

# Mô phỏng đặc tính hoạt động của quạt ly tâm công suất 5,5 kW với phần mềm OpenFOAM

Ngô Khánh Hiếu\*, Lê Văn Long\*, Lê Đình Anh Huy



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

## TÓM TẮT

Quạt ly tâm là một thiết bị hoạt động theo nguyên lý ly tâm, khi làm việc cánh quạt ly tâm sẽ hút không khí dọc theo trục, lúc này áp suất tại tâm quạt nhỏ, không khí sẽ chuyển từ nơi có áp suất cao xuống nơi có áp suất thấp. Nói một cách khác, không khí sẽ được luân chuyển vào tâm quạt và được cấp thêm năng lượng ly tâm. Sự ra đời của quạt ly tâm đã mang đến cho chúng ta rất nhiều lợi ích như thông gió tầng hầm hoặc nơi không thể lắp quạt thông gió trực tiếp. Chính vì vậy, việc nghiên cứu đặc tính hoạt động của quạt ly tâm là vấn đề đáng được quan tâm hiện nay, từ đó có những bước phát triển nhằm nâng cao hiệu suất quạt. Trong nội dung bài báo này, một mô hình mô phỏng đặc tính hoạt động của quạt ly tâm được thực hiện trên công cụ snappyHexMesh với ô lưới chủ yếu là hexahedron. Theo đó, các kết quả mô phỏng đặc tính hoạt động của quạt áp dụng mô hình rối  $k-\omega$  SST được so sánh với các giá trị đo đạc từ thực nghiệm. Những kết quả đạt được từ việc áp dụng công cụ chia lưới tự động snappyHexmesh và bộ giải simpleFoam của phần mềm mã nguồn mở OpenFOAM cho thấy độ tin cậy trong việc tính toán và thiết kế quạt ly tâm. Trên cơ sở đó có thể giảm chi phí cho việc cải thiện hiệu suất hoạt động cho các mẫu quạt ly tâm bằng phương pháp mô phỏng số.

**Từ khoá:**  $k-\omega$  SST, OpenFOAM, quạt ly tâm, simpleFoam, snappyHexMesh

## GIỚI THIỆU

Cũng giống như quạt hướng trục, quạt hút ly tâm là một trong những dòng quạt thông gió được sử dụng nhiều nhất hiện nay. Trong các ngành công nghiệp quạt ly tâm được sử dụng rất nhiều, công dụng chủ yếu là hút khí nóng trong nhà máy sản xuất. Vì thế mà việc tạo môi trường thông thoáng là điều cần thiết trong vấn đề ô nhiễm cấp bách hiện nay. Nhưng hiện nay các thiết bị làm mát được sản xuất rất nhiều mẫu mã và chủng loại khác nhau cùng với đó là hiệu suất hoạt động không giống nhau. Quạt ly tâm chuyển hóa năng lượng cơ thành năng lượng cho dòng lưu chất. Chính vì vậy, để có một hiệu suất hoạt động cao, đòi hỏi nhà sản xuất phải giảm thiểu tối đa việc mất mát năng lượng trong quá trình chuyển hóa năng lượng này.

Những nghiên cứu về dòng lưu chất bên trong quạt ly tâm vô cùng phức tạp bởi mô hình 3D liên quan đến sự rối dòng, tách dòng, sự xâm thực và trạng thái không ổn định<sup>1</sup>. Việc kết hợp phương trình trạng thái dừng cho dòng lưu chất và phương pháp RANS với hai phương trình của mô hình rối  $k-\epsilon$  cho kết quả sai số dưới 10% so với giá trị thực nghiệm. Thúc đẩy việc nghiên cứu xâm thực trong những bài toán hai pha hay lưu chất phi-Newton.

Để tính toán các thông số hiệu suất quạt ly tâm chẳng hạn như cột áp, công suất cung cấp và hiệu suất được

tính toán dựa trên phần mềm mã nguồn mở OpenFOAM và Ansys-Fluent trong nghiên cứu của Huang và cộng sự<sup>2</sup>, được so sánh với kết quả thực nghiệm. Mô phỏng cho thấy phần mềm OpenFOAM có độ chính xác cao hơn so với phần mềm còn lại trong cả hai giải thuật simpleFoam và pimpleDyMFoam bằng mô hình rối  $k-\epsilon$  và  $k-\omega$  SST.

Các giải thuật khác nhau giữa ANSYS, FLUENT trong bài nghiên cứu của Narayan<sup>3</sup> được sử dụng để mô phỏng máy bơm ly tâm. Góc đặt cánh, góc lệch đặt cánh, số cánh, mô hình rối ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất quạt ly tâm. Khi lưu lượng tăng, cột áp giảm thì công suất cung cấp trực tăng và hiệu suất bơm tăng. Hiệu suất lớn nhất tại giá trị được khảo sát, vượt quá giá trị này lưu lượng tiếp tục tăng trong khi đó hiệu suất bơm sẽ giảm.v.v..

Trong nghiên cứu của Mohammad và cộng sự<sup>4</sup>, phổ vận tốc thu được từ kết quả mô phỏng như nhau, nhưng có sự ngược dòng trong phổ vận tốc phần mềm OpenFOAM. Tại cạnh đuôi của bánh công tác, có sự biến động do sự tương tác giữa vỏ quạt và bánh công tác. Phần gần cạnh trước, sự thay đổi diễn ra ít hơn. Một kết quả mô phỏng khác được thực hiện trong nghiên cứu của Jafarzadeh và cộng sự<sup>5</sup> cho thấy đường cong đặc tính được so sánh với kết quả thực nghiệm thu được được đánh giá cao. Nghiên cứu ảnh

Phòng thí nghiệm Trọng điểm ĐHQG-HCM Động cơ đốt trong

### Liên hệ

**Ngô Khánh Hiếu**, Phòng thí nghiệm Trọng điểm ĐHQG-HCM Động cơ đốt trong

Email: ngokhanhieu@hcmut.edu.vn

### Liên hệ

**Lê Văn Long**, Phòng thí nghiệm Trọng điểm ĐHQG-HCM Động cơ đốt trong

Email: longle3001@gmail.com

### Lịch sử

- Ngày nhận: 24-3-2020
- Ngày chấp nhận: 12-12-2020
- Ngày đăng: 31-12-2020

DOI: 10.32508/stdjet.v3i4.695



### Bản quyền

© ĐHQG Tp.HCM. Đây là bài báo công bố mở được phát hành theo các điều khoản của the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



**Trích dẫn bài báo này:** Hiếu N K, Long L V, Huy L D A. **Mô phỏng đặc tính hoạt động của quạt ly tâm công suất 5,5 kW với phần mềm OpenFOAM.** *Sci. Tech. Dev. J. - Eng. Tech.*; 3(4):508-522.

hường của số lượng cánh tác động lên hiệu suất của bơm cũng được tìm hiểu. Và một kết quả quan trọng thu được đó chính là vị trí của bánh công tác để xem xét sự ảnh hưởng của lõi vô quạt lên hiệu suất quạt. Chính vì lẽ đó, nhóm tác giả đã quyết định nghiên cứu một mẫu quạt 5,5 kW ở các dây vòng quay khác nhau đã được tiến hành tại Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc Gia – Hồ Chí Minh, giá trị thu được từ công trình nghiên cứu này làm nền tảng so sánh và đánh giá cho kết quả mô phỏng mà nhóm tác giả thực hiện. Trong bài viết này, nhóm tác giả sử dụng mô hình quạt ly tâm công suất 5,5 kW để đánh giá đặc tính của quạt bằng giải thuật simpleFoam kết hợp phương pháp RANS với mô hình rối k- $\omega$  SST. Theo đó các kết quả mô phỏng tập trung so sánh phổ vận tốc, áp suất, lưu lượng và hiệu suất tại miệng hút của quạt với các giá trị thực nghiệm đo đạc được trước đó của nhóm tác giả (xem Bảng 1). Từ đó đánh giá mức độ tin cậy của mô hình mô phỏng số này. Trên cơ sở đó, có thể dự đoán và ước tính các đặc tính khác mà thực nghiệm chưa thực hiện được.

### LÝ THUYẾT QUẠT LY TÂM

Quạt ly tâm có dòng khí được đưa vào từ miệng ống hút theo phương hướng trục, sau khi qua bánh công tác theo phương vuông góc. Quạt có hai thành phần chính là bánh công tác và buồng xoắn. Vận tốc  $\vec{V} = \vec{U} + \vec{V}_r$  có thể được xác định bằng cách xây dựng tam giác vận tốc như Hình 1<sup>6</sup>. Với  $\vec{V}$ ,  $\vec{V}_r$  là vận tốc tuyệt đối và tương đối của không khí.  $\vec{U} = \omega \vec{r}$  là vận tốc của một điểm trên bánh công tác. Và  $\vec{V}_n$ ,  $\vec{V}_t$  là vector vận tốc trên phương bán kính và phương tiếp tuyến của bánh công tác.

Các phương trình quan trọng xác định đặc tính quạt ly tâm:

Mô men:

$$T = \rho Q (R_2 V_{2t} - R_1 V_{1t}) \quad (1)$$

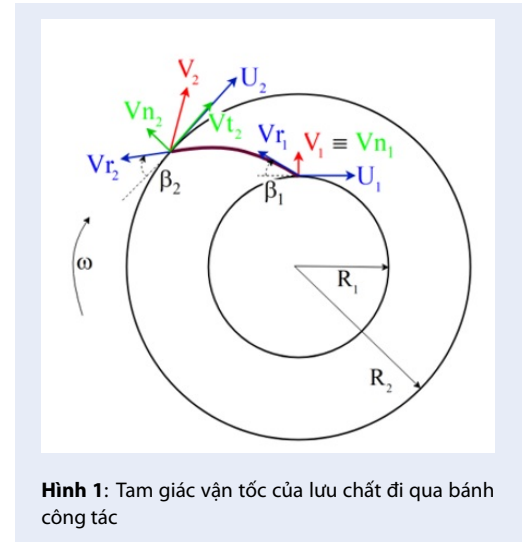
Công suất lưu chất:

$$P = \rho Q (U_2 V_{2t} - U_1 V_{1t}) \quad (2)$$

Hiệu suất toàn bộ quạt:

$$\eta_0 = \frac{P_h}{P_c} = \eta_h \eta_q \eta_{me} \quad (3)$$

Thông thường hiệu suất thể tích ( $\eta_q$ ) trên 98%, và khi không có hệ thống truyền động cơ khí phức tạp, chỉ có trục quay, hiệu suất cơ khí ( $\eta_{me}$ ) cũng cao trên 95%, hiệu suất toàn thể tùy thuộc chủ yếu vào hiệu suất thủy lực ( $\eta_h$ )<sup>7</sup>.



Hình 1: Tam giác vận tốc của lưu chất đi qua bánh công tác

### PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG SỐ

#### Phương pháp Đa Vùng Tham Chiếu (Multiple Reference Frame)

Sử dụng phương pháp đa vùng tham chiếu<sup>8</sup> cho phép miền tính toán chia thành hai miền nhỏ, các vùng này có thể được giả định là đang quay hoặc đang tịnh tiến so với trục tọa độ chính. Phương trình chủ đạo của mỗi miền phụ được lấy từ hệ trục cục bộ của miền phụ đó. Vận tốc tuyệt đối của hệ trục tọa độ được tìm thấy thông qua vận tốc tương đối trong hệ tọa độ xoay quanh hệ tọa độ tuyệt đối theo phương trình:

$$\vec{v} = \vec{v}_r + (\vec{\omega} \times \vec{r}) + \vec{v}_t \quad (4)$$

Trong đó  $\vec{v}$  là vận tốc tuyệt đối trong hệ tọa độ quán tính,  $\vec{v}_r$  được định nghĩa như là vận tốc trong hệ trục tọa độ tương đối và  $\vec{v}_t$  là vận tốc dịch chuyển trong hệ tọa độ phi quán tính. Những định nghĩa này đưa vào trong phương trình Navier-Stokes, gồm những phương trình chính sau:

$$\nabla \rho \vec{v} = 0 \quad (5)$$

$$\nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \mu \nabla \cdot \nabla(\vec{v}) \quad (6)$$

Tính toán phương trình chính cho hệ tọa độ xoay:

$$\nabla \rho \vec{v} = 0 \quad (7)$$

$$\nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) + \rho (\vec{\omega} \times \vec{r}) = -\nabla p + \mu \nabla \cdot \nabla(\vec{v}) \quad (8)$$

Sử dụng công thức (1) khi đó, phương trình chính cho hệ trục xoay có dạng:

$$\nabla \rho \vec{v} = 0 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \nabla(\rho \vec{v}_r \cdot \vec{v}_r) + \rho(2\vec{\omega} \times \vec{r}) + \vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r} \\ = -\nabla p + \mu \nabla \cdot \nabla(\vec{v}_r) \end{aligned} \quad (10)$$

Biểu thức thứ 2 và 3 chính là thành phần Coriolis và gia tốc hướng tâm.

### Giải thuật simpleFoam

SimpleFoam là bộ giải trạng thái ổn định dùng cho lưu chất không nén được và dòng rối. Tại tâm của mỗi ô lưới, OpenFoam sử dụng phương pháp thể tích hữu hạn để giải phương trình vi phân từng phần của dòng lưu chất. Theo cách tiếp cận này, các phương trình tích phân qua mỗi ô lưới (được xem là mỗi thể tích kiểm soát) mà chứa một thuật toán  $\text{div}(\cdot)$  thể được chuyển thành tích phân mặt bằng cách sử dụng định lý Gauss. Tích phân mặt được đóng góp qua mỗi bề mặt của ô lưới. Vấn đề này có thể được giải quyết bằng phép nội suy Rhie-Chow và giải thuật điều chỉnh như là SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations)<sup>9</sup>.

### Mô hình rối k- $\omega$ SST

Biến đầu tiên trong mô hình là động năng rối k dùng để xác định năng lượng rối của dòng<sup>10</sup>. Biến thứ hai  $\omega$  là tốc độ tiêu tán năng lượng riêng từ động năng rối chuyển sang nội năng

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \\ \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \sigma_k \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \omega) = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \sigma_\omega \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \\ + \rho \frac{\sigma_d}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (12)$$

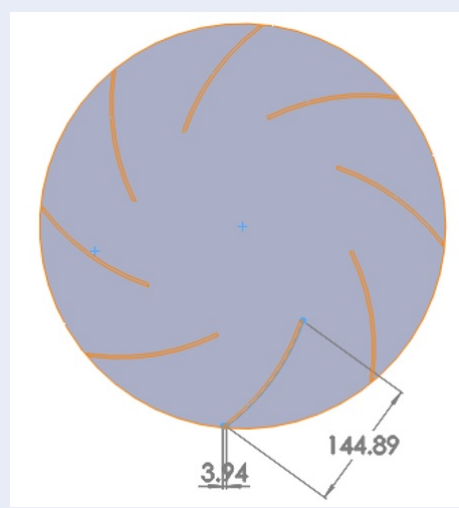
Mô hình rối k- $\omega$  SST có chứa hàm dạng cho phép việc ứng xử dòng ở xa tường áp dụng mô hình rối k- $\epsilon$ , thay vào đó, sát biên tường mô hình k- $\omega$  được áp dụng<sup>11</sup>. Chính vì sự kết hợp này, giúp ta dự đoán chính xác dòng đi qua bề mặt cánh trong trường hợp mô hình k- $\epsilon$  là không thể.

## HÌNH HỌC VÀ MÔI TRƯỜNG KHẢO SÁT

Bên dưới đây là hình ảnh quạt ly tâm dùng trong khảo sát này (Hình 2) và mô hình quạt ly tâm 3D dưới định dạng STL được dựng lại có lắp bộ hạn chế dòng vào đường kính 240 mm (Hình 3).



Hình 2: Quạt ly tâm công suất 5,5 kW với đường kính miệng hút 240 mm



Hình 3: Mô hình 3D của quạt ly tâm 5,5 kW

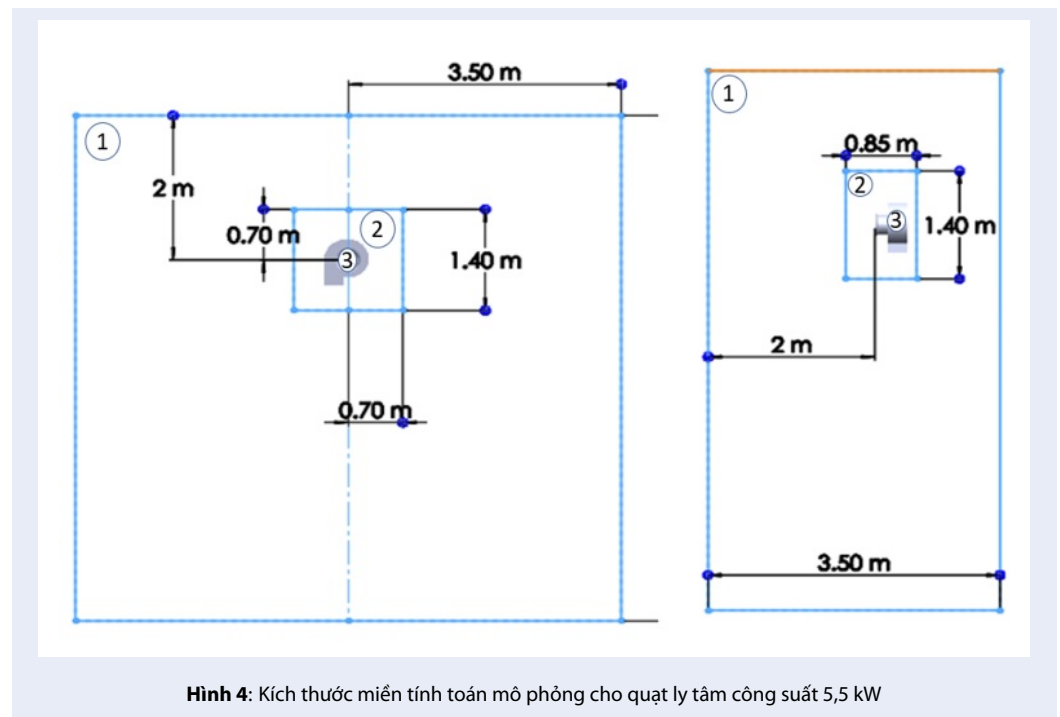
### Lưới

SnappyHexMesh là công cụ chia lưới tự động được cung cấp miễn phí bởi phần mềm mã nguồn mở OpenFOAM. Công cụ này cho phép người dùng tạo ra miền tính toán trong không gian 3 chiều, trong đó bao gồm nhiều loại phần tử lưới khác nhau như: lục diện (hexahedra) và lục diện không hoàn toàn (split-hexahedra) từ bề mặt hình học dưới định dạng STL hoặc OBJ<sup>12</sup>.

Việc lựa chọn kích thước phần tử lưới trên cánh quạt là do bề dày cánh có kích thước 3,94 mm. Nên kích thước tối đa trên cánh vùng cạnh cánh không được vượt quá  $\frac{1}{2}$  giá trị này. Và để đảm bảo độ trơn trên bề mặt công của bánh công tác, ô lưới nhỏ nhất được lựa chọn có giá trị 1,95 mm tương ứng cấp lưới 8 trong snappyHexMesh. Đối với vỏ quạt cũng vậy, để đảm bảo bề mặt dòng vào không được quá thô, sinh ra rối xoáy không mong muốn. Một miền tính toán phù hợp cùng với mật độ phần tử lưới vừa phải sẽ đảm bảo được độ chính xác và giảm thiểu được thời gian tính toán. Chính vì vậy nhóm tác giả để xuất miền tính

**Bảng 1: Các thông số môi trường khảo sát thực nghiệm và mô phỏng**

| Các thông số                   | Giá trị  |
|--------------------------------|--|
| Nhiệt độ khảo sát              | 304,15 °K  |
| Khối lượng riêng của không khí | 1,12 kg/m <sup>3</sup>                                       |
| Độ nhớt động học của không khí | 1,71×10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>         |
| Số vòng quay khảo sát (n)      | 2515 (44Hz); 2628 (46Hz); 2741 (48Hz); 2854 (50Hz) vòng/phút |
| Công suất động cơ              | 5,5 kW   |
| Đường kính bánh công tác       | 450 mm   |
| Đường kính miệng hút           | 240 mm   |
| Kích thước miệng ra            | 240×250 mm   |
| Chiều dài lá cánh              | 145 mm   |



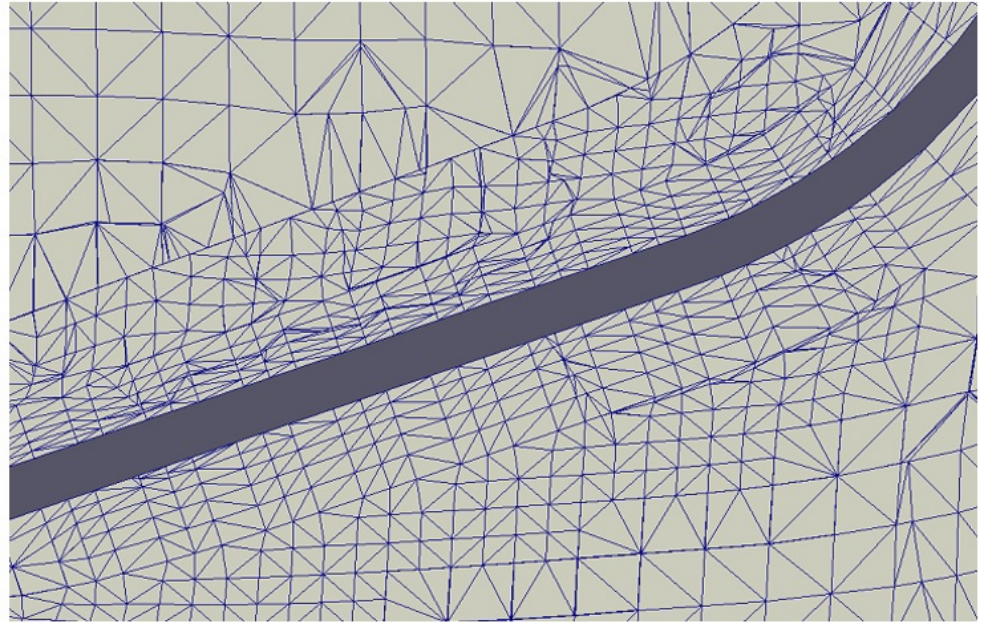
**Hình 4:** Kích thước miền tính toán mô phỏng cho quạt ly tâm công suất 5,5 kW

toán như (Hình 4) phù hợp với điều kiện hoạt động tự nhiên và môi trường khảo sát đủ lớn để ghi nhận mức độ ảnh hưởng của dòng vào và ra đối với môi trường xung quanh.

Số Reynolds đặc trưng đi qua biên dạng cánh bằng 311578. Lớp biên rời được tính bởi công thức Blaricus<sup>13</sup> có giá trị 4,2 mm với độ phát triển 1,2 thì trong trường hợp này, để không tốn kém tài nguyên máy tính và để đảm bảo độ chính xác, lựa chọn  $30 < y+ < 500$ <sup>14</sup>, lớp biên đầu tiên được tính toán theo công thức hệ số ma sát bề mặt [13] không nhỏ hơn 0,52 mm (xem Hình 5). Do đó, theo nghiên cứu của trường

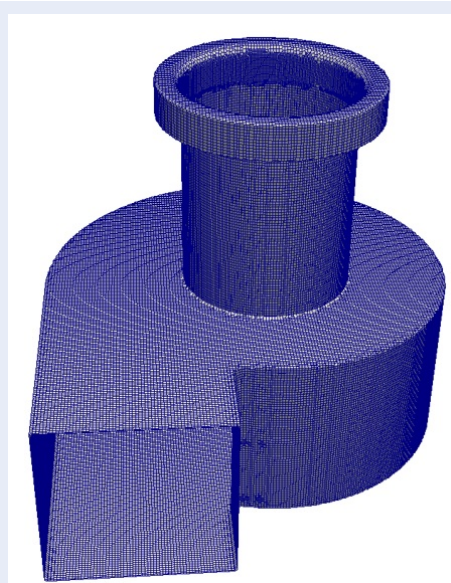
Đại học Chalmers<sup>15</sup> hàm tường kqRWallFunction sử dụng điều kiện biên Neumann<sup>12</sup> và omegaWallFunction ở khu vực giao giữa hai vùng viscous và vùng logarithm được nội suy bằng cách sử dụng hàm dạng dành cho mô hình rối k- $\omega$  SST là phù hợp được nêu trong Bảng 2 .

Các kích thước phần tử lưới lựa chọn cho các phân vùng miền tính toán được mô tả trong Bảng 2<sup>16</sup>. Trong đó, các phần tử lưới trên bề mặt cánh quạt ly tâm và trên vỏ quạt phải có độ mịn vừa đủ để mang lại kết quả mô phỏng chính xác (xem Hình 6 và Hình 7). Bên cạnh đó, các vùng xa cánh xoay hơn có thể giảm



Hình 5: Lớp biên hình thành qua bề mặt bánh công tác.

mật độ lưới nhằm nâng cao hiệu suất về thời gian tính toán. Các chỉ số đánh giá chất lượng lưới được mô tả như Bảng 3 đảm bảo cấu hình phù hợp được mô phỏng trên phần mềm OpenFOAM theo tài liệu nghiên cứu của tác giả Long và cộng sự<sup>16</sup>.



Hình 6: Lưới trên bề mặt vỏ quạt



Hình 7: Lưới trên bề mặt bánh công tác

### Điều kiện biên

Với các kích thước ô lưới được trình bày trong mục 4.1 cho thấy chất lượng lưới chia với phần mềm OpenFoam là tốt (thỏa các tiêu chí đánh giá). Với việc sử dụng hàm tường (được trình bày trong Bảng 4) cho bánh công tác thì cho kết quả  $y^+ > 30$ , khi đó lớp biên đầu tiên sẽ nằm trong vùng logarithm<sup>14</sup>, chính vì vậy, giá trị vận tốc phía bên trong lớp biên đầu tiên được nội suy theo hàm tường áp dụng tại vị trí bề mặt lá cánh bánh công tác.

**Bảng 2: Cấu hình lưới để xuất cho vỏ quạt và bánh công tác**

| Thông số                               | Kích thước (mm)                |
|--|--------------------------------|
| Ô lưới bề mặt vỏ quạt (nhỏ nhất)       | 1,95×1,95 mm <sup>2</sup>      |
| Ô lưới bề mặt vỏ quạt (lớn nhất)       | 3,91×3,91 mm <sup>2</sup>      |
| Ô lưới bề mặt bánh công tác (nhỏ nhất) | 1,95×1,95 mm <sup>2</sup>      |
| Ô lưới bề mặt bánh công tác (lớn nhất) | 3,91×3,91 mm <sup>2</sup>      |
| Ô lưới thể tích miền xoay              | 1,95×1,95×1,95 mm <sup>3</sup> |
| Ô lưới thể tích vỏ quạt trừ miền xoay  | 3,91×3,91×3,91 mm <sup>3</sup> |
| Độ dày lớp biên đầu tiên               | 0,52 mm                        |
| Độ dày lớp biên                        | 4,2 mm                         |
| Số lớp biên                            | 5                              |

**Bảng 3: Bảng tổng hợp kết quả chia lưới cho từng số vòng quay cụ thể.**

|                                | 2515  | 2628  | 2741          | 2854  |
|--------------------------------|-------|-------|---------------|-------|
| Độ lệch lưới lớn nhất          |       |       | 3,99 (<4)     |       |
| Độ bất trực giao lưới lớn nhất |       |       | 67,31 (<70)   |       |
| Tỉ lệ bình diện lớn nhất       |       |       | 15,74 (<1000) |       |
| Số phần tử lưới                |       |       | 6659756       |       |
| y+ trung bình bánh công tác    | 35,82 | 37,43 | 39,00         | 40,61 |

### Độ hội tụ

Một cách đo xem kết quả hội tụ tốt hay không là thông qua việc tính toán phần dư của phương trình chủ đạo ở cuối mỗi bước thời gian. Kết quả có độ hội tụ phù hợp cần có phần dư không vượt quá  $1e-3$ . Kết quả phần dư trung bình được tính bằng cách sử dụng tất cả phần dư ở trong vùng tính toán bình phương chúng, lấy tổng rồi căn bậc 2 tổng đó. Kết quả phần dư lớn nhất có thể được trong biểu đồ hội tụ Hình 8.

## ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### So sánh giá trị thực nghiệm

Hình 9 và Hình 10 thể hiện trường vận tốc và sai số dòng khí ở vùng miệng hút tại số vòng quay mô tả ở Bảng 5 thu được từ kết quả mô phỏng số (CFD) trong vùng từ tâm đến vị trí 0,94R. Kết quả này được so sánh với kết quả khảo sát các trường hợp thực nghiệm (EXP). Sau khi hoàn tất quá trình xử lý dữ liệu khảo sát thực nghiệm và mô phỏng số, vận tốc dòng không khí hút vào đều đạt giá trị tối đa trong khoảng 0,55R-0,71R, rồi giảm nhanh khi đến sát vành ống (từ 0,84R đến 1,00R) là khá cao so với giá trị vận tốc ghi nhận. Tuy nhiên, trong vùng (r/R) từ tâm đến vị trí 0,84R, sai số về vận tốc dòng không khí dưới 10% cho cả 3 trường hợp. Điều này làm tăng tính xác thực độ tin cậy của kết quả mô phỏng số đặc tính của quạt ly tâm.

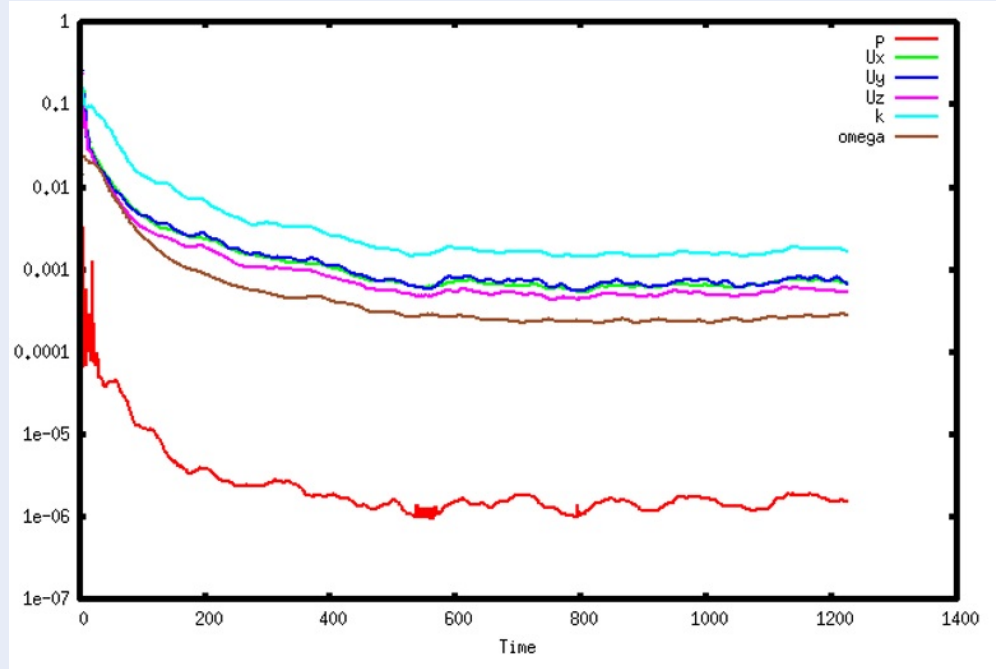
Theo đó, Kết quả so sánh độ lớn vận tốc giữa thực nghiệm và mô phỏng có sai khác lớn nhất 36,68 % ở số vòng quay 2515 vòng/phút (44 Hz) cách rìa ngoài của vành miệng hút là 6,12 mm. Vị trí này ngay sát với bề mặt thành rắn, nơi vận tốc gần tường là một hàm nội suy theo vị trí tính từ tường, càng xa tường, vận tốc càng gần tâm càng ổn định, đây là điều chúng ta mong muốn. Để cải thiện điều này, miệng vào của quạt phải được làm trơn, nhằm mục đích độ thay đổi vận tốc theo bán kính là không nhiều, giúp giảm sự hình thành rối xoáy ở thành ống trước khi đi vào bánh công tác. (xem hình vỏ quạt). Vùng tập trung sai số nhỏ nhất tại vị trí ghi nhận là 0,71R có giá trị là 0,84 %. Sai số vận tốc trung bình lần lượt cho 3 trường hợp là 3,37 %; 2,31 % và 1,25 %. Điều này cho thấy mô hình mô phỏng số đặc tính hoạt động của quạt ly tâm đưa ra bởi nhóm tác giả là tin cậy.

Bảng 5 tổng hợp các kết quả đặc tính đặc trưng như mô men trục, lưu lượng, vận tốc trung bình, áp suất và hiệu suất thủy lực của quạt theo tần số hoạt động khác nhau nhờ vào công cụ PARAVIEW trên phần mềm OpenFOAM.

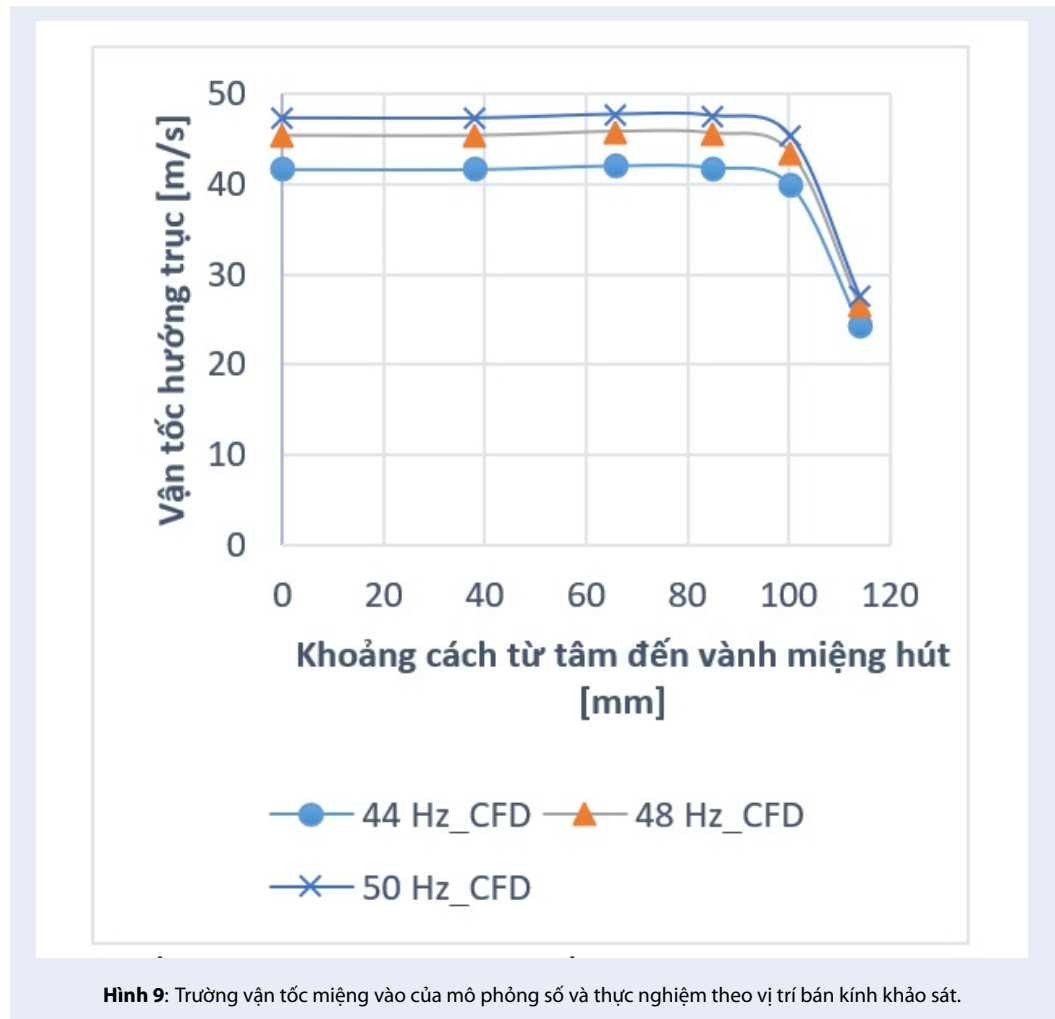
Nhận thấy sự tương quan của hai đường đặc tính gần như trùng nhau (xem Hình 11). Khi tăng tốc độ quay, lưu lượng và áp suất cũng tăng theo. Nhưng tăng đến một lúc nào đó, độ tăng áp suất sẽ ít nhạy so với tốc

**Bảng 4: Điều kiện biên mô phỏng**

| Trường                           | U                     | P                    |                        |  |
|----------------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|--|
| <b>Inlet (mặt vào)</b>           | zeroGradient          | zeroGradient         |                        |  |
| <b>Outlet (mặt ra)</b>           | inletOutlet           | fixedValue           |                        |  |
| <b>Inner (vùng trung gian)</b>   | inletOutlet           | fixedValue           |                        |  |
| <b>Propeller (bách công tác)</b> | fixedValue            | zeroGradient         |                        |  |
| <b>Duct (vỏ quạt)</b>            | fixedValue            | zeroGradient         |                        |  |
| <b>Trường</b>                    | <b>nut</b>            | <b>k</b>             | <b>omega</b>           |  |
| <b>Inlet (mặt vào)</b>           | calculated            | fixedValue           | fixedValue             |  |
| <b>Outlet (mặt ra)</b>           | calculated            | zeroGradient         | zeroGradient           |  |
| <b>Inner (vùng trung gian)</b>   | calculated            | slip                 | slip                   |  |
| <b>Propeller (bách công tác)</b> | nutk-<br>WallFunction | kqR-<br>WallFunction | omega-<br>WallFunction |  |
| <b>Duct (vỏ quạt)</b>            | nutk-<br>WallFunction | kqR-<br>WallFunction | omega-<br>WallFunction |  |



**Hình 8: Độ hội tụ của quạt ly tâm**



Hình 9: Trường vận tốc miệng vào của mô phỏng số và thực nghiệm theo vị trí bán kính khảo sát.

độ vòng quay. Đường đặc tính càng dốc, độ tăng áp suất sẽ nhạy hơn so với mức tăng lưu lượng. Điều này có ý nghĩa tiên quyết khi nhà sản xuất muốn thiết kế quạt ly tâm với mục đích nâng cao áp suất hoặc hiệu suất. Đồ thị (Hình 12) cũng cho thấy, hiệu suất lớn nhất cùng là tần số 48 và 50 Hz, khi đó công làm quay bánh công tác chuyển hóa thành công có ích của quạt ly tâm có tỉ lệ cao hơn so với trường hợp 44 Hz còn lại. Ở mục 5.2 tác giả sẽ đánh giá hiệu suất dựa trên một giá trị đề xuất mà khảo sát thực nghiệm chưa có, để tìm ra đặc tính hoạt động tối ưu nhất ở quạt ly tâm này.

Sai số khác biệt về hiệu suất rõ rệt được quan sát ở tần số cụ thể là 50 Hz là 8,8 %. Ghi nhận giá trị sai số trong cả 3 trường hợp mô phỏng ở tốc độ vòng quay khác nhau là do giá trị hiệu điện thế và cường độ dòng điện thực tế được nội suy theo số vòng quay lớn nhất. Công suất trục không tải được tính tại số vòng quay lớn nhất. Sai số lớn nhất của hai đặc trưng lưu lượng và áp suất xảy ra tại tần số 44 Hz lần lượt là 3,37 %

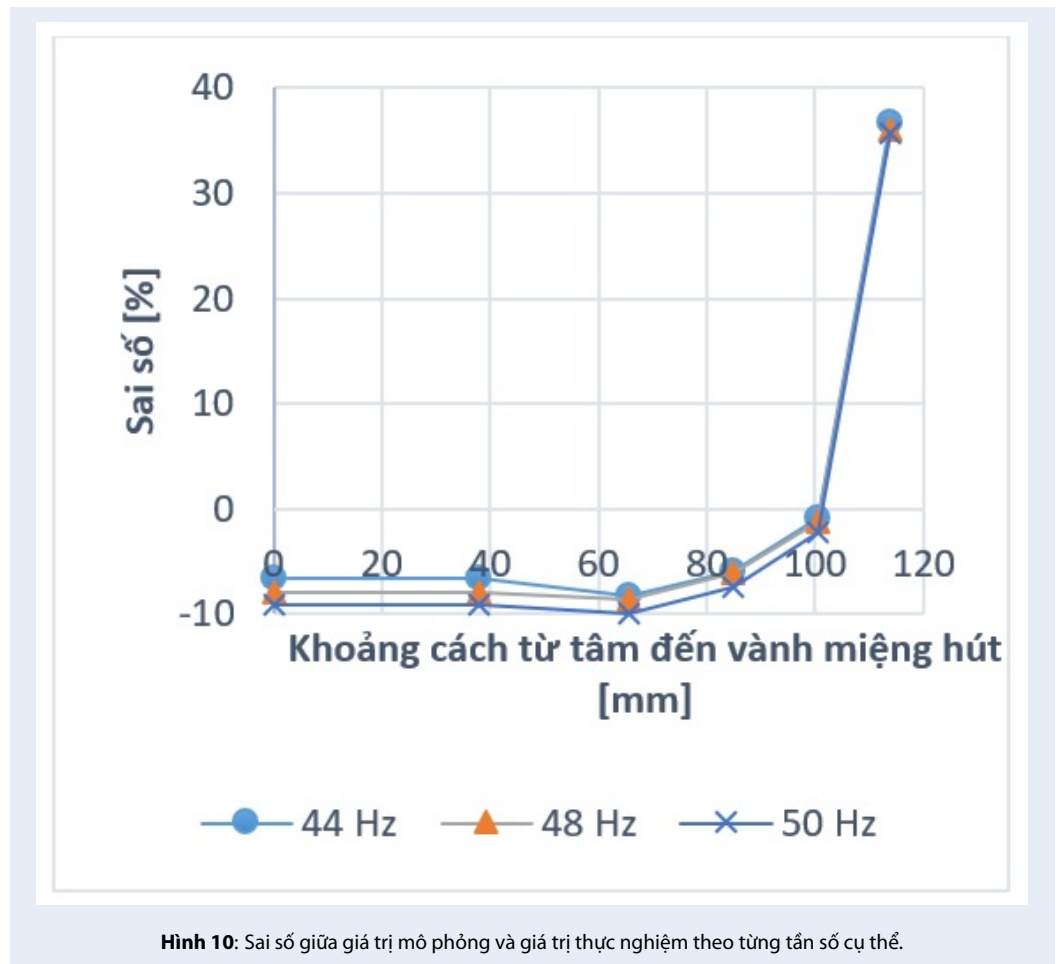
và 6,64 %. Nên đặc tính mô phỏng CFD của quạt chỉ phù hợp về áp suất và lưu lượng, hiệu suất là không đổi ở một đường kính miệng vào cố định. Điều này chứng tỏ, tốc độ quay càng cao, dòng vào ở miệng hút càng ổn định, khả năng xuất hiện rối xoáy ảnh hưởng ít đến các đặc tính của quạt ly tâm.

Để đánh giá đặc tính quạt ly tâm qua mô phỏng để tìm hiệu suất quạt cao nhất, cũng như cần thực hiện trên nhiều tần số khác nhau để kiểm tra mô hình lưới có cần điều chỉnh phù hợp hay không – điều này còn được gọi là mô hình lưới tối ưu cho mỗi bài toán khi không cần phải thay đổi số lượng ô lưới để tối đa hóa thời gian nhất có thể mà vẫn đảm bảo độ chính xác.

### Tính toán một giá trị đề xuất

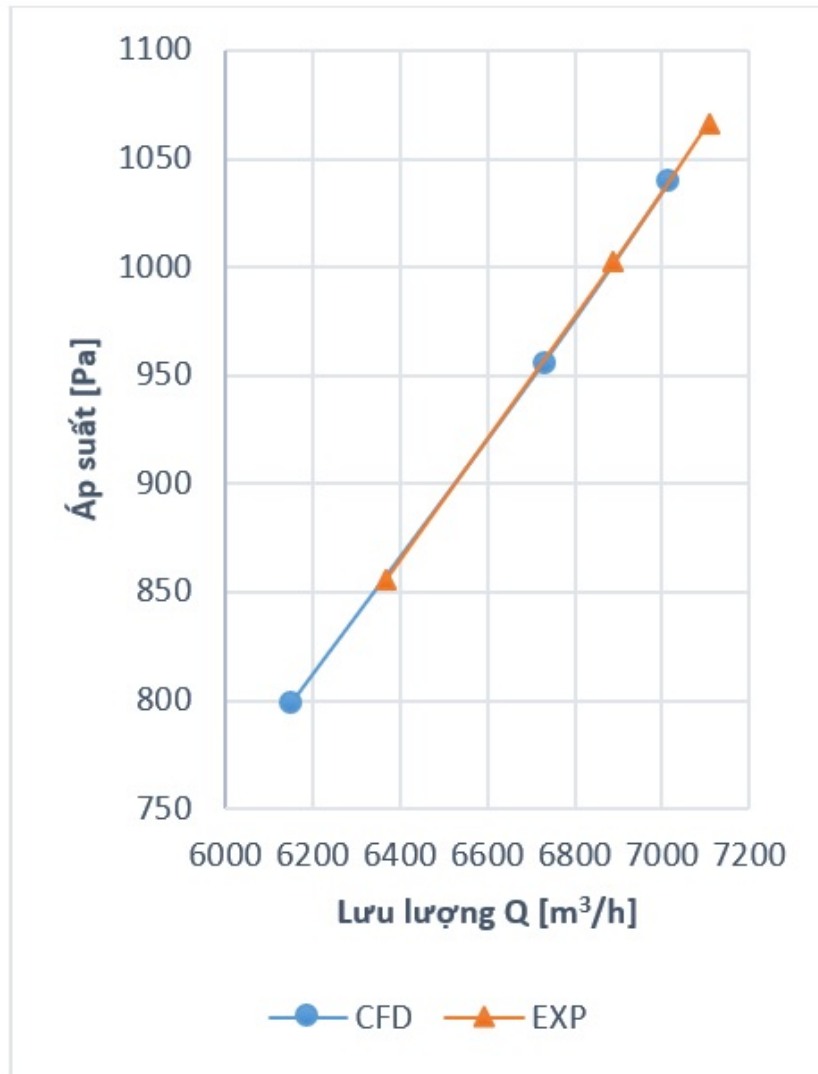
Giá trị được đề xuất mô phỏng ở tần số 46 Hz – tương đương số vòng quay 2628 vòng/phút mà thực nghiệm chưa thực hiện (xem Hình 14) có lưu lượng là 6450,21 m<sup>3</sup>/h. Hiệu suất thủy lực quạt được tính bằng cách





**Bảng 5:** Các giá trị đặc tính của mô phỏng số và dữ liệu thực nghiệm

| Đại lượng                | 44 Hz   |         | 48 Hz   |         |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                          | CFD     | EXP     | CFD     | EXP     |
| Torque                   | 11,93   |         | 13,85   |         |
| Q [m <sup>3</sup> /h]    | 6152,35 | 6367,32 | 6729,61 | 6888,96 |
| Vận tốc trung bình [m/s] | 37,78   | 39,10   | 41,32   | 42,30   |
| Áp suất miệng vào [Pa]   | 799,17  | 856     | 956,18  | 1002    |
| Hiệu suất [%]            | 43,47   | 43,5    | 45      | 43,1    |
| Đại lượng                | 50 Hz   |         |         |         |
|                          | CFD     |         | EXP     |         |
| Torque                   | 15,05   |         |         |         |
| Q [m <sup>3</sup> /h]    | 7016,81 |         | 7105,68 |         |
| Vận tốc trung bình [m/s] | 43,08   |         | 43,63   |         |
| Áp suất miệng vào [Pa]   | 1039,53 |         | 1066,03 |         |
| Hiệu suất [%]            | 45      |         | 41,4    |         |



Hình 11: Đồ thị mối quan hệ áp suất với lưu lượng theo từng tần số cụ thể.

lấy công suất hữu ích (được tính thông qua lưu lượng khối lượng dòng khí tại miệng hút của quạt) chia cho công suất cần tạo ra từ chuyển động quay của bánh công tác. Bên cạnh kết quả về phổ vận tốc, kết quả mô phỏng còn cho phép xác định được dễ dàng mô men cản ( $\tau$ ) là 12,71 Nm. Theo đó công suất cần (cung cấp) được xác định theo biểu thức dưới đây:

$$W_{cn\_CFD} = 2\pi nQ = 2\pi \times (2628/60) \times 12,71 = 3498 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{1}{2}\rho V^2 = \frac{1}{2} \times 1,12 \times \left( \frac{6450,21 \div 3600}{\pi \times 0,12^2} \right)^2 \\ &= 878,43 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Từ đó xác định công suất hữu ích của quạt là:

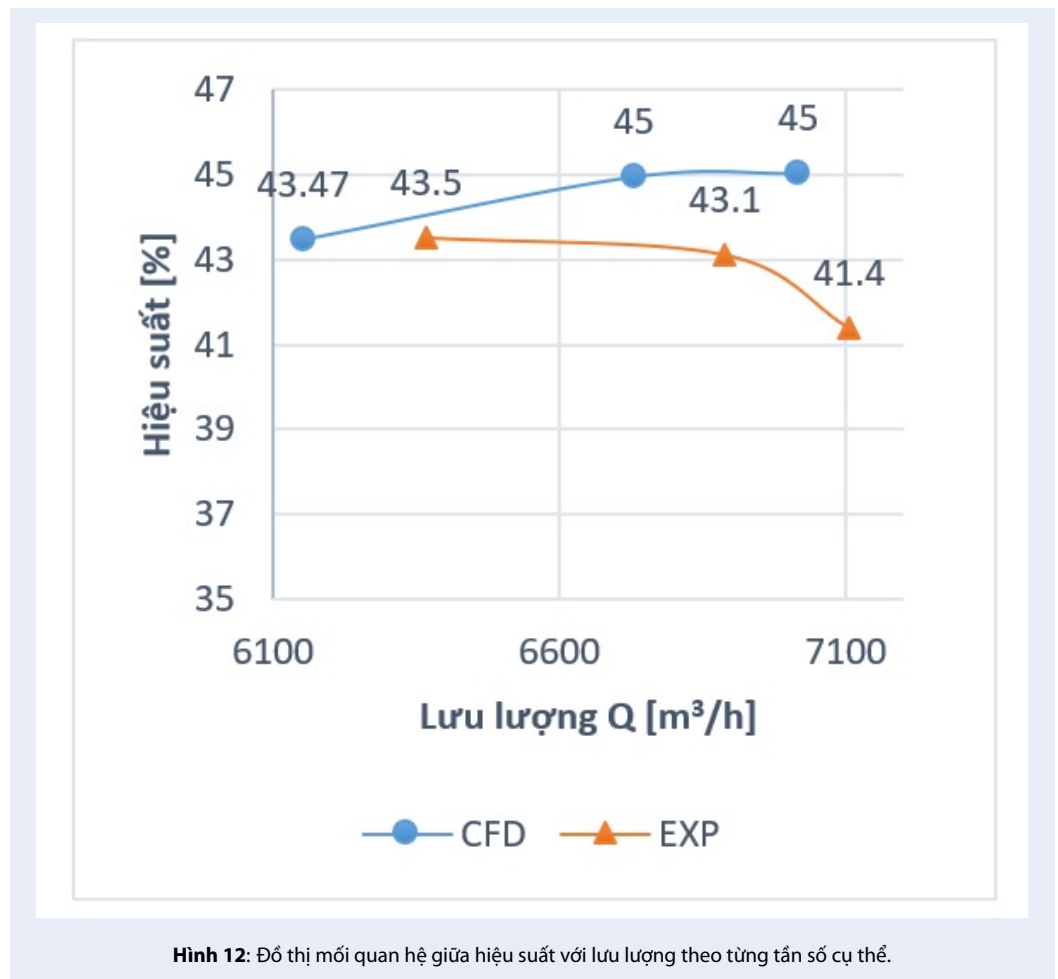
$$W_{hu\_ch\_CFD} = \Delta p \times Q = 878,43 \times \frac{6450,21}{3600} = 1573,9 \text{ W}$$

Hiệu suất quạt theo kết quả mô phỏng số thu được:

$$\eta_{CFD} = (1573,9/3498) \times 100 = 45\%$$

Như vậy theo Hình 13 và Hình 14, có thể thấy, trường hợp hiệu suất quạt cao nhất tại 3 tần số 46 Hz, 48 Hz và 50 Hz và áp suất cao nhất tại 50 Hz ở trạng thái hoạt động được lắp bộ phận hạn chế dòng với đường kính 240 mm.

Y+ là một khoảng cách vô thứ nguyên tính từ tâm ô lưới đầu tiên đến tường. Khi sử dụng hàm tường, giá trị y+ trong tầm  $30 < y+ < 500$  nằm trong vùng log-law. Trong bài báo này, giá trị y+ trong khoảng 30 đến 280, trong đó, trên bề mặt cánh, y+ đạt giá trị 40 thỏa điều kiện hàm tường thể hiện trong Hình 15.



Phổ vận tốc tại miệng ra của quạt ly tâm bị mất năng do dòng sau khi ra khỏi bánh công tác, vị trí sát vỏ quạt thể hiện ở Hình 16. Để cải thiện điều này, góc đặt cánh tại lối ra bánh công tác cần được thay đổi so với thiết kế cánh hiện tại, khi đó dòng không khí ra khỏi bánh sẽ cải thiện được hiệu suất cũng như các đặc tính khác của quạt.

### KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Mô hình mô phỏng quạt ly tâm sử dụng mô hình rối k-omega SST kết hợp dạng lưới đa vùng tham chiếu với các phần tử lưới chính là lục diện được tạo bằng công cụ snappyHexMesh trên nền tảng phần mềm mã nguồn mở OpenFOAM cho kết quả đáng tin cậy. Cụ thể, dự đoán khá chính xác về đặc tính áp suất và lưu lượng của quạt so với dữ liệu thực nghiệm. Chính vì vậy, mô hình này có thể áp dụng một cách tương tự để khảo sát và dự đoán các đặc tính quạt ly tâm tại số vòng quay khác nhau, giúp tiết kiệm thời gian, song song đó, trước khi đi đến việc chế tạo mẫu thử và sản xuất đại trà.

Trong tương lai, nhóm tác sẽ giả áp dụng mô hình này để tiến hành khảo sát và tính toán cho quạt ly tâm ở nhiều kích thước miệng hút, biên dạng bánh công tác, cũng như là công suất quạt lớn hơn nhằm nâng cao hiệu suất hoạt động và đánh giá chế độ làm việc.

### DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT

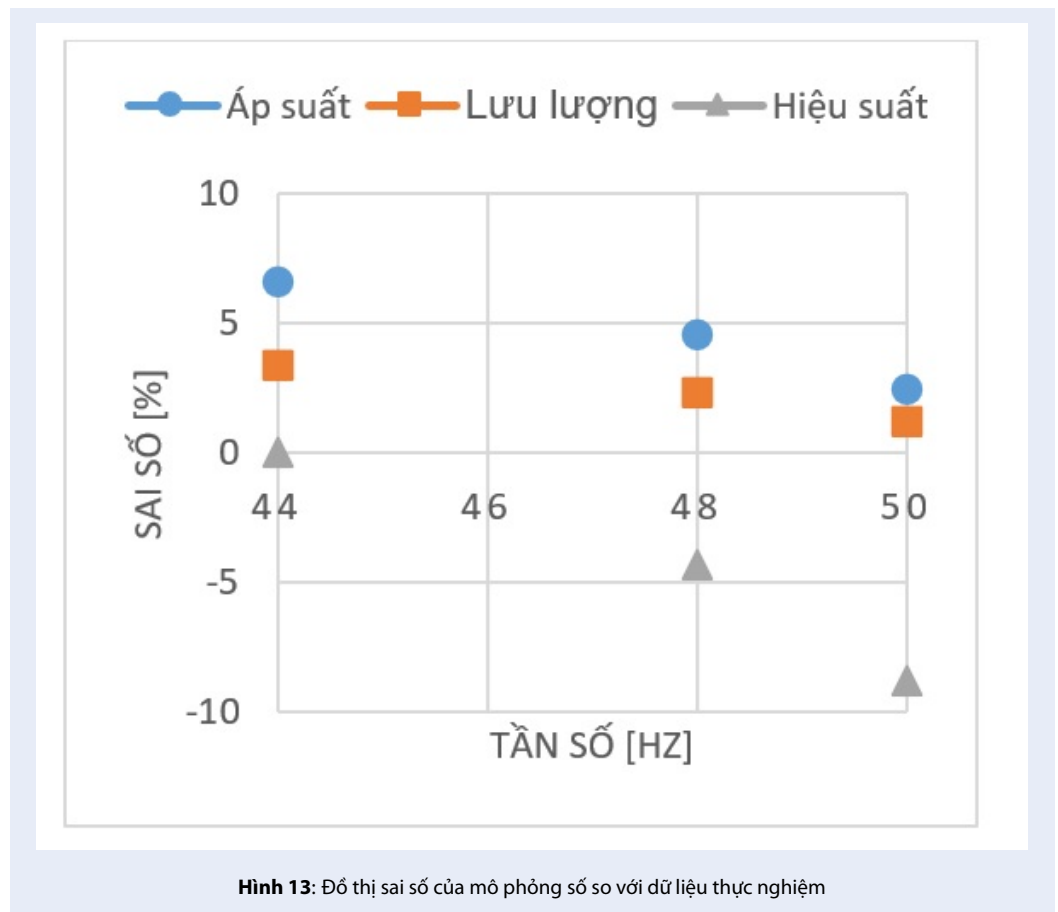
- RANS: Reynolds-Averaged Navier-Stokes
- CFD: Computational Fluid Dynamics
- SIMPLE: Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
- R: Radius – Bán kính vùng miệng hút của quạt

### XUNG ĐỘT LỢI ÍCH

Nhóm tác giả tuyên bố không có bất kỳ xung đột lợi ích nào.

### ĐÓNG GÓP CỦA TÁC GIẢ

Ngô Khánh Hiếu: chuẩn hóa kết quả mô phỏng thông qua triển khai hợp đồng đánh giá thực nghiệm đặc tính dòng vào của quạt ly tâm 5,5 kW của công ty



Hình 13: Đồ thị sai số của mô phỏng số so với dữ liệu thực nghiệm

Đồng Tâm. Chuẩn hóa hình học của bánh công tác, vỏ quạt trong mô phỏng số.

Lê Văn Long: Xây dựng mô hình mô phỏng đặc tính cho quạt ly tâm, chia lưới miền tính toán, thiết lập giải thuật mô phỏng.

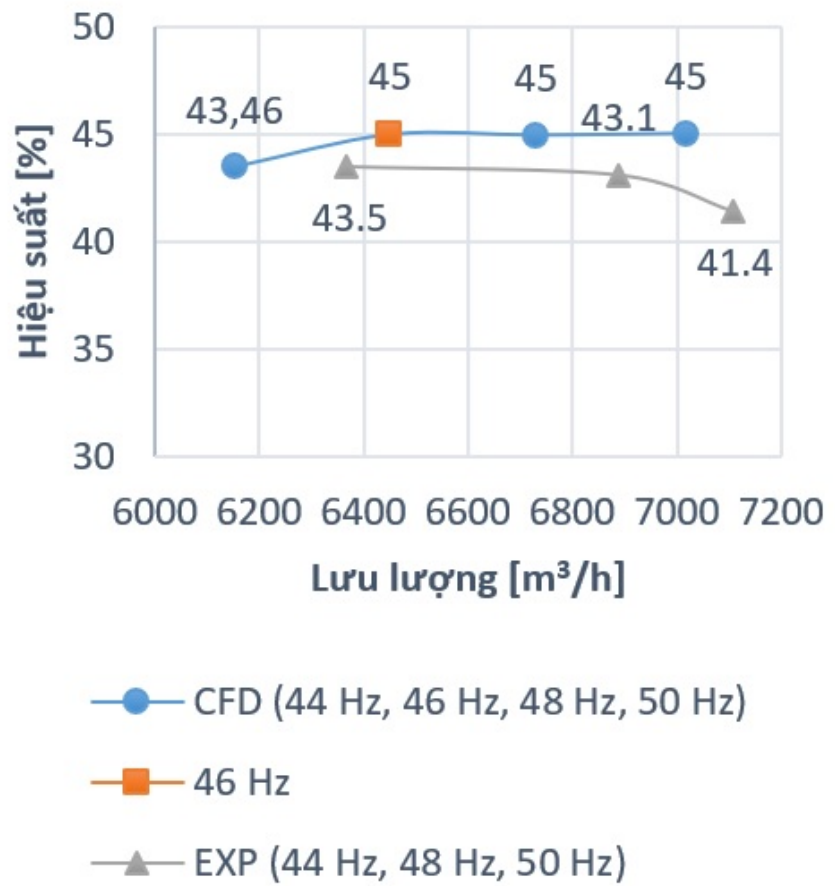
Lê Đình Anh Huy: Đưa ra cơ sở lý thuyết của bài toán mô phỏng, phân tích kết quả và chỉnh sửa bài viết theo định dạng của tạp chí.

### LỜI CẢM ƠN

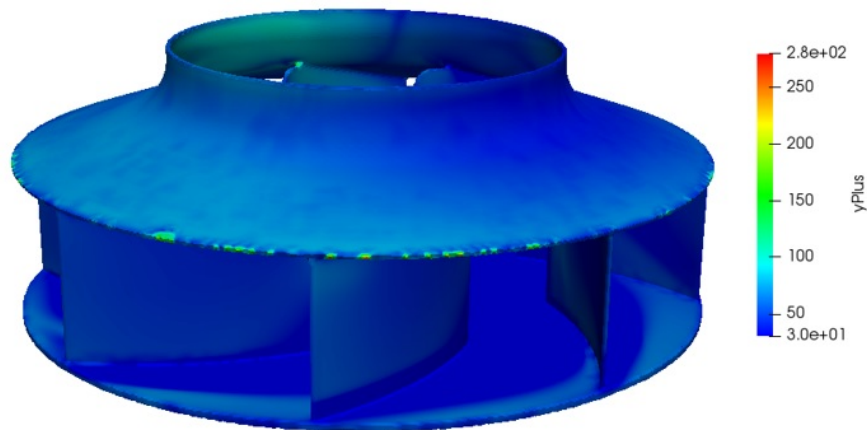
Nghiên cứu này được tài trợ bởi ĐHQG-HCM trong khuôn khổ đề tài mã số C2019-20-12. Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ thời gian, phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

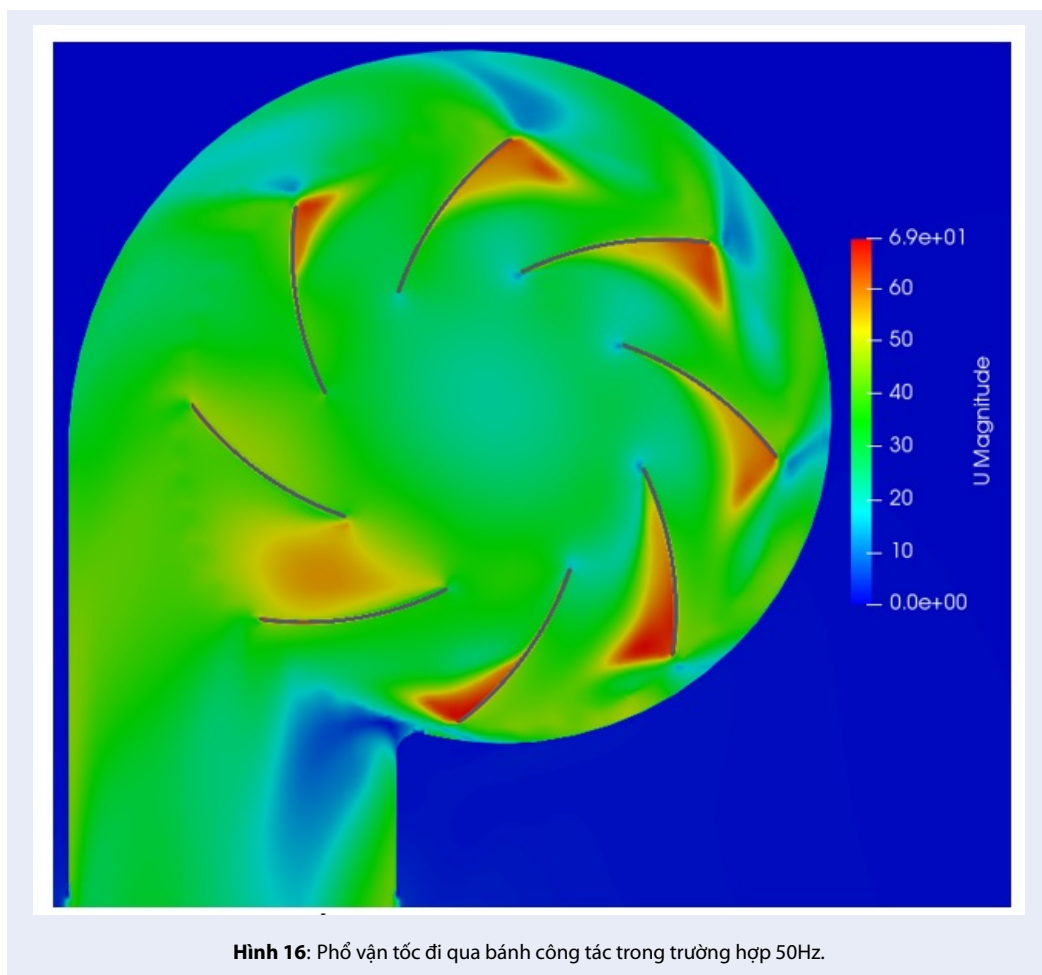
- Shah SR, Jain SV, Patel RN, Lakhera VJ. CFD for centrifugal pump: a review of state-of-the-art. *Procedia Engineering*. 2013;51:715–720. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.102>.
- Huang S, Wei Y, Guo C, Kang W. Numerical Simulation and Performance Prediction of Centrifugal Pump's Full Flow Field Based on OpenFOAM. *Processes*. 2019;7:605. Available from: <https://doi.org/10.3390/pr7090605>.
- Narayan PJ. CFD Analysis of Centrifugal Pump: A Review. *Journal of Engineering Research and Applications*. 2014;4:175–178.
- Mohammad AH, Shivprakash BB. Numerical Flow Simulation of Centrifugal Pump in ANSYS and OpenFOAM. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 2014;(3).
- Jafarzadeh B, Hajari A, Alishahi MM, Akbari MH. The flow simulation of a low-specific-speed high-speed centrifugal pump. *Applied Mathematical Modelling*. 2011;35:242–249. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.05.021>.
- Srinivasan KM. *Rotodynamic Pumps*, New Delhi,;.
- Tống NT. *Cơ học lưu chất*. 1991;.
- Mehdipour R. *Simulating propeller and Propeller-Hull Interaction in OpenFOAM*. Stockholm, Sweden. 2013;.
- Klasson OK. *A Validation, Comparison and Automation of Different Computational Tools for Propeller Open Water Predictions*. Göteborg, Sweden. 2011;.
- Wilcox DC. Formulation of the  $k-\omega$  Turbulence Model Revisited. *AIAA Journal*. 2008;p. 2823–2838. Available from: <https://doi.org/10.2514/1.36541>.
- ANSYS. *Introduction to ANSYS FLUENT, Lecture 6: Turbulence Modeling*. 2010;.
- Greenshields CJ. *OpenFOAM User Guide version 5.0*. OpenFOAM Foundation. 2017;.
- Schlichting H. *Boundary-Layer Theory*, 7th ed. McGraw Hill, New York, USA. 1979;p. 638.
- Versteeg HK, Malalasekera W. *An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education. 2007;.
- Fangqing L. *A Thorough Description Of How Wall Functions Are Implemented In OpenFOAM*. Master's thesis, Chalmers university of technology. 2017;.



Hình 14: Hiệu suất ở các dãy tần số khác nhau trong kết quả mô phỏng số (CFD) và thực nghiệm (EXP)



Hình 15: Phổ phân bố Y + trên bánh công tác tại tần số 50 Hz.



16. Long LV, Hieu NK. Propeller simulation in open-water condition with snappyhexmesh/opnefoam mesh generator," International

Conference of Fluid Machinery and Automation Systems - ICFMAS 2018. 2018;.

# Numerical simulation of an industrial centrifugal fan 5,5 kW with OpenFOAM

Ngo Khanh Hieu\*, Le Van Long\*, Le Dinh Anh Huy



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

## ABSTRACT

Centrifugal fan is a mechanical device working on the principle of centrifugal pump. When working, propeller sucks air along the axis, the pressure at the fan center will be small. The air will move from high pressure region to where the pressure is low. In other words, the air will receive additional centrifugal forces. The appearance of centrifugal fan has brought us many benefits such as basement ventilation systems or where ventilation fans enable to be directly established. Hence, the study of the performance characteristics of centrifugal fan is currently a matter concern, from which the improvement of performance can be applied to the fan. In this paper, a model simulating the performance characteristics of centrifugal fan was done on snappyHexMesh utility with mainly hexahedron grids. Therefore, the results of the performance characteristics of centrifugal fan use  $k - \omega$  SST is compared with experimental data. The results obtained from automatic meshing snappyHexmesh utility and the SimpleFoam solver of open source OpenFOAM software provide the reliable data in the design and calculation of centrifugal fan. On this basis, the cost of improving the performance of centrifugal fan can be reduced considerably by numerical simulation.

**Key words:**  $k - \omega$  SST, OpenFOAM, centrifugal fan, SimpleFoam, snappyHexMesh

VNU-HCM Key Laboratory for Internal Combustion Engine

## Correspondence

**Ngo Khanh Hieu**, VNU-HCM Key Laboratory for Internal Combustion Engine

Email: ngokhanhhieu@hcmut.edu.vn

## Correspondence

**Le Van Long**, VNU-HCM Key Laboratory for Internal Combustion Engine

Email: longle3001@gmail.com

## History

- Received: 24-3-2020
- Accepted: 12-12-2020
- Published: 31-12-2020

DOI : 10.32508/stdjet.v3i4.695



## Copyright

© VNU-HCM Press. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



**Cite this article :** Hieu N K, Long L V, Huy L D A. Numerical simulation of an industrial centrifugal fan 5,5 kW with OpenFOAM. *Sci. Tech. Dev. J. – Engineering and Technology*; 3(4):508-522.