

# PHÂN TÍCH HIỆU QUẢ TRUYỀN NĂNG LƯỢNG VÀ CƠ CHẾ VẬT LÝ GÂY MẤT ỔN ĐỊNH CỦA TUA BIN FRANCIS Ở CHẾ ĐỘ PHỤ TẢI THẤP

## ENERGY TRANSFER EFFICIENCY AND INSTABILITY MECHANISMS IN A FRANCIS TURBINE UNDER LOW-LOAD OPERATION

TRẦN CÔNG TRIỆU

Khoa Xây dựng Công trình thủy, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

Email liên hệ: [trieutc@huce.edu.vn](mailto:trieutc@huce.edu.vn)

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.985>

### Tóm tắt

Ở chế độ phụ tải thấp, tua bin Francis thường xuất hiện dòng hồi lưu tại cửa ra bánh công tác và các cấu trúc xoáy mất ổn định trong ống hút, gây suy giảm hiệu suất và gia tăng dao động thủy lực. Trong khi các nghiên cứu trước chủ yếu tập trung vào hình thái xoáy hoặc dao động áp suất, cơ chế suy giảm truyền năng lượng do lệch hướng không gian giữa véc tơ vận tốc và gradient áp suất vẫn chưa được làm rõ. Nghiên cứu này áp dụng nguyên lý phối hợp trường, trong đó góc phối hợp trường  $\theta$  được sử dụng làm chỉ tiêu đánh giá hiệu quả truyền năng lượng. Kết quả CFD cho thấy  $\theta$  tại cửa ra bánh công tác phân bố không đồng nhất và đóng vai trò khởi phát mất ổn định trong ống hút. Ở phụ tải thấp, khoảng 51% vùng có  $\theta > 90^\circ$  và vùng hồi lưu chiếm gần 21%, phản ánh sự suy giảm chuyển đổi động năng và áp năng. Ngược lại, tại điểm tính toán, các tỷ lệ này giảm đáng kể. Kết quả cho thấy mối liên hệ định lượng giữa lệch hướng vận tốc, gradient áp suất và cơ chế mất ổn định, cung cấp một chỉ báo hiệu quả cho đánh giá và tối ưu vận hành tua bin trong dải tải rộng.

**Từ khóa:** Tua bin nước, CFD, phối hợp trường, mất ổn định dòng chảy, truyền năng lượng.

### Abstract

Under low load operating conditions, Francis turbines commonly exhibit backflow at the runner outlet and unstable vortex structures in the draft tube, leading to efficiency degradation and increased hydraulic fluctuations. While previous studies have mainly focused on vortex morphology or pressure fluctuations, the mechanism of energy transfer deterioration caused by the spatial misalignment between the velocity vector and the pressure gradient remains insufficiently understood. In this study, the field synergy principle is employed, in which the field

synergy angle  $\theta$ , defined as the angle between the velocity vector and the pressure gradient, is adopted as an indicator of energy transfer efficiency. CFD results reveal that  $\theta$  at the runner outlet is highly non uniform and acts as a trigger for instability development in the draft tube. Under low load conditions, approximately 51% of the flow domain exhibits  $\theta$  greater than 90 degrees, and the backflow region accounts for nearly 21%, indicating a reduced conversion of kinetic energy into pressure energy. In contrast, at the best efficiency point, these proportions decrease significantly. The results quantitatively demonstrate the relationship between velocity and pressure gradient misalignment and flow instability, providing an effective indicator for assessing energy transfer degradation and supporting optimal turbine operation over a wide load range.

**Keywords:** Hydraulic turbine, CFD, Field synergy, Flow instability, Energy transfer.

### 1. Giới thiệu

Tua bin nước kiểu Francis là thiết bị then chốt trong hệ thống năng lượng sạch, việc vận hành ổn định và hiệu quả cao của nó có ý nghĩa đặc biệt quan trọng đối với an ninh năng lượng quốc gia và mục tiêu “net zero”. Cùng với xu hướng phát triển các tổ máy thủy điện theo hướng công suất lớn và phối hợp đa năng lượng để điều tiết phụ tải đỉnh. Các tổ máy thường xuyên phải vận hành trong điều kiện phụ tải trung bình và thấp, dẫn đến các vấn đề như gia tăng dòng hồi lưu ở cửa ra của bánh công tác, mất ổn định dòng chảy trong ống hút và khuếch đại dao động áp suất, từ đó đe dọa tuổi thọ thiết bị và an toàn của hệ thống điện [1-3].

Các nghiên cứu cho thấy, bản chất của những vấn đề này là sự mất phối hợp trong quá trình truyền năng lượng giữa trường dòng chảy ở cửa ra bánh công tác và ống hút. Trong vùng phụ tải thấp, sự mất cân bằng

giữa hoàn lưu ở cửa ra bánh công tác với dòng chảy và trường áp suất trong ống hút sẽ kích thích sự tăng cường của dòng thứ cấp ngược chiều, gây tổn thất động năng cục bộ và kích hoạt dòng hồi lưu. Do đó, tiếp tục dẫn đến dao động xoáy trong ống hút và dao động áp suất phi tuyến, hình thành phản ứng dây chuyền [4-8].

Các nghiên cứu hiện có đã làm sáng tỏ cơ chế hình thành và mất ổn định của xoáy trong ống hút, trong đó tập trung vào mô tả hình thái xoáy hoặc đặc tính dao động áp suất. Tuy nhiên các nghiên cứu vẫn chưa chú ý đầy đủ đến ảnh hưởng căn bản của tính không đồng đều không gian của hiệu quả truyền năng lượng đối với tính ổn định của hệ thống. Dòng chảy bên trong tua bin nước là dòng chảy rối ba chiều phức tạp, chịu ảnh hưởng tổng hợp của lực ly tâm, lực Coriolis, tương tác động-tĩnh và độ cong của máng dòng giữa hai lá cánh, khiến cho việc phân tích lý thuyết trở nên khó khăn.

Trong những năm gần đây, khái niệm sản sinh Entropy dựa trên định luật thứ hai của nhiệt động lực học đã được đưa vào để đánh giá tổn thất năng lượng không thuận nghịch bên trong bánh công tác, qua đó hỗ trợ phân tích phân bố năng lượng trong không gian [9-11]. Tương tự, xuất phát từ nghiên cứu truyền nhiệt, lý thuyết phối hợp trường (field synergy) có thể cung cấp một góc nhìn mới cho việc phân tích quá trình truyền năng lượng của tua bin nước trong điều kiện phụ tải thấp. Lý thuyết phối hợp trường cho rằng cường độ trao đổi tại bề mặt truyền nhiệt không chỉ phụ thuộc vào bản thân trường vận tốc và trường gradient nhiệt độ, mà còn phụ thuộc vào góc kẹp giữa chúng. Trong cùng điều kiện biên, vận tốc và gradient nhiệt độ càng phối hợp tốt thì hiệu quả truyền nhiệt càng cao [12]. Mức độ phối hợp trường tốt hơn giữa các trường gradient sẽ làm tăng cường độ truyền nhiệt.

Với máy thủy lực, quá trình trao đổi động lượng liên quan đến tổn thất năng lượng chịu ảnh hưởng mạnh mẽ bởi mức độ phối hợp giữa trường áp suất và trường vận tốc. Dựa trên cảm hứng từ lý thuyết phối hợp trường, bài báo này xây dựng một phương pháp phân tích cơ chế mất ổn định và hiệu quả truyền năng lượng của hệ thống bánh công tác - ống hút dựa trên góc phối hợp trường. Phương pháp này được sử dụng để nghiên cứu cơ chế ảnh hưởng của sự phân bố phối hợp giữa trường áp suất và trường vận tốc đến đặc tính thủy lực của tua bin nước thông qua góc kẹp giữa véc tơ vận tốc và véc tơ gradient áp suất.

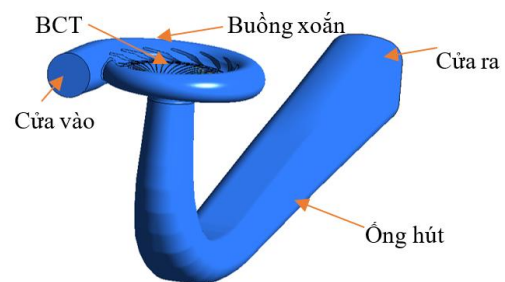
## 2. Mô hình thủy lực và phương pháp tính

### 2.1. Mô hình tính toán

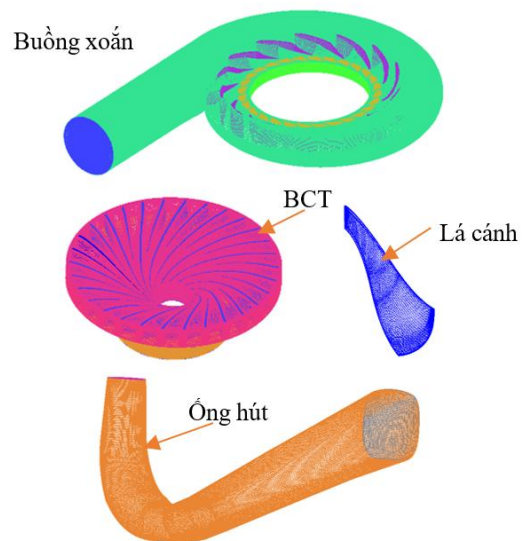
Tua bin nước Francis được lựa chọn làm đối tượng

nghiên cứu, mô hình hình học của nó được trình bày trong Hình 1. Các bộ phận chính của tua bin mô hình bao gồm ống hút, bánh công tác, cánh hướng dòng và buồng xoắn. Bánh công tác (BCT) của tua bin có 15 cánh dài và 15 cánh ngắn; đường kính của bánh công tác là 349mm; số lượng cánh của cánh hướng động là 28 và cánh hướng tĩnh là 14.

Hình 2 trình bày lưới tính toán có cấu trúc của miền dòng chảy được tạo bằng phần mềm thương mại ANSYS ICEM, với tổng số phần tử lưới là khoảng 20,73 triệu. Chỉ số hội tụ lưới (GCI-Grid Convergence Index) được sử dụng để đánh giá tính độc lập lưới, và sai số rời rạc thu được đều nhỏ hơn 0,5%, đáp ứng yêu cầu của các tính toán mô phỏng.



Hình 1. Mô hình 3D tua bin Francis



Hình 2. Chia lưới các phần dẫn dòng

Việc mô phỏng số được thực hiện bằng phần mềm ANSYS CFX. Giả thiết dòng chảy bên trong tua bin là không nén được và không có trao đổi nhiệt với môi trường bên ngoài. Mô hình nhiễu loạn SST  $k-\omega$  được lựa chọn để tiến hành tính toán mô phỏng số. Giá trị  $Y^+ < 40$  tại chế độ tính toán, phù hợp với yêu cầu của mô hình SST  $k-\omega$ . Lớp lưới đầu tiên được bố trí cách bề mặt cánh khoảng 0,07mm với hệ số Node incremental ratio 1,5x. Việc kiểm soát  $Y^+$  trong phạm

vi này bảo đảm độ tin cậy của mô hình rối trong mô phỏng dòng chảy ba chiều phức tạp. Điều kiện biên tại cửa vào được đặt là lưu lượng, điều kiện biên tại cửa ra được đặt là áp suất tĩnh.

Tất cả các bề mặt tường đều được giả thiết là tường trơn không trượt. Miền tính toán của bánh công tác được thiết lập là vùng quay, còn các bộ phận còn lại được thiết lập là vùng tĩnh. Việc trao đổi dữ liệu giữa các vùng quay và vùng tĩnh được thực hiện thông qua giao diện Transient rotor-stator. Tiêu chí hội tụ của tính toán mô phỏng số được xác định qua căn trung bình bình phương RMS là  $10^{-5}$ . Trước khi thực hiện mô phỏng không ổn định, steady-state đã được tính toán nhằm cung cấp trường dòng ban đầu hợp lý. Sau đó, bài toán được giải theo chế độ transient trong 10 vòng quay hoàn chỉnh của bánh công tác với bước thời gian  $\Delta t = 5 \times 10^{-4}$  s.

## 2.2. Kiểm định mô hình

Bảng 1 thể hiện các chế độ tính toán mô phỏng tua bin nước ở các mức tải khác nhau. Cột nước định mức của tua bin là 12m. Trong quá trình mô phỏng số, tốc độ quay đơn vị được giữ không đổi 335 vòng/phút. Kiểm định mô hình sử dụng dữ liệu thí nghiệm được cung cấp bởi phòng Thí nghiệm Thủy lực Trường Đại học Công nghệ Na Uy [13].

**Bảng 1. Các chế độ tải trong mô phỏng tua bin Francis**

Chế độ	Độ mở cánh hướng (độ)	Tỷ lưu lượng ( $Q/Q_u$ )
Tải thấp	3,91	0,36
Tải trung bình	6,72	0,7
Tải tính toán	9,81	1,0
Tải lớn	12,44	1,21

Thông qua việc so sánh dữ liệu hiệu suất thí nghiệm và kết quả mô phỏng CFD của tua bin tại các điểm làm việc khác nhau trong Hình 3, có thể nhận thấy rằng hai tập dữ liệu có mức độ phù hợp tổng thể tốt, với sai số tương đối duy trì dưới 4,1%. Kết quả mô phỏng số nhìn chung phù hợp tốt với kết quả thí nghiệm tại các vùng làm việc.

Trong điều kiện tải nhỏ, việc mô phỏng chính xác các dạng dòng chảy phức tạp như dòng xoáy và dòng thứ cấp vẫn còn gặp nhiều khó khăn, đây là nguyên nhân chính dẫn đến sự sai lệch giữa hiệu suất mô phỏng và giá trị thí nghiệm. Tuy nhiên, mức sai khác này nằm trong giới hạn cho phép. Do đó, kết quả mô phỏng được đánh giá là đáng tin cậy.

## 2.3. Phương pháp góc phối hợp trường

Dựa trên phương trình động lượng, khi lấy tích vô hướng giữa gradient áp suất và véc tơ vận tốc sẽ thu được phương trình năng lượng cơ học, trong đó  $u \cdot (-\nabla p)$  biểu thị độ lớn công suất (mật độ công theo thể tích) do gradient áp suất tác dụng lên phần tử chất lỏng. Do đó, đại lượng  $N_p = u \cdot (-\nabla p)$  có thể được dùng để đặc trưng mức độ trao đổi năng lượng cơ học thông qua trường áp suất, và được biểu diễn dưới dạng:

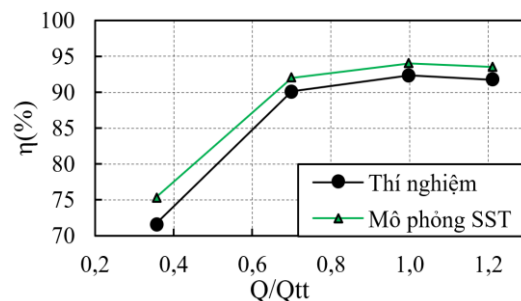
$$N_p = u \cdot (-\nabla p) = |u| \cdot |\nabla p| \cos \theta \quad (1)$$

Để mô tả tính phối hợp giữa trường vận tốc và trường áp suất, tương tự với hiện tượng phối hợp trong truyền nhiệt [14], góc phối hợp giữa trường vận tốc và trường áp suất trong quá trình truyền động lượng có thể được biểu diễn như sau [15]:

$$\theta = \arccos \frac{u \cdot (-\nabla p)}{|u| \cdot |\nabla p|} \quad (2)$$

Trong đó,  $u$  là véc tơ vận tốc dòng chảy,  $p$  là áp suất,  $\theta$  (Góc theta) là góc phối hợp trường.

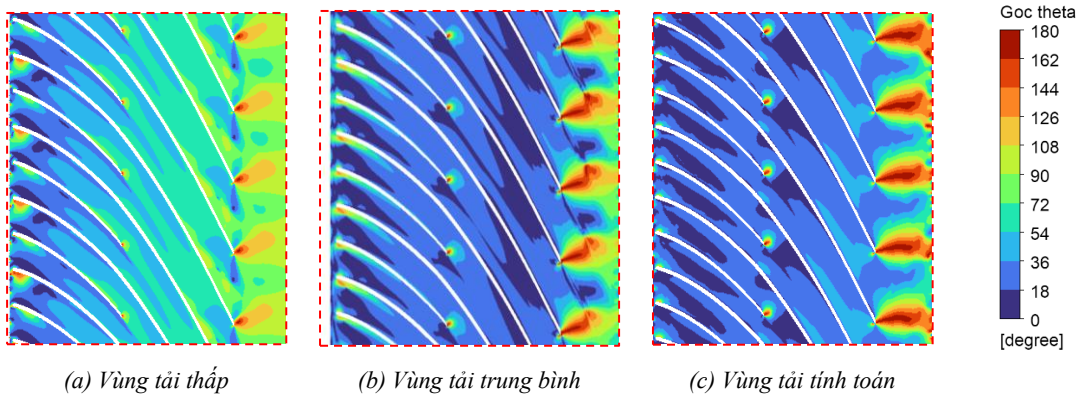
Từ biểu thức trên có thể thấy rằng, khi  $\theta < 90^\circ$ , thế năng áp suất được chuyển hóa thành động năng, năng lượng của dòng chảy được truyền theo chiều thuận. Giá trị  $\theta$  càng nhỏ thì mức độ hiệp đồng giữa trường vận tốc và trường áp suất càng cao, tổn thất công suất càng nhỏ, qua đó đạt được mục tiêu tiết kiệm năng lượng. Khi  $\theta = 90^\circ$ , quá trình truyền năng lượng dừng lại, véc tơ vận tốc dòng chảy vuông góc với gradient áp suất và không xảy ra trao đổi năng lượng. Khi  $\theta > 90^\circ$ , gradient áp suất và hướng vận tốc cùng chiều, động năng bị chuyển hóa thành thế năng áp suất, năng lượng truyền theo chiều ngược, lực cản dòng chảy tăng lên, thường là dấu hiệu sự xuất hiện của hiện tượng tách dòng.



**Hình 3. Hiệu suất tua bin**

## 3. Kết quả và thảo luận

Như thể hiện trong Hình 4, phân bố góc phối hợp trường  $\theta$  tại cửa ra bánh công tác có tính không đồng



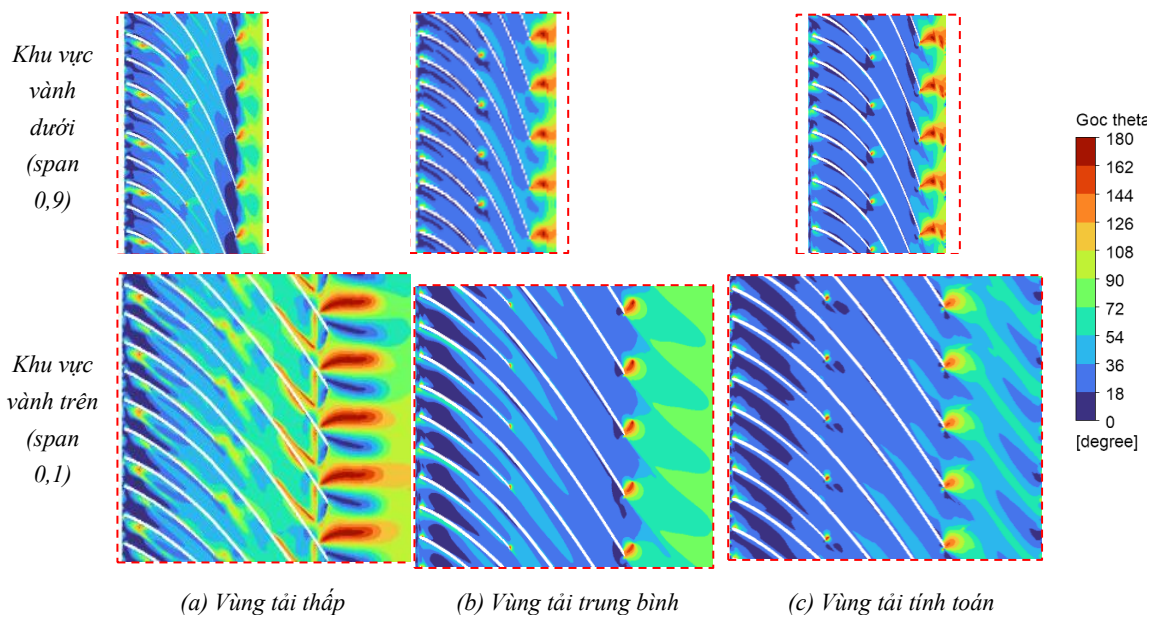
Hình 4. Phân bố góc phối hợp trường  $\theta$  (góc theta) tại các chế độ tải khác nhau

nhất theo phương chu vi và tuần hoàn theo số cánh, phản ánh trực tiếp sự tương tác định hướng giữa véc tơ vận tốc và gradient áp suất trong dòng chảy sau cánh. Trường  $\theta$  hình thành các dải giá trị thấp và cao xen kẽ, đóng vai trò như chỉ thị động lực học cho mức độ tương thích năng lượng giữa trường động lượng và trường áp suất tại miền cửa ra. Các vùng  $\theta$  thấp ( $0^\circ \div 60^\circ$ ) xuất hiện chủ yếu dọc theo mặt làm việc của cánh, nơi dòng chảy được tổ chức tốt, gradient áp suất có xu hướng đồng hướng với vận tốc thúc đẩy quá trình chuyển hóa hiệu quả năng lượng áp suất thành động năng.

Ngược lại, các dải  $\theta$  cao ( $>90^\circ$ ) tập trung tại miền “wake” và các vùng xoáy vỡ, nơi vận tốc cục bộ trong lõi xoáy có thành phần ngang lớn và lệch đáng kể so với gradient áp suất. Sự sai lệch định hướng này làm suy giảm gia tốc dòng theo phương chính, tăng cường khuếch tán động năng và tổn thất do trộn rối. Do vậy  $\theta$

cao trở thành dấu hiệu đặc trưng của miền tán xạ năng lượng. Ở vùng tải nhỏ, các dải  $\theta$  cao mở rộng và phân bố đều hơn do ảnh hưởng của khuếch tán xoáy và bất ổn định dòng chảy, trong khi tại tải trung bình và điều kiện tối ưu (tính toán), chúng bị nén lại và tập trung cục bộ hơn. Điều này khẳng định rằng phân bố  $\theta$  tại cửa ra bánh công tác là một tham số nhạy, cho phép định lượng sự biến đổi cấu trúc “wake” và cơ chế tổn thất năng lượng tương ứng theo chế độ vận hành.

Như thể hiện trong Hình 5, phân bố góc phối hợp trường  $\theta$  trên bánh công tác biến thiên rõ rệt theo chế độ tải và theo vị trí vành trên và vành dưới BCT. Tại vành dưới ( $span=0,9$ ), trường  $\theta$  duy trì xu thế ổn định giữa các điều kiện làm việc, trong đó phần lớn miền dòng chủ đạo nằm trong khoảng  $\theta \approx 0^\circ \div 72^\circ$ , chỉ xuất hiện các dải  $\theta$  cao cục bộ gần vùng biên và mép ra. Ngược lại, tại vành trên ( $span=0,1$ ), chế độ tải thấp cho thấy sự gia tăng đáng kể của các vùng  $\theta > 90^\circ$  phân bố



Hình 5. Phân bố góc phối hợp trường khu vực vành trên và vành dưới BCT

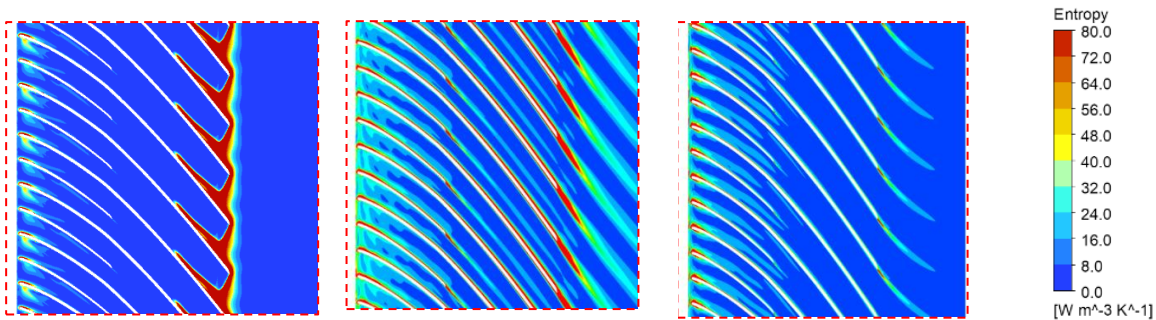
theo dạng chu kỳ quanh chu vi, đồng thời một phần cấu trúc  $\theta$  chuyển sang dạng “V”, phản ánh sự sai lệch mạnh giữa hướng vận tốc và hướng gradient áp suất. Ở tải trung gian, tính chu kỳ của  $\theta$  tiếp tục bị phá vỡ, các đường dòng biến dạng rõ và hình thành các vùng  $\theta$  cao cục bộ trong một số máng dòng. Điều này cho thấy sự tăng cường tương tác vệt sau và phát triển mất ổn định cục bộ gần cửa ra. Khi đạt chế độ tính toán, trường  $\theta$  tại vành trên trở nên đồng đều hơn, phần lớn miền dòng quay về mức  $0^0 \div 72^0$  và cấu trúc chu kỳ được khôi phục, cho thấy điều kiện thoát dòng thuận lợi hơn.

Kết quả sản sinh Entropy tại vành trên trong Hình 6 xác nhận mối liên hệ chặt chẽ giữa mất phối hợp trường và tổn thất không thuận nghịch. Các vùng  $\theta$  cao đồng vị với các dải sản sinh Entropy lớn tập trung dọc biên kênh và vùng lân cận mép ra, với cực trị cục bộ đạt khoảng  $64 \div 80 (W \cdot m^{-3} \cdot K^{-1})$  ở tải thấp và tải trung gian, phản ánh sự gia tăng khuếch tán rối và tổn thất do dòng thứ cấp. Ngược lại, tại vùng tính toán, sản sinh Entropy suy giảm đáng kể và phân bố hẹp hơn quanh lớp biên, cho thấy tổn thất được kiểm soát tốt khi mức phối hợp trường vận tốc-áp suất được cải thiện. Tổng quát, sự mở rộng của miền  $\theta > 90^0$  tại vành

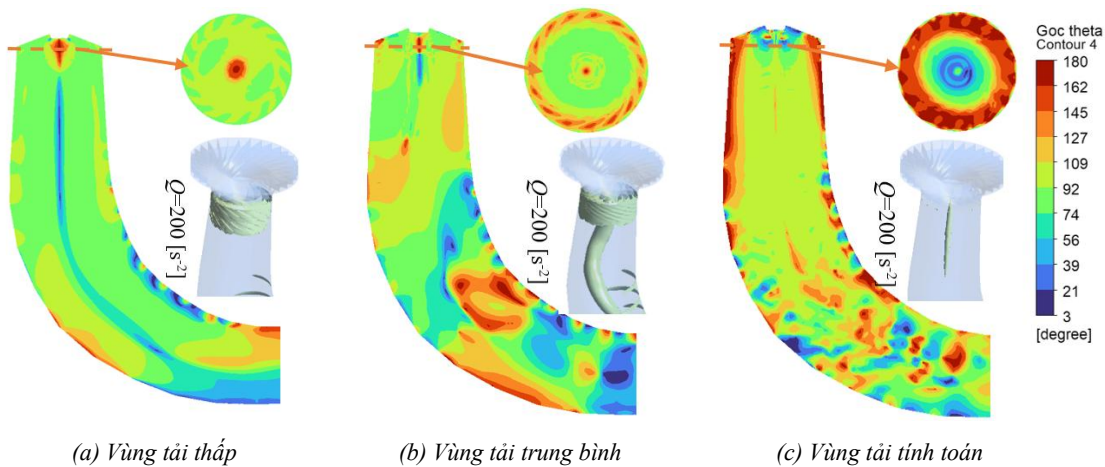
trên có thể xem như chỉ dấu định lượng cho vùng suy giảm truyền năng lượng và nguồn gốc làm gia tăng sản sinh Entropy trong bánh công tác.

*\* Ảnh hưởng của góc phối hợp trường đến vùng dòng ngược trong ống hút*

Phân bố góc phối hợp trường  $\theta$  tại cửa ra bánh công tác phản ánh trực tiếp sự khác biệt theo không gian của cơ chế chuyển hóa giữa động năng của phần tử dòng chảy và năng lượng áp suất. Các vùng có  $\theta$  lớn (đặc biệt  $\theta > 90^0$ ) đặc trưng cho trạng thái chuyển đổi bất lợi, làm suy giảm động lượng và giảm khả năng duy trì dòng chảy ổn định sau khi rời bánh công tác. Khi đi vào ống hút, dòng chảy tại các vùng  $\theta$  cao thường không đủ năng lượng để chống lại gradient áp suất ngược, từ đó dễ phát sinh hồi lưu cục bộ và gia tăng tổn thất tái tuần hoàn. Như minh họa trong Hình 7, trường  $\theta$  trong ống hút cho thấy sự “kê thừa” rõ rệt từ điều kiện dòng ra bánh công tác và có liên hệ chặt chẽ với sự hình thành các cấu trúc xoáy mất ổn định (biểu diễn qua tiêu chí  $Q=200s^{-2}$ ). Ở chế độ tải thấp,  $\theta$  xuất hiện các dải tập trung cục bộ với giá trị điển hình  $127^0 \div 180^0$ , trong khi vùng lõi dòng chính duy trì mức thấp hơn ( $20^0 \div 60^0$ ), tạo nên phân bố không đồng đều



Hình 6. Phân bố sản sinh Entropy khu vực vành trên BCT



Hình 7. Phân bố góc phối hợp trường của ống hút dưới các điều kiện tải khác nhau

mạnh. Sự tương phản này thúc đẩy sự phát triển của cấu trúc xoáy kép dạng xoắn, đồng thời làm tăng tương tác giữa vùng suy giảm động năng theo phương chu vi với tia dòng tại cửa ra bánh công tác, dẫn đến trường xoáy hỗn loạn và vùng nước chết. Ở chế độ tải trung gian, phân bố  $\theta$  có xu hướng tập trung dạng đơn đỉnh, gây trễ vận tốc dọc trục và kích hoạt cấu trúc kết hợp giữa dải xoáy lệch tâm (vortex rope) và hồi lưu bên. Ngược lại, tại chế độ tính toán,  $\theta$  phân bố tương đối đồng đều hơn với phần lớn miền dòng chảy nằm trong khoảng  $56^{\circ} \div 109^{\circ}$ , cho thấy điều kiện dòng vào ống hút thuận lợi và mức độ hồi lưu bị hạn chế.

Như vậy, phân bố góc phối hợp trường tại cửa ra bánh công tác có thể xem như nguồn “mầm” chi phối sự hình thành và tiến hóa mất ổn định xoáy trong ống hút. Dạng phân bố không gian của  $\theta$  đóng vai trò xác lập trước mức độ lệch tâm, số nhánh xoáy và đặc trưng tiến động của dải xoáy, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến tổn thất và hiệu suất của hệ thống

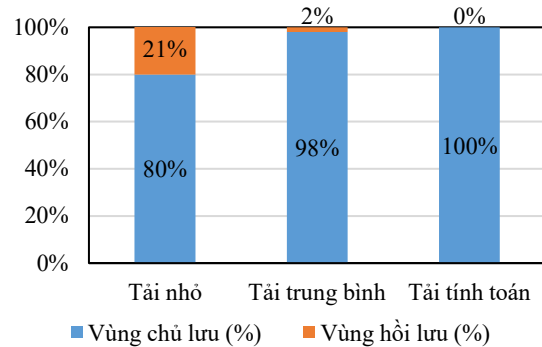
Như đã phân tích trong Hình 6, các cấu trúc xoáy và hiện tượng hồi lưu trong ống hút có nguồn gốc từ chất lượng dòng chảy tại cửa ra bánh công tác, đặc biệt là mức độ mất cân bằng giữa trường vận tốc và áp suất. Để định lượng đặc trưng này, tỷ lệ vùng hồi lưu tại cửa ra bánh công tác được xác định bởi  $\delta$ , và tỷ lệ vùng có góc phối hợp trường cao ( $\theta > 90^{\circ}$ ) được xác định bởi  $\varepsilon$ , theo các biểu thức:

$$\delta = \frac{A_{hl}}{A_{out}}, \quad \varepsilon = \frac{A_{\theta}}{A_{out}} \quad (3)$$

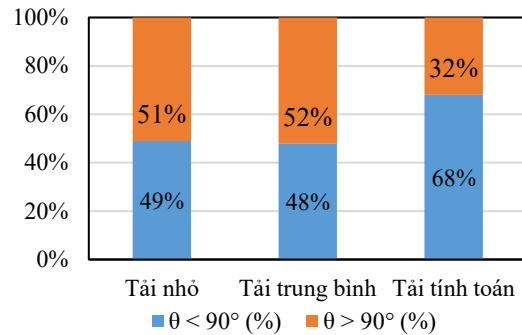
Trong đó  $A_{out}$  là diện tích mặt cắt cửa ra bánh công tác;  $A_{hl}$  là diện tích vùng hồi lưu tại cửa ra bánh công tác, trong đó vùng hồi lưu được xác định bởi vận tốc dọc trục  $u_z > 0$ ;  $A_{\theta}$  là diện tích vùng tại cửa ra bánh công tác có góc phối hợp trường  $\theta > 90^{\circ}$ .

Như thể hiện trong Hình 8, sự biến thiên của  $\delta$  và  $\varepsilon$  theo ba chế độ làm việc cho thấy hồi lưu và vùng góc phối hợp cao đều phản ánh mức độ phối hợp giữa trường vận tốc và gradient áp suất tại cửa ra bánh công tác. Ở điều kiện tải nhỏ, hồi lưu vẫn chiếm tỷ lệ đáng kể với  $\delta=21\%$ , đồng thời vùng có  $\theta > 90^{\circ}$  chiếm ưu thế ( $\varepsilon=51\%$ ), cho thấy sự suy giảm động lượng mạnh và khả năng chuyển đổi động năng kém hiệu quả. Khi chuyển sang tải trung gian, hồi lưu giảm nhanh ( $\delta=2\%$ ), tuy nhiên tỷ lệ vùng  $\theta > 90^{\circ}$  vẫn duy trì ở mức cao ( $\varepsilon=52\%$ ), hàm ý tổn thất thủy lực vẫn đáng kể dù dòng chảy đã ổn định hơn về mặt vận tốc dọc trục. Ngược lại, tại điều kiện tối ưu, hồi lưu biến mất hoàn toàn ( $\delta=0\%$ ) và tỷ lệ vùng  $\theta > 90^{\circ}$  giảm xuống  $32\%$ , phản ánh trạng thái phối hợp vận tốc - áp suất thuận lợi hơn khi dòng chảy đi vào ống hút. Như vậy, sự mở

rộng của vùng  $\theta > 90^{\circ}$  có thể xem là chỉ báo động lực học cho trạng thái truyền năng lượng bất lợi, và khi các vùng này tập trung tại khu vực chuyển tiếp giữa bánh công tác và ống hút, chúng tạo điều kiện thuận lợi cho sự hình thành hồi lưu quy mô lớn.



(a) Tỷ lệ vùng hồi lưu tại cửa ra BCTC



(b) Tỷ lệ góc hiệp đồng tại cửa ra BCTC

Hình 8. Tỷ lệ vùng hồi lưu và góc phối hợp trường tại cửa ra BCTC

#### 4. Kết luận

Các kết quả của nghiên cứu này cung cấp một chỉ báo dựa trên cơ chế vật lý rõ ràng để đánh giá chất lượng dòng chảy và hiệu quả truyền năng lượng tại cửa ra bánh công tác của tua bin Francis. Thông qua góc phối hợp trường  $\theta$  và tỷ lệ vùng có  $\theta > 90^{\circ}$ , trạng thái lệch hướng giữa trường vận tốc và gradient áp suất có thể được nhận diện sớm, ngay cả khi các chỉ tiêu toàn cục như hiệu suất hoặc dao động áp suất chưa biểu hiện rõ. Cách tiếp cận này cho phép kết nối trực tiếp giữa điều kiện dòng chảy tại bánh công tác và nguy cơ mất ổn định trong ống hút, từ đó hỗ trợ đánh giá an toàn vận hành ở chế độ phụ tải thấp và trung gian. Chỉ tiêu  $\theta$  có tiềm năng được sử dụng làm tham số đánh giá trong thiết kế, cải tiến hình học bánh công tác cũng như trong tối ưu hóa chiến lược vận hành tua bin trong dải tải rộng, đặc biệt đối với các nhà máy thủy điện phải đáp ứng yêu cầu điều tiết linh hoạt của hệ thống điện hiện đại.

**Lời cảm ơn**

Nghiên cứu đã sử dụng kết quả thí nghiệm mô hình của phòng thí nghiệm thủy lực trường đại học NTNU Na Uy và Mô phỏng số được thực hiện tại trung tâm siêu máy tính của Trường Đại học Vũ Hán, Trung Quốc.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

- [1] Wang Lei, Jiayi Cui, et al. (2022), *Research on the Vortex Rope Control Techniques in Draft Tube of Francis Turbines*, in *Energies*. Vol.15(24), p. 9280.
- [2] Xiaobo Zheng et al. (2022), *Optimization and Performance Analysis of Francis Turbine Runner Based on Super-Transfer Approximate Method under Multi-Energy Complementary Conditions*, in *Sustainability*, Vol.14(16), p. 10331.
- [3] Triệu Trần C. (2025), *Đánh giá hiện tượng khí thực và dao động áp suất trong phần côn ống hút tuabin Francis thông qua mô phỏng CFD*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 84, tr.88-93.
- [4] Jinhan Lee et al. (2025), *Francis turbine instabilities during off-design and transient operations: A comprehensive review of the state-of-the-art and recent research and development*, *Energy Conversion and Management: X*, Vol.28, p. 101384.
- [5] Triệu Trần C. (2024), *Phân tích đặc tính dòng chảy trong ống hút của tuabin francis dưới các độ mở cánh hướng khác nhau*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 80, tr.24-29.
- [6] Faya Jin et al. (2023), *Study of vortex rope for the flow field pulsation law*, *Ocean Engineering*, Vol.273, p. 114026.
- [7] Nguyen Anh Duc et al. (2025), *Advanced technologies for improving hydraulic performance and flow characteristics in hydroturbines: a comprehensive review*, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol.19(1), p. 2556449.
- [8] Xitong Wu et al. (2026), *Mechanism of energy transfer failure and rotating stall in pump-turbines: insights from a novel velocity-pressure synergy approach*, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.256, p. 128143.
- [9] RuZhi Gong et al. (2013), *Application of entropy production theory to hydro-turbine hydraulic analysis*, *Science China Technological Sciences*, Vol.56(7) pp.1636-1643.
- [10] Zhifeng Yu et al. (2021), *Entropy production analysis for vortex rope of a Francis turbine using hybrid RANS/LES method*, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol.127, p. 105494.
- [11] Tran C.Trieu, Pham D.C. (2022), *Application of Liutex and Entropy Production to Analyze the Influence of Vortex Rope in the Francis-99 Turbine Draft Tube*, *Tehnički vjesnik*, Vol.29(4), pp.1177-1183.
- [12] Liang Bo Wu et al. (2009), *Field synergy principle of heat and mass transfer*, *Chinese Science Bulletin*, Vol.54(24), pp.4604-4609.
- [13] Michel Cervantes et al.(2015), *Francis-99 Workshop I: steady operation of Francis turbines*, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol.579, p. 11001.
- [14] Zengyuan Guo et al.(2005), *The field synergy (coordination) principle and its applications in enhancing single phase convective heat transfer*, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.48(9), pp.1797-1807.
- [15] Zixiang Tong (2024), *A local synergy angle of velocity, temperature and pressure fields for enhancement of comprehensive heat transfer performance*, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol.64, p. 105466.

Ngày nhận bài:	27/01/2026
Ngày nhận bản sửa:	12/02/2026
Ngày duyệt đăng:	23/02/2026