Quy trình phân tích tự động đặc tính khí động của turbine gió trục đứng

- **Vũ Ngọc Ánh**
- **Huỳnh Nguyễn Minh Tùng**

Khoa Kỹ Thuật Giao Thông, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc Gia Thành Phố Hồ Chí Minh

(Bài nhận ngày 13 tháng 7 năm 2015, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 16 tháng 10 năm 2015)

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày quy trình phân tích hiệu suất của turbine gió trục đứng (VAWT) một cách tự động. Bài báo sẽ nêu chi tiết quy trình bao gồm việc thiết kế hình học cho biên dạng cánh sử dụng phương pháp CST, quá trình chia lưới lai kết hợp giữa lưới có cấu trúc và không có cấu trúc, quá trình tính toán CFD và quá trình xử lý kết quả để cho ra được giá trị hiệu suất của VAWT. Các quá trình này được thiết kế thành các module riêng biệt. Phương pháp CFD sử dụng trong bài báo là phương pháp RANS 2D sử dụng mô hình rối Realizable $k-\varepsilon$. Quá trình chia lưới sẽ được thực hiện trên phần mềm GAMBIT, quá trình tính toán CFD được thực hiện trên phần mềm thương mại ANSYS FLUENT, các quá trình này được điều khiển bởi phần mềm tính toán MATLAB. Các công thức được sử dụng để tính toán hệ số công suất cũng sẽ được giới thiệu trong bài báo này.

Từ khóa: *turbine gió trục đứng, phân tích tự động, CFD, chia lưới, hiệu suất, GAMBIT, FLUENT*

1. GIỚI THIỆU

Khi mà các nguồn năng lượng hóa thạch đang dần trở nên cạn kiệt, việc nghiên cứu và phát triển các nguồn năng lượng thay thế đang trở thành một vấn đề cấp thiết. Trong đó, năng lượng gió là một nguồn năng lượng rất có tiềm năng. Để chuyển từ năng lượng gió thành điện năng, người ta sử dụng các turbine gió để chuyển từ năng lượng gió thành động năng, và từ đó tạo ra điện năng nhờ vào máy phát. Turbine gió được phân loại dựa theo việc hướng gió thổi song song hay vuông góc với trục quay của turbine gió. Turbine gió được cấu hình để hoạt động trong trường hợp gió thổi song song được gọi là turbine gió trục ngang (HAWT). Đây là loại turbine gió phổ biến nhất. Turbine gió được cấu hình để hoạt động với hướng gió thổi vuông góc với trục quay được gọi là turbine gió trục đứng (VAWT). Đây là turbine gió có tiềm năng phát triển vì những lý do sau đây: (1) ít ồn hơn turbine gió trục ngang, (2) có thể hoạt động với gió từ mọi hướng, (3) có thể xây dựng những VAWT sử dụng cho nhu cầu cá nhân. Turbine gió trục đứng bản thân nó lại được chia thành hai loại: turbine gió loại Darrieus và turbine gió loại Savonius. Turbine gió loại Darrieus là turbine gió quay quanh trục nhờ lực nâng mà gió tạo lên cánh quạt. Turbine gió loại Savonius thì hoạt động nhờ vào lực cản. Trong bài nghiên cứu này sẽ tập trung vào turbine gió loại Darrieus.

Có nhiều phương pháp để xách định hiệu suất của một turbine gió VAWT. Trong đó, thực

nghiệm là một phương pháp khá phổ biến. Nhiều nghiên cứu thực nghiệm về đặc tính khí động của turbine gió đã được thực hiện. Tuy vậy, phương pháp thực nghiệm có một nhược điểm là tốn chi phí và chỉ có thể xác định đặc tính của một số lượng hạn chế turbine. Cùng với sự phát triển của máy tính, phương pháp CFD trở thành một công cụ đắc lực để tính toán đặc tính khí động của turbine gió nói chung và VAWT nói riêng. Các kết quả nghiên cứu cho thấy phương pháp CFD cho kết quả phù hợp rất tốt với thực nghiệm. Bài báo này sẽ đưa ra quy trình phân tích đặc tính khí động của turbine gió một cách tự động.

2. PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ CÁNH [1]

Công thức tính thành phần vận tốc tiếp tuyến Vc và thành phần vận tốc vuông góc V_n:

$$\begin{aligned} V_c &= R\omega + V_a \cos\theta \\ V_n &= V_a \sin\theta \end{aligned} \quad (1)$$

Trong đó: V_a là vận tốc dòng tại điểm đang xét, ω là vận tốc góc của rotor, R là bán kính của turbine gió và θ là góc phương vị của lá cánh đang xét.

Khi turbine gió quay, góc phương vị của mỗi lá cánh sẽ thay đổi và cùng với đó là sự thay đổi của vận tốc tương đối của dòng *W* và góc tấn α. Từ hình 1, ta có công thức xác định góc tấn :

$$\begin{aligned} \alpha &= \tan^{-1}\left(V_n / V_c\right) \\ &= \tan^{-1}\left(\sin\theta / \left(R\omega / V_a + \cos\theta\right)\right) \end{aligned} \quad (2)$$

Với V_∞ là vận tốc tự do của dòng.

Công thức xác định vận tốc tương đối:

$$W = \sqrt{V_c^2 + V_n^2} \quad (3)$$

Diện tích quét là một mặt cắt mà nó sẽ bao quanh toàn bộ turbine khi ta cho nó chuyển động cùng với chuyển động của turbine. Diện tích quét của turbine gió trục đứng cánh thẳng sẽ là diện tích của hình chữ nhật và được tính:

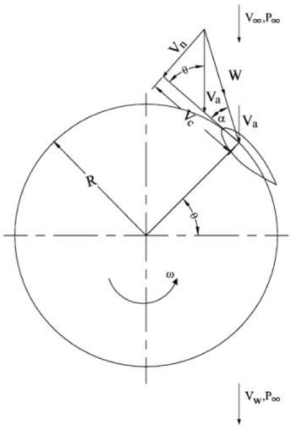
$$S = 2RH \quad (4)$$

Với *H* là chiều cao của turbine.

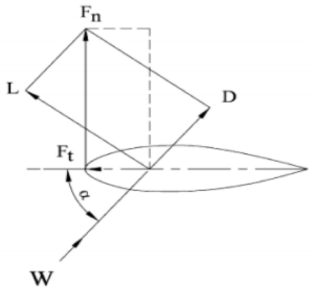
Hệ số dày đặc là một thông số hình học vô thứ nguyên đại diện cho tỷ lệ của diện tích cách trên diện tích quét

$$\sigma = Nc / d \quad (5)$$

Trong đó: *N* là số cánh quạt trong turbine gió trục đứng, *c* là chiều dày dây cung cánh và *d* là bán kính turbine.



Hình 1. Các thành phần vận tốc của dòng tại biên dạng cánh



Hình 2. Các thành phần lực trên biên dạng cánh

Tỷ số tốc độ đầu cánh được định nghĩa là tỷ số của vận tốc quay của cánh quạt và vận tốc dòng tự do (vận tốc thực của gió)

$$\lambda = \omega R / V_\infty \quad (6)$$

Phương của lực nâng và lực cản và các thành phần vận tốc vuông góc và tiếp tuyến của hai lực trên đã được thể hiện ở hình 2. Mối quan hệ giữa hệ số lực tiếp và hệ số lực pháp tuyến với hệ số lực nâng và hệ số lực cản:

$$C_t = C_l \sin\alpha - C_d \cos\alpha$$
$$C_n = C_l \cos\alpha + C_d \sin\alpha \quad (7)$$

Công thức để tính lực tiếp tuyến và lực vuông góc:

$$F_t = \frac{1}{2}\rho c H W^2 C_t$$
$$F_n = \frac{1}{2}\rho c H W^2 C_n \quad (8)$$

Trong đó: ρ là khối lượng riêng không khí và c độ dài dây cung cánh.

Lực tiếp tuyến trung bình của một cánh quạt trong một vòng quay được tính như sau:

$$F_{ta} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} F_t(\theta) d\theta \quad (9)$$

Momen quay tổng T của N cánh quạt:

$$T = NF_{ta}R \quad (10)$$

Hệ số momen quay:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho S V^2 R} \quad (11)$$

Công suất của gió được cho bởi công thức

$$P_w = \frac{1}{2}\rho S V_\infty^3 \quad (12)$$

Công suất mà turbine gió có thể lấy được:

$$P_T = T\omega \quad (13)$$

Hiệu suất của turbine gió là tỷ lệ của công suất mà turbine tạo ra trên công suất gió:

$$C_P = \frac{P_T}{P_W} = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho S V^3} \quad (14)$$

Như vậy, ta có mối quan hệ giữa hệ số công suất và hệ số momen quay

$$C_P = C_T \lambda \quad (15)$$

3. TÍNH TOÁN SỐ

3.1. Phương pháp biểu diễn biên dạng cánh: phương pháp biến đổi hàm lớp – hàm dạng (class function – shape function metod - CST)

Phương pháp CST dựa trên một hàm số giải tích để mô tả hình dạng biên dạng cánh. Hàm số này có hai thành phần là hàm lớp và hàm dạng. Sử dụng phương pháp CST được giới thiệu trong [2] [3], các tọa độ đường cong được cho bởi biểu thức sau:

$$y\left(\frac{x}{c}\right) = C_{N2}^{N1}\left(\frac{x}{c}\right).S\left(\frac{x}{c}\right) + \left(\frac{x}{c}\right)\frac{\Delta z}{c} \quad (16)$$

Với: $C_{N2}^{N1}\left(\frac{x}{c}\right) = \left(\frac{x}{c}\right)^{N1}\left(1-\frac{x}{c}\right)^{N2}$ hàm lớp

N1,*N2*: số mũ

$S\left(\frac{x}{c}\right) = \sum_{i=0}^{N}\left[A_i\left(\frac{x}{c}\right)\right]$: hàm dạng

x: giá trị vô thứ nguyên từ 0 tới 1

c: chiều dài của đường cong

Đa thức Bernstein sẽ được dùng làm hàm dạng

$$S\left(\frac{x}{c}\right) = K_i x^i (1-x)^{n-i} \quad (17)$$

Trong đó $K \equiv \binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}$:hệ số nhị thức

Với *n*: bậc của đa thức Bernstein

Trong bài nghiên cứu này, các biên dạng cánh được dùng có dạng mép trước cánh là hình tròn và mép sau cánh là hình nêm. Từ đó, các hệ số *N1* và *N2* của hàm lớp được lựa chọn làn lượt là 0.5 và 1. Bậc của đa thức Bernstein được chọn là *n*=4, giá trị này là đủ để mô tả các biên dạng cánh như đã được chỉ ra trong [2].

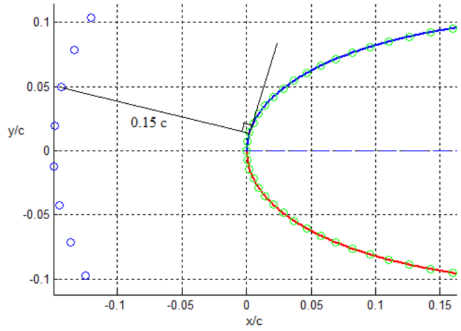
3.2. Chia lưới và điều kiện biên

Trong phân tích CFD, với các hình học đơn giản và hướng của dòng là không thay đổi, lưới có cấu trúc là phù hợp nhất vì nó cho độ chính xác cao và việc tạo lưới trong trường hợp này là đơn giản. Tuy nhiên, khi hình học trở nên phức

tạp và hướng của dòng là không dự đoán trước được, sử dụng lưới không có cấu trúc sẽ phù hợp hơn vì việc xây dựng lưới dễ dàng, nhược điểm là độ chính xác không cao.Vì vậy, bài nghiên cứu này sẽ sử dụng lưới lai, kết hợp giữa lưới có cấu trúc và lưới không có cấu trúc. Phương pháp này giúp cân bằng giữa độ chính xác, thời gian tính và việc dễ xây dựng lưới.

Lưới có cấu trúc sẽ được tạo cho mỗi biên dạng cánh. Nguyên tắc là tạo các điểm cơ sở của khung lưới có cấu trúc trên đường thẳng vuông góc với đường thẳng tạo từ mỗi hai điểm cơ sở liên tiếp nhau của biên dạng cánh. Khoảng cách từ điểm cơ sở của khung tới bề mặt biên dạng cánh là 15% của dây cung cánh. Tất cả các điểm cơ sở của khung sau đó sẽ được nối lại để tạo thành một khung hoàn chỉnh.

Để đảm bảo lưới có chất lượng tốt, lưới có cấu trúc của mỗi biên dạng cánh sẽ được chia ra bằng các đường elipse với các điểm để tạo các đường ellipse cho ở hình 4. Lưới hoàn chỉnh cho lưới có cấu trúc được minh họa ở hình 5. Các kích thước biên và điều kiện biên của phần lưới không có cấu trúc được cho ở hình 6 và 7.



Hình 3: Cách xác định các điểm cơ sở của khung lưới có cấu trúc

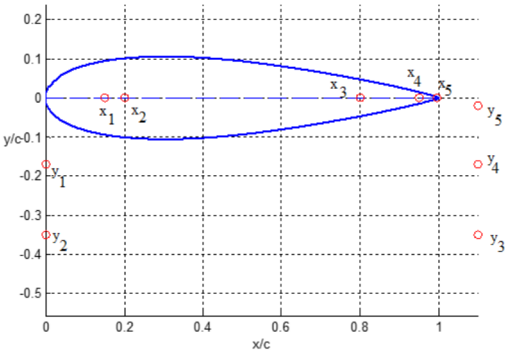
Bảng 1. Tọa độ các điểm để tạo các đường ellipse

Ellipse #	1	2	3	4	5
x_i	0.15c	0.2c	0.8c	0.95c	0.995c
y_i	0.17c	0.35c	0.35c	0.17c	0.02c

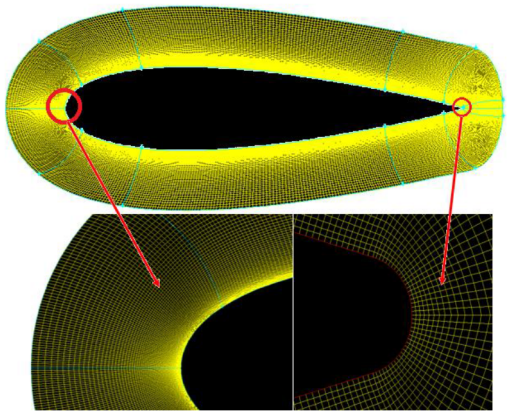
Biên dạng cánh NACA0021 được sử dụng để đánh giá chất lượng lưới với phương pháp chia lưới trên. Bảng 2 tổng hợp các đặc tính chất lượng của lưới. Các giá trị này đều trong mức cho phép để đạt được nghiệm hội tụ [4].

Bảng 2. Chất lượng lưới cho biên dạng cánh NACA 0021

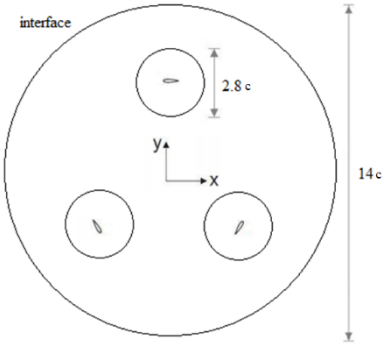
Thuộc tính chất lượng	Giá trị xấu nhất
Độ xiên (Skewness)	**0.38**
Tỷ lệ co (Aspect ratio)	14.72/1



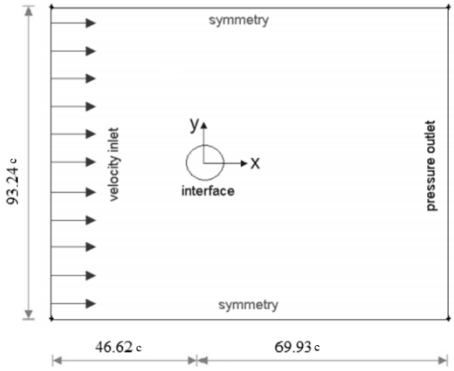
Hình 4. Các điểm cần thiết để tạo đường ellipse



Hình 5. Phần lưới có cấu trúc hoàn chỉnh của một biên dạng cánh



Hình 6. Kích thước và điều kiện biên của lưới không có cấu trúc – phần xoay



Hình 7. Kích thước và điều kiện biên của lưới không có cấu trúc – phần đứng yên

3.3. Phương pháp số

Mô hình rối được lựa chọn là Realizable k-ε . Mô hình phương trình đối lưu trong mô hình Realizable k-ε là:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k$$

Và

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+\rho C_1 S\varepsilon-\rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{\upsilon\varepsilon}}+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k}C_{3\varepsilon}G_b+S_\varepsilon$$

trong đó: $C_1=\max\left[0.43,\frac{n}{n+5}\right]$, $\mathrm{n}=\mathrm{S}\frac{k}{\varepsilon}$, $S=\sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$,

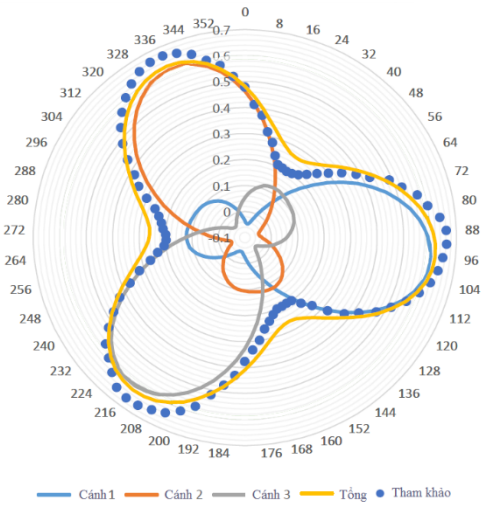
Với G_k đại diện cho sự tạo thành động năng rối do gradient vận tốc, G_b đại diện cho sự tạo thành động năng rối do lực nổi, Y_M: đại diện cho sự đóng góp của các dao động giãn nở bất thường trong các rối nén được tới tốc độ tiêu hao tổng thể ($Y_M=2\rho\varepsilon M_t^2$ với M_t là số Mach của rối), C_2=1.9 và $C_{1\varepsilon}$=1.44 là hằng số trong mô hình k-ε Realizable, $\sigma_k,\sigma_\varepsilon$: số rối Prandtl cho k và ε .

Tính toán mô phỏng được thực hiện sử dụng chương trình giải RANS thương mại của ANSYS FLUENT. Giải thuật SIMPLEC dược sử dụng để giải bài toán liên kết giữa thành phần vận tốc và áp suất trong phương trình động lượng. Lưu chất được giả thuyết là không nén được. Bước thời gian được chọn đủ nhỏ đảm bảo mô tả được hiện tượng chuyển tiếp và phải giới hạn số lần lặp để giảm chi phí tính toán. Trong bài nghiên cứu này, bước thời gian được chọn bằng thời gian để turbine quay một góc 4^o. Điều kiện hội tụ nhỏ hơn 10^{-5}.

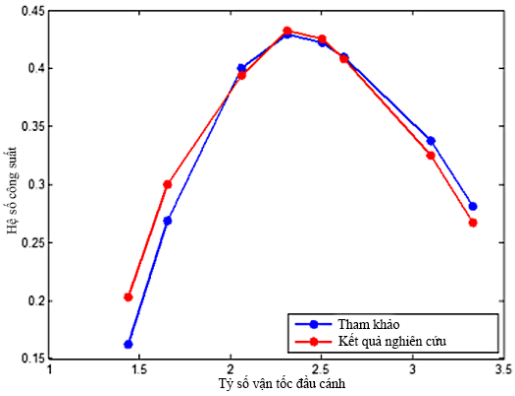
Khi phương trình Navier-Stokes được giải tới khi đạt trạng thái bán hội tụ (các giá trị như cũ sau mỗi chu kỳ quay), hệ số momen của mỗi cánh quát riêng biệt và cũng như hệ số momen của cả ba cánh quạt ở mỗi bước thời gian sẽ được ghi lại vào các tập tin dữ liệu. Các tập tin này sau đó sẽ được xử lý bằng phần mềm MATLAB để tính hệ số momen quay trung bình và hệ số công suất như đã trình bày ở phần 2.

3.4. Kiểm chứng kết quả

Hình 8 cho thấy phân bố của hệ số áp suất tại λ =2.33 trong hệ trục tọa độ cực và so sánh với kết quả của Castelli et al. [5] (cùng turine gió và cùng điều kiện kiểm tra). Tuy vẫn tồn tại vài khác biết trọng kết quả, tuy nhiên hệ số công suất trung bình của 2 mô hình là gần như bằng nhau với 0.432 của mô hình trong bài nghiên cứu và 0.429 trong kết quả của [5] (sai khác 0.7%).



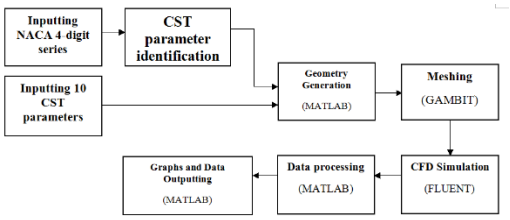
Hình 8. Hệ số công suất theo góc phương vị với λ =2.33 so sánh với [5]



Hình 9. Thay đổi của hệ số công suất trung bình theo tỷ số vận tốc đầu cánh

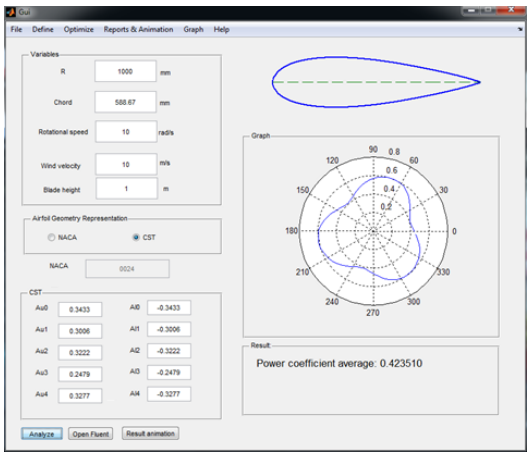
Để khảo xác sự chính xác của mô hình được đưa ra theo các giá trị tỷ số vận tốc đầu cánh khác nhau, 8 mô phỏng được thực hiện tại 8 giá trị tỷ số tốc độ đầu cánh khác nhau . Tính toán mô phỏng được thực hiện chạy song song trên máy tính có cấu hình: 4-processor, 2.83 GHz. Thời gian cho một trường hợp mô phỏng là 4 giờ. Hình 9 cho thấy sự thay đổi của hệ số công suất trung bình theo tỷ số tốc độ đầu cánh cánh và được so sánh với kết quả từ [5].

Quy trình tính toán mô phỏng và phân tích tự động được mô tả như hình 10.



Hình 10. Quy trình tính toán tự động.

Từ quy trình phân tích đã giới thiệu, một phần mềm đã được phát triển để phân tích hiệu suất của turbine gió trục đứng tự động. Từ giao diện, người sử dụng có thể nhập vào các thông số thiết kế. Phần mềm sẽ thực hiện quy trình tính toán và hiển thị kết quả. Giao diện phần mềm được minh họa ở hình 11.



Hình 11. Hiển thị kết quả phân tích biên dạng cánh cơ sở

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã hoàn thành giới thiệu và phát triển một hệ thống hoàn toàn tự động để phân tích hiệu suất của VAWT kết hợp với phương pháp biểu diễn hình học biên dạng cánh CST trong việc biểu diễn một số lượng lớn các loại biên dạng cánh, phương pháp tự động tạo lưới lai đảm bảo tính chính xác và sự hội tụ của các kết quả, sử dụng mô hình Realizable k-ε model đối với mô phỏng CFD. Bên cạnh đó,

nghiên cứu này cũng đã giới thiệu và phát triển một chương trình tính toán phân tích tự động hiệu suất của VAWT. Nghiên cứu này không xem xét ảnh hưởng của các trụ đến hiệu suất khí động học của các turbine gió cũng như ảnh hưởng của chiều cao của turbine gió. Trong tương lai, các ảnh hưởng của trụ và chiều cao (hiệu ứng 3D) sẽ được nghiên cứu thêm để tăng thêm độ chính xác của kết quả phân tích. Bên cạnh đó, với quy trình phân tích tự động đã giới thiệu trong bài báo, một quy trình tối ưu hóa hiệu suất khí động của turbine gió trục đứng có thể được dễ dàng thực hiện.

Lời cám ơn: *Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát Triển Khoa Học và Công Nghệ Quốc Gia Việt Nam (mã số đề tài: 107.04-2012.25)*

An automated analysis process for vertical axis wind turbine

- **Vu Ngoc Anh**
- **Huynh Nguyen Minh Tung**

Ho Chi Minh city University of Technology,VNU-HCM

ABSTRACT:

This paper presents an automated process for analyzing the performance of vertical axis wind turbine (VAWT). The details of this process will be demonstrated, which include the airfoil geometry representation using CST method, a hybrid meshing process combining structured grids and unstructured grids, CFD calculation process and processing data results to calculate the power coefficient of VAWT. These processes are designed as separate modules. CFD methods used in this research is RANS 2D using Realizable $k-\varepsilon$ turbulence model. Meshing process will be done on the GAMBIT software, the CFD calculations are done on commercial ANSYS FLUENT software and these processes are controlled by mathematical software MATLAB. The formulas used to calculate the power coefficient will be also introduced in this paper.

Keyword: *vertical axis wind turbine, design optimization, computational fluid dynamics.*

REFERENCES

[1]. A. M. Biadgo, A. Simonovic, D. Komarov, and S. Stupar, “Numerical and analytical investigation of vertical axis wind turbine,” FME Trans., vol. 41, no. 1, pp. 49–58, 2013.

[2]. B. M. Kulfan and J. E. Bussoletti, “Fundamental parametric geometry representations for aircraft component shapes,” in 11th AIAA/ISSMO multidisciplinary analysis and optimization conference, 2006, pp. 1–42.

[3]. N. A. Vu, J. W. Lee, and J. Il Shu, “Aerodynamic design optimization of helicopter rotor blades including airfoil shape for hover performance,” Chinese J. Aeronaut., vol. 26, no. 1, pp. 1–8, Feb. 2013.

[4]. ANSYS, Inc (2011), "FLUENT 14.0 User’s Guide".

[5]. M. Raciti Castelli, A. Englaro, and E. Benini, “The Darrieus wind turbine: Proposal for a new performance prediction model based on CFD,” Energy, vol. 36, no. 8, pp. 4919–4934, Aug. 2011.