le, V.H. Nguyen, C.T. Dinh and Vu, T. S. (2022). Aerodynamic Performance Optimization of a Single-stage Axial Compressor using Circumferential Bleeding Airflow. *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation*. Vol. 54(4), pp. 451–466.
- [26] D.Q. Tran, V.H. Nguyen, T.S. Vu, C.T. Dinh, T.C. Nguyen and X.L. Bui. (2023). Aerodynamic Performance of a Single-stage Transonic Axial Compressor using a Hybrid Inclined Groove-Recirculation Casing Treatment. *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation*. Vol. 55(2), pp. 143–157.
- [27] ANSYS. (2018). *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*, ANSYS 19.1, ANSYS Inc.