

MÔ PHỎNG SỐ ĐẶC TÍNH ĐÓNG BĂNG TRÊN TIẾT DIỆN CÁNH TURBINE GIÓ S809

NUMERICAL SIMULATION OF ICE ACCRETION CHARACTERISTICS ON THE S809 WIND TURBINE AIRFOIL

ThS. Phạm Tuấn Nghĩa, TS. Dương Đề Tài*

Đại học Trần Đại Nghĩa (Trường Sĩ quan Kỹ thuật quân sự)

*Email liên hệ: duongdetai@gmail.com

TÓM TẮT

Đóng băng trên cánh turbine gió làm thay đổi hình dạng khí động và giảm hiệu suất vận hành. Vấn đề này đáng lo ngại ở các khu vực có khí hậu lạnh, bao gồm vùng núi cao và cao nguyên tại Việt Nam. Bài báo này mô phỏng quá trình tích lũy băng rime trên tiết diện cánh turbine gió NREL Phase VI sử dụng airfoil S809, tại vị trí $r/R = 0.47$. Phần mềm FENSAP-ICE với mô hình rối $k-\omega$ SST được sử dụng để giải trường dòng chảy, phân bố giọt nước và tích lũy băng theo phương pháp nhiều bước thời gian. Điều kiện môi trường gồm nồng độ hạt nước trong không khí $LWC = 0.5 \text{ g/m}^3$, đường kính trung bình hạt nước $MVD = 30 \mu\text{m}$, nhiệt độ tĩnh $t_\infty = -10^\circ\text{C}$, tốc độ gió $V_\infty = 7 \text{ m/s}$, tốc độ quay 72 rpm. Kết quả cho thấy hệ số hiệu suất thu nước β đạt giá trị cực đại 0.6447 tại vị trí gần mép trước cánh, thuộc bề mặt dưới của cánh. Băng rime tích lũy chủ yếu trên bề mặt dưới phía mép trước trong khoảng từ điểm đầu cánh $x = 0$ đến vị trí $x = 0.004$, với độ dày cực đại đạt 5.06 mm sau 720 giây.

Từ khóa: Đóng băng cánh turbine gió; Hiệu suất thu nước (hệ số bám); Rime ice; Airfoil S809.

ABSTRACT

Ice accretion on wind turbine blades alters the aerodynamic profile and degrades operational performance. This issue is of particular concern in cold-climate regions, including mountainous and highland areas in Vietnam. This study numerically investigates the rime ice accretion process on the NREL Phase VI wind turbine blade section employing the S809 airfoil at the radial position $r/R=0.47$. The commercial software FENSAP-ICE coupled with the $k-\omega$ SST turbulence model was employed to solve the airflow field, droplet impingement distribution, and ice accretion process using a multi-time-step approach. The atmospheric conditions considered in this study include a liquid water content of $LWC=0.5\text{g/m}^3$, a median volumetric droplet diameter of $MVD = 30\mu\text{m}$, a static temperature of $t_\infty = -10^\circ\text{C}$, and a free-stream velocity of $V_\infty = 7\text{m/s}$, and a rotational speed of 72 rpm. The numerical results indicate that the water collection efficiency coefficient β reaches a maximum value of 0.6447 near the leading edge on the lower surface of the airfoil. Rime ice predominantly accumulates on the lower leading-edge region, extending from the stagnation point ($x = 0$) to approximately $x = 0.004$, where the maximum ice thickness reaches 5.06 mm after 720 s of exposure.

Keywords: Wind turbine blade icing; Collection coefficient; Rime ice; Airfoil S809.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Turbine gió lắp đặt ở vùng núi cao chịu tác động của điều kiện icing (đóng băng) khi nhiệt độ không khí xuống thấp và có sự hiện diện của giọt nước siêu lạnh. Khi các giọt nước này va chạm lên bề mặt cánh, chúng đóng băng và làm thay đổi hình dạng khí động học của airfoil. Hậu quả là hệ số lực nâng giảm, lực cản tăng, và cân bằng của rotor bị ảnh hưởng. Các nghiên cứu cho thấy đóng băng có thể làm giảm công suất turbine từ 20% đến 50% trong các sự kiện icing kéo dài [1].

Tại Việt Nam, các dự án điện gió đang phát triển mạnh ở các tỉnh ven biển và cao nguyên. Khu vực Tây Nguyên và miền núi phía Bắc có nhiệt độ mùa đông xuống dưới 0°C , dễ dẫn tới đóng băng. Tuy nhiên, nghiên cứu về tác động của icing lên turbine gió trong bối cảnh Việt Nam còn hạn chế. Mô phỏng số là công cụ hiệu quả để phân tích quá trình đóng băng mà không cần thử nghiệm thực địa tốn kém. Phần mềm FENSAP-ICE cho phép tích hợp ba bước tính toán gồm trường dòng khí, trường hạt nước và tích lũy băng [2]. Airfoil S809 thuộc turbine NREL Phase VI là một trong những mẫu được kiểm chứng thực nghiệm đầy đủ nhất trong cộng đồng nghiên cứu turbine gió [3, 4].

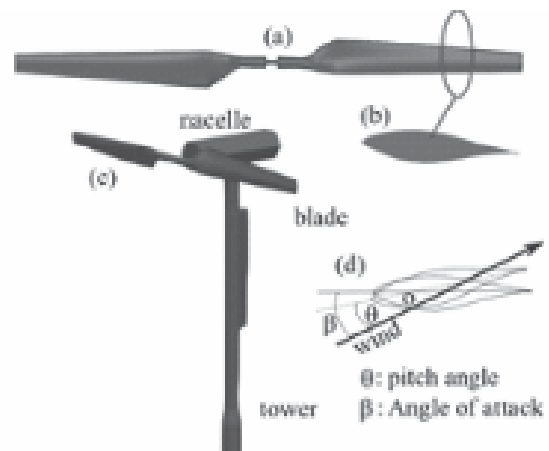
Bài báo này phân tích sự phân bố hệ số hiệu suất thu nước β và sự phát triển hình dạng băng rime theo thời gian trên tiết diện cánh S809 tại $r/R = 0.47$ của turbine NREL Phase VI. Kết quả cung cấp thông tin về đặc tính đóng băng tại tiết diện hoạt động quan trọng của cánh turbine.

2. MÔ HÌNH VÀ PHƯƠNG PHÁP SỐ

2.1. Turbine gió trục ngang và tiết diện phân tích

Turbine NREL Phase VI là turbine

nguyên cứu gồm hai cánh, công suất 19.8 kW, đường kính rotor 10.058 m. Toàn bộ cánh dùng airfoil S809 từ gốc đến đầu cánh (Hình 2.1). Airfoil S809 có độ dày 21% chiều dài dây cung, được thiết kế cho ứng dụng turbine gió trục ngang [5]. Turbine được thử nghiệm trong buồng thử gió của NASA Ames với kích thước $24.4 \text{ m} \times 36.6 \text{ m}$, tốc độ quay 72 rpm [3].



Hình 2.1. Mô hình Turbine NREL Phase VI và airfoil S809

Tiết diện phân tích được chọn tại $r/R = 0.47$, tương ứng $r = 2.364 \text{ m}$. Tại vị trí này, chiều dài dây cung $c = 0.627 \text{ m}$ và góc xoắn cánh $\theta = 9.0^{\circ}$. Với tốc độ gió $V_{\infty} = 7 \text{ m/s}$ và tốc độ quay $\omega = 7.54 \text{ rad/s}$, vận tốc tiếp tuyến tại tiết diện là $U_{\text{rot}} = \omega \times r = 17.82 \text{ m/s}$. Vận tốc tổng hợp tính theo phương trình sau:

$$V_{\text{rel}} = \sqrt{V_{\infty}^2 + U_{\text{rot}}^2} = 19.15 \text{ m/s}$$

Góc vào (inflow angle):

$$\phi = \arctan(V_{\infty}/U_{\text{rot}}) = 21.4^{\circ}$$

Góc tấn thực tế:

$$\alpha = \phi - (\theta_{\text{pitch}} - \theta_{\text{twist}}) = 9.4^{\circ}$$

2.2. Xây dựng lưới tính toán

Lưới có cấu trúc dạng C được xây dựng trong ICEM CFD. Nghiên cứu độc lập lưới được thực hiện với ba mức lưới có 21.000, 86.000 và 120.000 ô. Lưới 120.000 ô được chọn vì sự khác biệt về C_L so với lưới 86.000 ô nhỏ hơn 0.5%. Chiều dày ô đầu tiên tại bề mặt là 5×10^{-6} m, đảm bảo $y^+ < 1$ trên toàn bộ bề mặt cánh. Tỷ lệ tăng ô lưới từ bề mặt ra ngoài là 1.15 (Hình 2.2).



Hình 2.2. Lưới tính toán

2.3. Điều kiện biên và phương pháp mô phỏng

Bảng 1 liệt kê các thông số đầu vào cho mô phỏng. Trường dòng chảy được giải bằng phương trình Navier-Stokes trung bình Reynolds (RANS) với mô hình rối k- ω SST trong module FENSAP. Mô hình k- ω SST phù hợp cho dòng chảy có gradient áp suất nghịch và phân tách lớp biên, vốn xuất hiện tại vùng mép trước của airfoil ở góc tấn cao [6]. Phân bố giọt nước được tính trong module DROP3D bằng phương trình Euler cho pha phân tán. Hệ số hiệu suất thu nước beta tại mỗi điểm trên bề mặt được tính theo công thức:

$$\beta = \frac{\dot{m}_{imp}}{\dot{m}_{\infty}} = \frac{V_n \cdot LWC_n}{V_{\infty} \cdot LWC_{\infty}}$$

Trong đó, $\dot{m}_{imp}$ là thông lượng khối

lượng giọt nước (mass flux) tại vị trí hạt nước đập vào bề mặt; $\dot{m}_{\infty}$ là mass flux của dòng tự do.

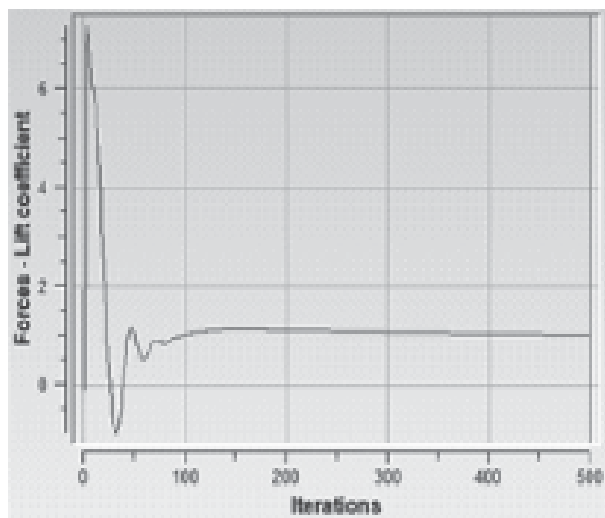
Tích lũy băng được tính trong module ICE3D theo phương trình cân bằng khối lượng và năng lượng tại bề mặt airfoil.

Bảng 1. Thông số đầu vào

Thông số	Giá trị
Vận tốc tổng hợp V_{rel}	19.15 m/s
Góc tấn α	9.4°
Nhiệt độ tĩnh t_{∞}	-10°C
Áp suất p_{∞}	101325 Pa
Hàm lượng nước LWC	0.5 g/m ³
Đường kính giọt trung bình MVD	30 μ m
Thời gian icing τ (s)	0, 360, 720

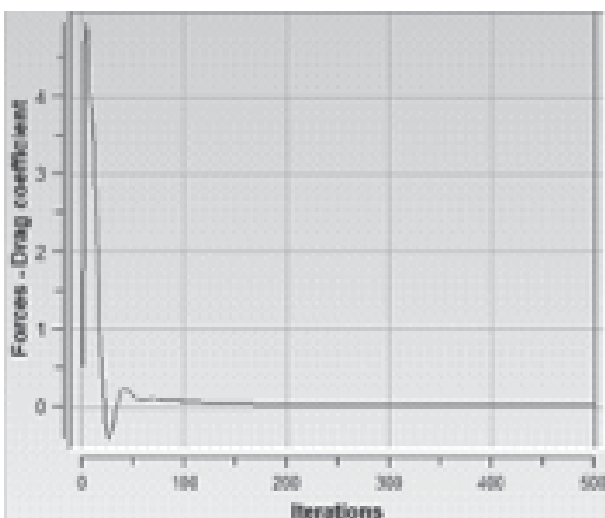
3. KIỂM CHỨNG MÔ HÌNH

Mô hình được kiểm chứng bằng cách so sánh hệ số lực nâng C_L với dữ liệu thực nghiệm của airfoil S809 sạch. Tại $\alpha = 9.4^\circ$, dữ liệu thực nghiệm từ OSU cho $C_L = 0.977$ và từ Delft cho $C_L = 0.987$ [5, 7]. Kết quả mô phỏng cho $C_L = 1.016$, sai lệch 3.0% so với dữ liệu Delft và 4.0% so với OSU (Hình 3.1). Sai lệch này nằm trong giới hạn chấp nhận của mô hình RANS. 



Hình 3.1. Hệ số lực nâng

Hệ số lực cản C_D từ mô phỏng (0.0345) cao hơn thực nghiệm (0.010-0.014) do mô hình k- ω SST giả định dòng chảy hoàn toàn rối (Hình 3.2). Airfoil S809 là airfoil có vùng dòng chảy laminar trên phần trước bề mặt ở góc tấn thấp [8]. Sự overprediction về C_D này là đặc điểm đã biết của mô hình RANS đầy rối khi áp dụng cho airfoil dòng tầng và không ảnh hưởng đến độ chính xác của phân tích đóng băng. Kết quả C_L phù hợp xác nhận trường dòng chảy đủ độ chính xác cho các bước mô phỏng tiếp theo.

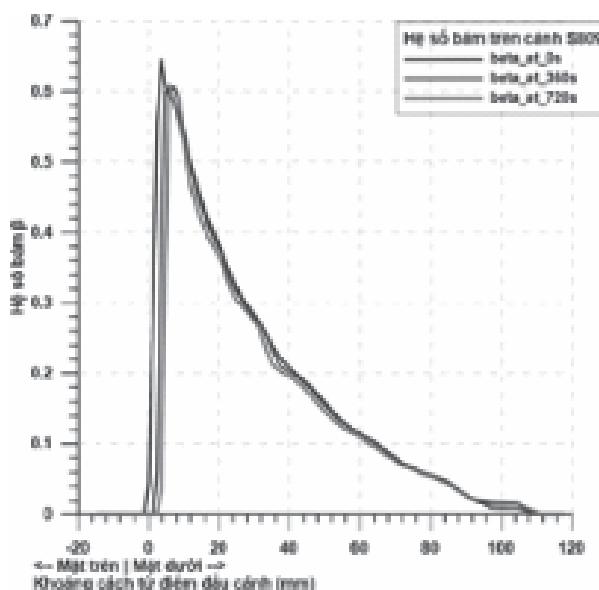


Hình 3.2. Hệ số lực cản

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Phân bố hệ số bám β

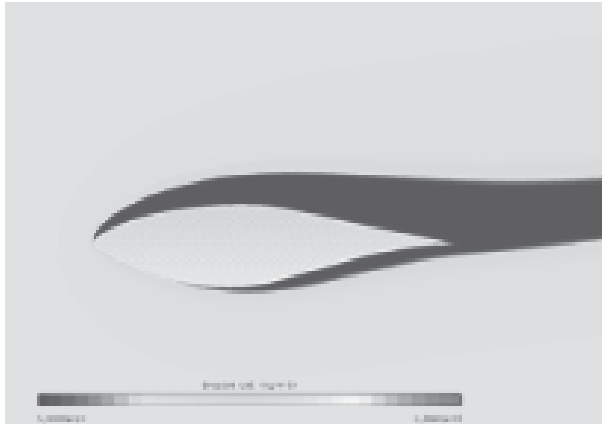
Hình 4.1 thể hiện phân bố hệ số β theo vị trí trên bề mặt airfoil. Tại $\tau = 0$ s (cánh sạch), β đạt giá trị cực đại $\beta = 0.645$ tại vị trí $x/c = 0.002$ trên bề mặt trên, ngay phía dưới điểm đầu cánh (Leading-edge LE). Vùng impingement bắt đầu từ $x/c = 0.000$ và kết thúc tại $x/c = 0.147$ trên bề mặt dưới. Chiều rộng vùng impingement theo cung là 0.104 m, tương đương 16.6% chiều dài dây cung. Sự phân bố hạt nước tập trung ở phần phía dưới cánh vì có góc tấn lớn (Hình 4.2). Khi băng tích lũy, $\beta_{\max}$ giảm dần từ 0.645 xuống 0.610 sau 360 giây, và giảm nhẹ xuống 0.605 ở bước 720 giây. Sự giảm $\beta_{\max}$ là hệ quả của việc hình dạng mép trước (phía dưới) bị tù hơn do băng, làm phân tán quỹ đạo giọt nước sang vùng rộng hơn.



Hình 4.1. Hệ số bám trên bề mặt

Ranh giới ngoài của vùng impingement phía bề mặt dưới duy trì ổn định tại $x/c = 0.147$ qua tất cả các bước thời gian. Điều này cho

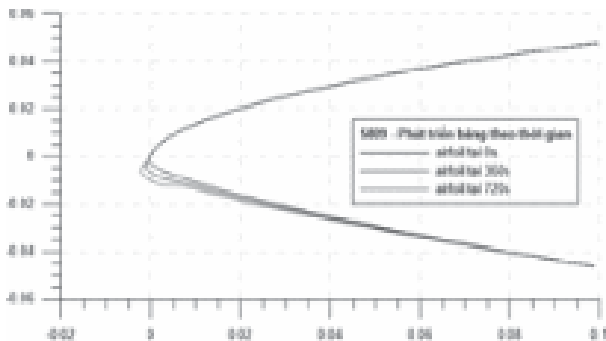
thấy rằng với điều kiện rime ice, sự thay đổi hình dạng mép trước không làm mở rộng đáng kể vùng va chạm giọt nước theo hướng mép sau.



Hình 4.2. Trường hạt nước LWC

4.2. Sự phát triển lớp băng

Hình 4.3 cho thấy hình dạng lớp băng tích lũy tại các mốc thời gian $\tau = 0,360$ và 720 giây (với $\tau = 0s$ tương ứng với cánh sạch). Băng rime tích lũy hoàn toàn ở bề mặt dưới phía mép trước, trong khoảng x/c từ 0 đến 0.117 . Vị trí băng ở bề mặt dưới phù hợp với giá trị góc tấn $\alpha = 9.4^\circ$. Ở góc tấn dương này, điểm dừng (stagnation point) dịch chuyển từ mép trước sang phía bề mặt dưới. Do đó, vùng có xác suất va chạm giọt nước cao nhất tập trung ở bề mặt dưới gần mép trước, phù hợp với phân bố β quan sát được ở Hình 4.2 và Hình 4.3.



Hình 4.3. Phát triển băng theo $\tau(s)$

Hình dạng băng rime phát triển dọc theo bề mặt dưới và không xuất hiện các đỉnh băng dạng sừng (horn ice) như trong trường hợp glaze ice. Đây là đặc điểm điển hình của rime ice khi toàn bộ nước va chạm đóng băng ngay, không có nước chảy ngược và vùng đóng băng không lan ra phía hạ lưu theo thời gian.

Bảng tổng kết các kết quả đóng băng và hệ số bám theo thời gian.

Bảng 2. Vùng đóng băng

τ (s)	$\beta_{\max}$	x/c tại $\beta_{\max}$	Giới hạn IL (x/c)	Vùng băng x/c	Dày max (mm)
0	0.645	0.002	$0.000 \div 0.147$	-	-
360	0.610	0.006	$0.000 \div 0.147$	$-0.002 \div 0.107$	2.49
720	0.605	0.002	$-0.003 \div 0.147$	$-0.004 \div 0.117$	5.06

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã mô phỏng thành công quá trình đóng băng rime trên tiết diện cánh S809 của turbine NREL Phase VI tại $r/R = 0.47$ bằng phần mềm FENSAP-ICE. Kết quả chính gồm: i) Hệ số hiệu suất thu nước β đạt cực đại 0.6447 tại vị trí $x/c \approx 0.002$ trên bề mặt dưới, ngay phía dưới mép trước. Vùng impingement kéo dài từ bề mặt dưới ($x/c = 0$) đến bề mặt dưới ($x/c = 0.147$). Khi băng tích lũy, $\beta_{\max}$ giảm nhẹ theo

thời gian do hình dạng mép trước thay đổi; ii) Băng rime tích lũy hoàn toàn ở bề mặt dưới gần mép trước, phù hợp với góc tấn $\alpha = 9.4^\circ$. Hình dạng băng phát triển theo thời gian, không có đỉnh băng dạng sừng. Độ dày cực đại đạt 5.06 mm sau 720 giây, với tốc độ tích lũy trung bình 0.42 mm/phút; iii) Mô hình C_L sai lệch khoảng 3-4% so với thực nghiệm, cho thấy độ tin cậy của trường dòng chảy. Sai lệch C_D do giả định dòng chảy đầy rỗng là đặc điểm đã biết của k- ω SST khi áp dụng cho airfoil dòng tầng S809.

Hướng nghiên cứu tiếp theo sẽ mở rộng sang điều kiện glaze ice, so sánh nhiều góc tấn và phân tích ảnh hưởng của lớp băng lên hệ số lực nâng và lực cản. ❖

Ngày nhận bài: **04/5/2026**

Ngày phản biện: **14/5/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Kraj, A.G., Bibeau, E.L. (2010), “Phases of icing on wind turbine blades characterized by ice accumulation”. *Renewable Energy*, 35(5), 966-972. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.09.013>
- [2]. Beaugendre, H., Morency, F., Habashi, W.G. (2003), “FENSAP-ICE's three-dimensional in-flight ice accretion module: ICE3D”. *Journal of Aircraft*, 40(2), 239-247. DOI: <https://doi.org/10.2514/2.3113>
- [3]. Hand, M.M., Simms, D.A., Fingersh, L.J., Jager, D.W., Cotrell, (2001), “*Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns*”. NREL/TP-500-29955. <https://docs.nrel.gov/docs/fy02osti/29955.pdf>
- [4]. Simms, D.A., Schreck, S., Hand, M., Fingersh, L.J. (2001), “*NREL Unsteady Aerodynamics Experiment in the NASA-Ames Wind Tunnel: A Comparison of Predictions to Measurements*”. NREL/TP-500-29494. <https://docs.nrel.gov/docs/fy01osti/29494.pdf>
- [5]. Somers, D.M. (1997), “*Design and Experimental Results for the S809 Airfoil*”. NREL/SR-440-6918. <https://docs.nrel.gov/docs/legosti/old/6918.pdf>
- [6]. Menter, F.R. (1994), “*Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications*”. *AIAA Journal*, 32(8), 1598-1605. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- [7]. Ramsay, R.R., Hoffman, M.J., Gregorek, G.M. (1995), “*Effects of Grit Roughness and Pitch Oscillations on the S809 Airfoil*”. NREL/TP-442-7817. <https://docs.nrel.gov/docs/legosti/old/7817.pdf>
- [8]. Wolfe, W.P., Ochs, S.S. (1997), “*CFD Calculations of S809 Aerodynamic Characteristics*”. AIAA Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV 97-0973. <https://www.osti.gov/biblio/420410>