

NGHIÊN CỨU QUÁ TRÌNH PHUN VÀ HÓA HƠI NHIÊN LIỆU
TRONG ỐNG HÓA HƠI CỦA ĐỘNG CƠ TUA-BIN KHÍ CỠ NHỎ
BẰNG PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG KẾT HỢP THỰC NGHIỆM
INVESTIGATION OF FUEL ATOMIZATION AND EVAPORATION PROCESSES
IN THE VAPORIZER OF A MICROTURBINE BY A COMBINED NUMERICAL
AND EXPERIMENTAL APPROACH

NGUYỄN HỮU HÀ*, NGUYỄN QUỐC QUÂN, PHẠM XUÂN PHƯƠNG

Viện cơ khí động lực, Học viện kỹ thuật quân sự

*Email liên hệ: huuha84@lqdtu.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.2025.i84.861>

Tóm tắt

Quá trình phun và hóa hơi nhiên liệu trong ống hóa hơi của động cơ tua-bin khí cỡ nhỏ được nghiên cứu bằng mô phỏng số, với các thông số đầu vào của mô hình được hiệu chỉnh dựa trên kết quả thực nghiệm bằng phương pháp chụp ảnh tốc độ cao. Mô hình CFD được áp dụng tại điểm thiết kế và không tải, sử dụng mô hình DPM kết hợp phân rã thứ cấp Kelvin - Helmholtz Rayleigh-Taylor để mô phỏng nguyên tử hóa và hóa hơi dựa trên áp suất bão hòa. Kết quả mô phỏng cho thấy đường kính trung bình Sauter của giọt nhiên liệu ở điều kiện không tải lớn gấp khoảng bảy lần so với điều kiện điểm thiết kế. Thực nghiệm đóng vai trò kiểm nghiệm mô hình và xác nhận các tham số đầu vào, giúp xác định một mô hình tính toán nhanh và tin cậy để đánh giá hiệu quả làm việc của ống hóa hơi. Kết quả thực nghiệm xác nhận rằng các giọt nhiên liệu tại điều kiện điểm thiết kế nhỏ hơn và phân tách nhanh hơn so với điều kiện không tải, từ đó cải thiện khả năng đánh lửa của động cơ tua-bin khí cỡ nhỏ, đặc biệt trong điều kiện khởi động và công suất thấp.

Từ khóa: Phun nhiên liệu và hóa hơi, mô phỏng CFD, phương pháp Euler-Lagrange, động cơ tua-bin khí cỡ nhỏ, ảnh tốc độ cao, OpenCV.

Abstract

The fuel spray and vaporization processes inside the vaporizer tube of a small-scale gas turbine engine are investigated through numerical simulation, with model input parameters calibrated based on experimental results obtained via high-speed imaging. The CFD model is applied at both design point and idle conditions, employing a DPM model combined with the

secondary breakup mechanism of Kelvin-Helmholtz Rayleigh-Taylor (KH-RT) to simulate atomization, and evaporation modeled based on saturation pressure. Simulation results indicate that the Sauter mean diameter of fuel droplets under idle conditions is approximately seven times larger than that at the design point. Experiments serve to validate the model and confirm the input parameters, facilitating the identification of a fast and reliable computational model to assess the performance of the vaporizer tube. Experimental findings confirm that fuel droplets at the design point condition are smaller and break up more rapidly than those at idle, thereby improving the ignition capability of the small-scale gas turbine engine, especially during startup and low-power operation.

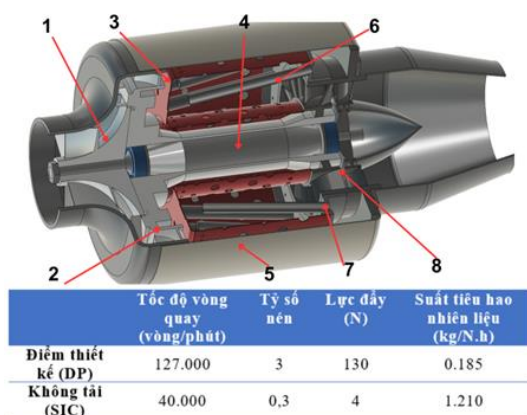
Keywords: Fuel spray and vaporization, CFD method, Euler-Lagrange method, Microturbine, high-speed image, OpenCV.

1. Giới thiệu

Động cơ tua-bin khí cỡ nhỏ, với ưu điểm trọng lượng nhẹ, khả năng khởi động nhanh và độ rung thấp, chủ yếu được sử dụng trong các ứng dụng mô hình máy bay và quân sự [1]. Tuy nhiên, hiện nay, động cơ này đã được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khác nhau, bao gồm máy bay không người lái (UAV), sản xuất điện và các xe hybrid [2]. Động cơ tua-bin khí cỡ nhỏ thương mại với thiết kế ổn định, phù hợp cho các ứng dụng yêu cầu hiệu suất và độ tin cậy cao. Sơ đồ cấu trúc và các thông số chính của động cơ JETCAT P130RX được thể hiện trong Hình 1. Các thông số bao gồm: Tốc độ vòng quay, tỷ số nén, lực đẩy và suất tiêu hao nhiên liệu ở các mức công suất khác nhau.

Động cơ tua-bin khí cỡ nhỏ gồm ba thành phần

chính: máy nén, tua-bin và buồng đốt, trong đó chỉ có máy nén và tua-bin có thể được thu nhỏ theo tỷ lệ hình học. Buồng đốt không thể thu nhỏ tuyến tính theo đường kính động cơ do giới hạn về hiệu suất cháy ở điều kiện áp suất thấp. Thông thường, buồng đốt trong các động cơ nhỏ có kích thước tương đối lớn hơn nhằm đảm bảo hiệu suất đốt cháy, nhưng hiệu suất này phụ thuộc mạnh vào các quá trình hóa hơi, trộn và phản ứng nhiên liệu. Đặc biệt, hiệu suất đốt chịu ảnh hưởng đáng kể bởi thời gian lưu trú ngắn của hỗn hợp nhiên liệu-không khí trong vùng cháy. Ngoài ra, các động cơ nhỏ còn đối mặt với nhiều hạn chế như khó khởi động, không thể tái khởi động ở độ cao lớn, và hiệu suất cháy thấp do tốc độ dòng chảy cao và thể tích buồng đốt nhỏ [3, 4]. Những thách thức này đặt ra yêu cầu phải hiểu rõ hơn về các quá trình vật lý xảy ra trong buồng đốt, đặc biệt là trong vùng ống hóa hơi - nơi khởi đầu của sự hóa hơi và hình thành hỗn hợp.



Hình 1. Động cơ JETCAT P130RX [2]: 1- Máy nén, 2-Vành hướng dòng, 3-Ống lót, 4-Trục, 5-Vỏ, 6-Ống hóa hơi, 7-Kim phun nhiên liệu, 8-Tua-bin

Có hai phương pháp chính để chuẩn bị nhiên liệu lỏng cho quá trình đốt cháy: Vòi phun và ống hóa hơi [5]. Các vòi phun, bao gồm áp suất, quay và hỗ trợ không khí, chuyển đổi nhiên liệu thành giọt nhỏ. Tuy nhiên, trong động cơ tua-bin khí cỡ nhỏ, ống hóa hơi là phương pháp chuẩn bị nhiên liệu bắt buộc và không thể thay thế, nhờ vào yêu cầu về kích thước nhỏ gọn và tính kinh tế. Trong ống hóa hơi, hỗn hợp nhiên liệu và không khí được phun vào các ống ngập trong ngọn lửa, sau đó được làm nóng bởi thành ống và thoát ra từ ống. Các thiết kế ống cong sớm gặp vấn đề quá nhiệt, nhưng điều này đã được khắc phục bằng cách thay đổi hình dạng ống và áp dụng phun nhiên liệu đa điểm cùng dòng xoáy. Hiện tại, ống hóa hơi thẳng, chữ T và chữ L vẫn được sử dụng phổ biến trên thị trường, với các nghiên cứu chỉ ra rằng hiệu suất phun của cả

hai loại ống này là tương đương [6].

Quá trình phân rã tia phun là một quá trình tương tác đa pha phức tạp, với các hiện tượng mất ổn định mang tính ngẫu nhiên và diễn ra trong thang thời gian và không gian vô cùng bé. Các phương pháp mô phỏng như Euler-Lagrange (E-L), KIVA, Volume of Fluid (VOF), Level Set (LS), Large Eddy Simulation (LES), Eulerian Multifluid, và Interface-Tracking Methods đã được áp dụng để nghiên cứu quá trình này [7-9]. Các phương pháp công nghiệp như E-L, KIVA, và AtoMIST rất hiệu quả trong mô phỏng quy mô lớn và ứng dụng thực tế, đặc biệt là trong các động cơ tua-bin khí và phân lực [10, 11]. Trong khi đó, các phương pháp nghiên cứu cơ bản như VOF, LS, LES, và Interface-Tracking Methods thường được sử dụng để nghiên cứu chi tiết các quá trình phun và mô phỏng bề mặt, phù hợp với các nghiên cứu cơ bản trong môi trường không ổn định. Tuy nhiên, hiện nay vẫn còn thiếu các mô hình mô phỏng phù hợp với thực nghiệm, đặc biệt trong việc mô phỏng chính xác quá trình phân rã tia phun dưới các điều kiện thực tế.

Bài báo nghiên cứu quá trình phun và hóa hơi nhiên liệu trong ống hóa hơi của động cơ tua-bin khí cỡ nhỏ bằng mô phỏng CFD ở các chế độ thiết kế (DP) và không tải (SIC). Mô phỏng này xác định các đặc tính quan trọng như phun nhiên liệu, nguyên tử hóa và hóa hơi, nhằm cải thiện quá trình đốt cháy và hiệu suất động cơ. Hệ thống thí nghiệm với mô hình tương đương của một ống hóa hơi được thiết kế để xác định các tham số đầu vào cho mô hình và kiểm nghiệm kết quả, từ đó đảm bảo tính chính xác của mô hình và đánh giá hiệu quả động cơ trong các điều kiện vận hành khác nhau.

2. Các quá trình vật lý trong ống hóa hơi

2.1. Phun nhiên liệu

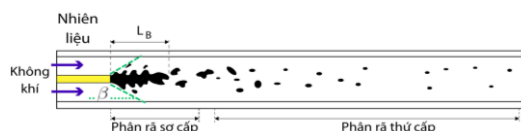
Trong các hệ thống hóa hơi của động cơ phân lực siêu nhỏ, nhiên liệu được phun vào ống hóa hơi qua bộ phun khí đơn giản, trong khi không khí thổi từ máy nén theo hướng trục cùng với nhiên liệu. Khi nhiên liệu phân tán trong ống, nó trộn lẫn với không khí và hỗn hợp nhiên liệu-khí thoát ra từ đầu bên kia của ống hóa hơi. Mục tiêu chính của các ống hóa hơi là hóa hơi nhiên liệu trước khi đưa vào vùng cháy, giúp cải thiện hiệu suất đốt cháy. Tuy nhiên, chỉ một phần nhỏ nhiên liệu bên trong ống được hóa hơi trước, mặc dù hiệu suất trộn được cải thiện nhờ sự phân tán của nhiên liệu trong ống. Một hạn chế lớn của hệ thống hóa hơi là nhạy cảm với các thay đổi điều kiện hoạt động. Trong điều kiện khởi động, nhiệt độ khí xả thấp, khiến việc truyền nhiệt qua thành ống kém hiệu quả, giảm khả năng hóa hơi và

ảnh hưởng đến hiệu suất đốt cháy. Tương tự, trong quá trình tăng tốc nhanh, việc bổ sung nhiên liệu đột ngột có thể làm giảm nhiệt độ ống, làm chậm quá trình hóa hơi và giảm hiệu suất đốt cháy.

2.2. Quá trình phân rã

Quá trình phân rã nhằm nguyên tử hóa nhiên liệu, chuyển đổi nhiên liệu rời thành những giọt nhỏ, tăng tỷ lệ bề mặt trên thể tích để cải thiện sự hóa hơi. Quá trình này xảy ra khi có sự mất ổn định tại giao diện phân cách giữa pha lỏng và pha khí, dẫn đến sự phân chia thể tích chất lỏng thành các giọt nhỏ. Nguyên tử hóa được chia thành hai giai đoạn: Nguyên tử hóa sơ cấp và thứ cấp. Phân rã sơ cấp là sự phá vỡ tia chất lỏng do các lực bên trong như nhiễu loạn và quán tính, với sự xác định chủ yếu qua tỷ lệ thông lượng động lượng ($M_{A/L}$). Thông qua đó, thể tích chất lỏng cuối cùng có hình dạng gần với hình cầu, tối đa hóa tỷ lệ bề mặt trên thể tích.

$$M_{A/L} = \frac{\rho_A U_A^2}{\rho_L U_L^2} \quad (1)$$



Hình 2. Quá trình phân rã tia phun trong ống hóa hơi

Phân rã thứ cấp xảy ra khi các lực khí động học tác động trực tiếp lên giọt nhiên liệu, phân chia các giọt lớn thành các giọt nhỏ hơn. Số Weber (We) được sử dụng để mô tả quá trình này, là tỷ lệ giữa lực khí động học và lực căng bề mặt. Với số Weber cao, nguyên tử hóa thứ cấp chiếm phần lớn quá trình nguyên tử hóa, xác định sự phân bố kích thước giọt cuối cùng. Các thông số như chiều dài phá vỡ và góc phun cũng đóng vai trò quan trọng, với sự gia tăng góc phun giúp tăng sự tan rã của tia khi diện tích tiếp xúc với không khí tăng lên.

$$We = \frac{\rho_A (U_A - U_L) d_L}{\sigma} \quad (2)$$

2.3. Hóa hơi nhiên liệu

Quá trình hóa hơi giọt trong tia phun nhiên liệu liên quan đến truyền nhiệt và khối lượng. Nhiệt được truyền vào giọt qua dẫn và đối lưu từ khí nóng xung quanh, trong khi hơi nhiên liệu khuếch tán vào dòng khí. Hóa hơi xảy ra khi phân tử nhiên liệu ở bề mặt giọt thoát ra và chuyển sang trạng thái khí, tạo ra lớp hơi nhiên liệu gần giao diện chất lỏng. Quá trình này tiếp tục cho đến khi hơi nhiên liệu xung quanh giọt

bão hòa, không còn thay đổi nhiệt độ và áp suất. Trong buồng đốt, giọt thường ở trạng thái hóa hơi không ổn định, với nhiệt được sử dụng để làm nóng giọt. Tốc độ truyền nhiệt và khối lượng phụ thuộc vào số Reynolds và diện tích bề mặt nhiên liệu, giúp cải thiện hiệu quả hóa hơi.

3. Phương pháp

3.1. Mô phỏng CFD

a. Trình giải dòng chảy

Trong nghiên cứu này, các mô phỏng số được thực hiện bằng phần mềm CFD ANSYS Fluent 2021R1, sử dụng phương pháp thể tích điều khiển để giải phương trình Navier-Stokes với trung bình Reynolds (RANS). Sự nhiễu loạn được mô phỏng qua mô hình $k-\omega$ SST, kết hợp mô hình $k-\epsilon$ cho các vùng xa tường và mô hình Kelvin-Helmholtz Rayleigh-Taylor (KHRT) cho quá trình nguyên tử hóa nhiên liệu. Dòng chảy hai pha lỏng-khí được mô phỏng bằng phương pháp Euler-Lagrange, trong đó pha khí là pha liên tục và pha phân tán được mô phỏng qua mô hình hạt rời rạc (DPM). Mô hình DPM không ổn định được áp dụng, giả định độc lập về thời gian cho hai giai đoạn dòng chảy. Các giọt nhiên liệu phun ra có dạng tròn, với đường kính điều chỉnh theo kết quả thực nghiệm. Tham số ban đầu như vị trí phun và góc côn phun được hiệu chỉnh theo phân tích thực nghiệm và lý thuyết. Cuối cùng, mô hình hóa hơi dựa trên áp suất bão hòa được sử dụng để mô phỏng quá trình hóa hơi nhiên liệu trong ống hóa hơi.

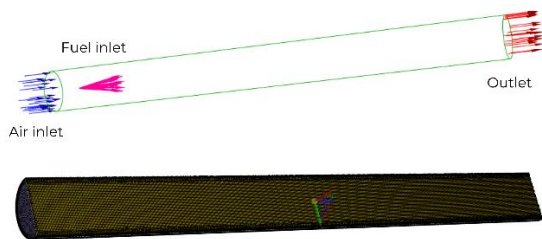
b. Cấu hình hình học

Trong nghiên cứu này, 2 cấu hình hình học được mô phỏng: (i) một cấu hình đại diện cho 1 ống hóa hơi của JETCAT P130RX và (ii) một cấu hình khác đại diện cho 1/12 buồng đốt động cơ khí cỡ nhỏ. Trong đó, cấu hình ống hóa hơi được phân tích là cấu hình chính. Miền tính toán tập trung vào bên trong ống hóa hơi phản lực siêu nhỏ, bao gồm cả vòi phun nhiên liệu. Hình dạng mô phỏng hệ thống hóa hơi nhiên liệu khá đơn giản, với hai xi lanh đồng tâm: Một xi lanh lớn đại diện cho ống hóa hơi và một xi lanh nhỏ hơn ở đầu xi lanh lớn đóng vai trò là kim phun nhiên liệu. Miền tính toán này được sử dụng để phân tích quá trình nguyên tử hóa và hóa hơi diễn ra trong hệ thống hóa hơi nhiên liệu của động cơ tua-bin khí cỡ nhỏ. Cấu hình buồng đốt và các kết quả liên quan đã được trình bày trong nghiên cứu trước, và trong nghiên cứu này, các kết quả đó được sử dụng làm đầu vào cho mô phỏng ống hóa hơi [12].

c. Tạo lưới và các điều kiện biên

Quá trình tạo lưới cho các cấu hình hình học trong

nguyên cứu này được thực hiện bằng phần mềm ANSYS Mesh. Tất cả các lưới sử dụng trong nghiên cứu là lưới phi cấu trúc, được xây dựng từ các phần tử hexahedral. Lưới được tinh chỉnh gần các bức tường sao cho các yêu cầu về khoảng cách lưới đối với mô hình nhiễu loạn SST $k-\omega$ được đáp ứng ở mức chấp nhận được. Phân tích hội tụ lưới cũng được thực hiện bằng cách kiểm tra sự phụ thuộc của giải pháp vào mật độ lưới. Mô hình ống hóa hơi với lưới 1,8 triệu phần tử được chọn để tính toán với kết quả đảm bảo tính hội tụ (Hình 3). Các kết quả chính từ các mô phỏng sẽ được trình bày và thảo luận trong phần tiếp theo.



Hình 3. Điều kiện biên và mô hình lưới của ống hóa hơi

Trong mô phỏng thiết bị hóa hơi nhiên liệu, điều kiện biên ‘velocity inlet’ và ‘pressure outlet’ được thiết lập tại cửa vào và cửa ra. Nhiệt độ và áp suất tại cửa vào và ra của hệ thống giả định tương ứng với buồng đốt, với một sự gia tăng 121K tại cửa vào để mô phỏng quá trình truyền nhiệt. Các tham số đầu vào của mô hình ống hóa hơi được xác định từ kết quả mô phỏng buồng đốt, các tham số thể hiện như Bảng 1. Tường ống hóa hơi không được mô phỏng chi tiết, và giả định rằng độ dày của tường ống không ảnh hưởng lớn, với nhiệt độ giả định là 2000K. Các bức tường trong mô phỏng được xem là bức tường phản xạ.

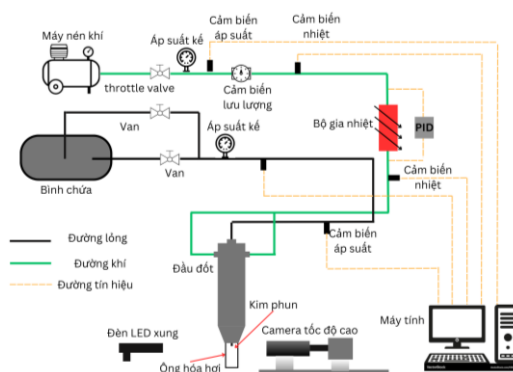
Bảng 1. Thông số phun của nhiên liệu và không khí [2]

Tham số	DP	SIC
$m_f(\text{kg.s}^{-1})$	0.000496	0.000113
$U_f(\text{m.s}^{-1})$	9.847	1.355
Re_f	1723.0	234.5
Oh_f	0.0188	0.0188
$m_A(\text{kg.s}^{-1})$	0.003	0.000467
$U_A(\text{m.s}^{-1})$	63.73	21.27
Re_A	3149	6942

3.2. Thử nghiệm

Hệ thống thí nghiệm nghiên cứu dòng chảy đa pha trong ống hóa hơi của động cơ tua-bin khí cỡ nhỏ bao gồm bốn thành phần chính: hệ thống khí, hệ thống chất lỏng, bộ đốt và hệ thống chụp ảnh. Sơ đồ tổng thể của hệ thống được trình bày trong Hình 4. Bộ đốt được

thiết kế tương đương với điều kiện làm việc của ống hóa hơi trong động cơ Jetcat P130RX, bao gồm tám thành phần chính, với kim phun được chuẩn hóa và các thành phần gia công từ đồng để đảm bảo ổn định. Cấu hình bộ đốt theo mô hình Sydney, với hình nón tỷ lệ 7:1 để đảm bảo luồng không khí không bị xáo trộn. Ống hóa hơi được thay thế bằng ống thạch anh chịu nhiệt để quan sát quá trình phân rã tia phun, hóa hơi và hòa trộn. Hệ thống khí nén sử dụng máy nén nhỏ để cung cấp khí ổn định, nhiệt độ khí được kiểm soát từ 120°C đến 200°C. Hệ thống chất lỏng cung cấp chất lỏng qua bơm điện, với áp suất trước kim phun được giám sát. Hệ thống chụp ảnh sử dụng máy ảnh tốc độ cao Photon Fastcam AX100 để thực hiện chụp ảnh shadowgraphy, giúp phân tích các đặc trưng của tia phun.



Hình 4. Sơ đồ hệ thống thí nghiệm

Các tham số điều kiện thí nghiệm, bao gồm nhiệt độ, áp suất và tốc độ dòng chảy của khí và chất lỏng, được xác định dựa trên kết quả mô hình mô phỏng cấu hình 1. Các tham số này giúp xác định chính xác các điều kiện hoạt động của ống hóa hơi trong các chế độ toàn tải (DP) và không tải (SIC). Thông qua việc điều chỉnh các thông số này, hệ thống thí nghiệm và mô hình mô phỏng phù hợp với các điều kiện cụ thể trong quá trình phân rã tia phun và hóa hơi nhiên liệu, cung cấp cơ sở dữ liệu quan trọng cho việc phân tích và tối ưu hóa hiệu suất của động cơ tua-bin khí cỡ nhỏ.

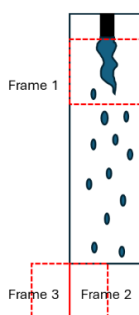
Quy trình xử lý hình ảnh hậu kỳ đóng vai trò quan trọng trong hệ thống thí nghiệm này, sử dụng công cụ như thư viện OpenCV để phân tích hình ảnh tốc độ cao. Quá trình bắt đầu với tiền xử lý, giúp chuẩn hóa và giảm nhiễu, đồng thời phân đoạn và trích xuất dữ liệu hiệu quả. Phương pháp cắt ảnh được sử dụng để giảm tác động của sự khúc xạ, tập trung vào các đặc điểm của tia phun và giọt chất lỏng. Phân đoạn hình ảnh cho phép đo chính xác chiều dài phân rã và kích thước giọt. Kết quả được tổng hợp và hiển thị qua biểu đồ phân bố, hỗ

trợ nghiên cứu và mô phỏng. Toàn bộ quá trình được đánh giá thông qua kiểm tra sai số và phân tích nhiều hình ảnh, đảm bảo độ tin cậy của kết quả.

4. Kết quả và thảo luận

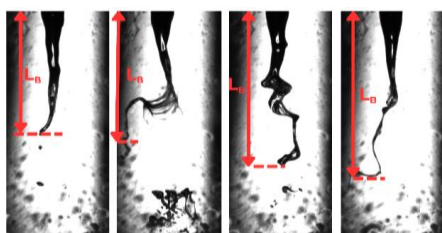
4.1. Kết quả thực nghiệm

Để xây dựng mô hình mô phỏng phản ánh đúng hành vi thực tế của quá trình phun và hóa hơi, thực nghiệm đóng vai trò then chốt trong việc cung cấp dữ liệu đầu vào và hiệu chỉnh mô hình. Trong nghiên cứu này, kết quả thực nghiệm được sử dụng để xác định các tham số cần thiết cho mô hình pha rời rạc (DPM), đồng thời làm cơ sở hiệu chỉnh nhằm đảm bảo kết quả mô phỏng phù hợp với thực tế. Cụ thể, ba khung hình được bố trí trong vùng quan sát nhằm thu thập thông tin đặc trưng cho quá trình phân rã tia phun. Khung hình 1 được sử dụng để xác định chiều dài phân rã (L_B), trong khi khung hình 2, 3 dùng để xác định phân bố kích thước giọt tại cửa ra của ống hóa hơi. Vị trí các khung hình được minh họa trong Hình 5.



Hình 5. Vị trí các khung hình chụp phân rã tia phun

Hình 6 minh họa diễn biến phân rã của tia phun trong Khung 1. Hình ảnh cho thấy sự phân rã dao động của các cụm lỏng dưới tác động của dòng khí, với vị trí phân rã dao động theo thời gian. Qua xử lý ảnh, phân đoạn đối tượng và đo chiều dài lõi lỏng, chiều dài phân rã được xác định và liệt kê với từng chế độ như trong Bảng 2. Còn góc β không thể xác định được bằng phương pháp chụp ảnh, do giới hạn giữa phân rã sơ cấp và thứ cấp không rõ ràng, và giá trị của góc này được tham khảo từ các nghiên cứu trước [13].

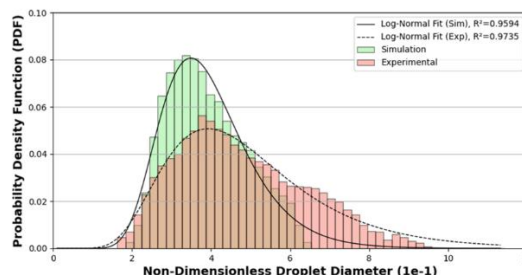


Hình 6. Hình ảnh diễn biến tia phun

Khung hình 2 và 3 ghi lại hình ảnh giọt tức thời tại

Bảng 2. Các thông số đặc trưng của quá trình phun

Tham số	DP	SIC
L_B	6.7	3.6
β ($^\circ$)	48.24	47.07



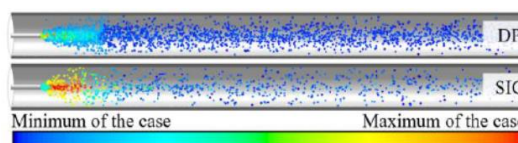
Hình 7. So sánh phân bố giọt của 2 phương pháp

vị trí cửa ra của ống hóa hơi, thông qua kỹ thuật xử lý ảnh, phân bố kích thước giọt được xác định. Với điều kiện DP và nhiệt độ tường đạt 27°C , tiến hành so sánh phân bố kích thước giọt giữa kết quả thực nghiệm và mô phỏng. Mục tiêu là điều chỉnh mô hình mô phỏng sao cho sai lệch giữa hai kết quả này được giảm thiểu. Hình 7 thể hiện phân bố giọt tại cửa ra ống hóa hơi của hai phương pháp sau khi đã hiệu chỉnh.

4.2. Kết quả mô phỏng CFD

a. Cấu trúc phun tổng thể

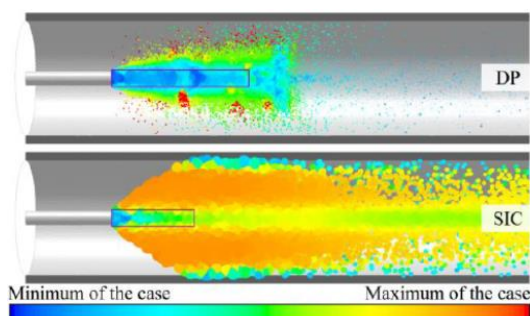
Các kiểu phun đặc trưng cho quá trình phun nhiên liệu trong ống hóa hơi được thể hiện trong Hình 8 và Hình 9, với các kết quả từ điều kiện DP và SIC được minh họa. Cụ thể, Hình 8 làm nổi bật đường kính giọt nhiên liệu, trong khi Hình 9 cung cấp cái nhìn chi tiết về vận tốc tương đối của không khí với giọt, thông qua quan sát khu vực gần vòi phun. Trong các hình này, pha chất lỏng phun được đánh dấu bằng các bụu kiện DPM, đại diện cho giọt theo kích thước không đổi (Hình 8) hoặc theo đường kính giọt (Hình 9).



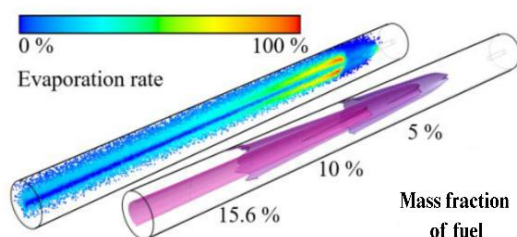
Hình 8. Đường kính giọt ở chế độ DP và SIC

Dựa trên phân tích từ Hình 9 và Hình 10, có thể thấy rằng kích thước giọt nhiên liệu trong điều kiện DP nhỏ hơn đáng kể so với điều kiện SIC. Kết quả này là phù hợp với kỳ vọng, vì điều kiện DP đặc trưng bởi nhiệt độ và vận tốc không khí cao hơn, đồng thời có cường độ truyền nhiệt từ thành ống lớn hơn. Đáng chú ý, trong điều kiện DP, sự giảm kích thước giọt diễn ra nhanh chóng chỉ sau một đoạn ngắn kể từ khi dòng chảy lõi kết thúc. Hiện tượng này nhiều khả năng bắt

nguồn từ gia tốc lớn mà các giọt phải trải qua do sự cộng hưởng giữa vận tốc phun ban đầu và tốc độ cao của dòng không khí. Trong giai đoạn đầu của quá trình nguyên tử hóa, cơ chế phá vỡ do lực khí động trở nên chi phối, khi vận tốc tương đối giữa không khí và giọt nhiên liệu đạt mức cao. Ngược lại, ở điều kiện SIC, quá trình nguyên tử hóa xảy ra từ từ hơn và theo xu hướng đơn điệu, do vận tốc tương đối giữa không khí và giọt nhiên liệu thấp hơn, dẫn đến gia tốc nhỏ hơn



Hình 9. Vận tốc tương đối giữa không khí và giọt tại DP và SIC



Hình 10. Tốc độ hóa hơi nhiên liệu và các mặt đẳng lượng nhiên liệu tại DP

và quá trình phá vỡ diễn ra kém hiệu quả hơn.

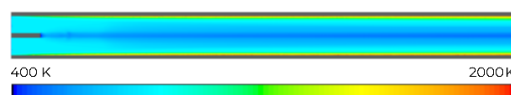
Trong Hình 9, quan sát thấy rằng ở hạ lưu vòi phun nhiên liệu và dọc theo trục trung tâm của ống hóa hơi, vận tốc tương đối của không khí đối với giọt nước tương đối thấp. Điều này đặc biệt rõ ràng trong các kết quả liên quan đến SIC, có thể do sự tác động của vòi phun nhiên liệu và sự tương tác với luồng không khí với các giọt lớn, đặc trưng cho sự phá vỡ chính trong vùng dòng lõi. Thêm vào đó, do hiệu quả phá vỡ khí động học giảm dần dọc theo trục trung tâm của bộ hóa hơi, các giọt lớn tương đối vẫn tồn tại trong vùng này (Hình 8).

b. Quá trình hóa hơi

Do SIC mô phỏng quá trình khởi động động cơ trên mặt đất với nhiệt độ thấp và không có sự truyền nhiệt, quá trình bốc hơi nhiên liệu không được tính đến trong điều kiện này. Vì vậy, các kết quả chỉ áp dụng cho điều kiện DP. Hình 10 làm nổi bật hiện tượng hóa hơi nhiên liệu trong các ống hóa hơi của động cơ tua-bin khí cỡ nhỏ ở điều kiện DP, cho thấy

tốc độ hóa hơi thấp trong vùng lõi gần vòi phun, nơi các giọt quá lạnh để hóa hơi hiệu quả. Sau đó, tốc độ hóa hơi tăng nhanh trong vùng sương ẩm giọt, đặc biệt ở khu vực hình khuyên gần thành ống. Quá trình hóa hơi phụ thuộc chủ yếu vào vận tốc tương đối giữa không khí và giọt nước, là yếu tố chính dẫn đến mô hình hóa hơi quan sát được trong nghiên cứu này.

Hình 10 thể hiện tốc độ hóa hơi nhiên liệu và các bề mặt khác của phần khối lượng nhiên liệu khí tại điều kiện DP (kích thước các bề mặt DPM được hiển thị không thay đổi). Các đường viền nhiệt độ dọc theo mặt cắt dọc của bộ hóa hơi, qua trục trung tâm, được trình bày trong Hình 11. Kết quả cho thấy, nhiệt truyền từ không khí vào các giọt nhiên liệu làm giảm nhiệt độ tổng thể, đặc biệt là gần trục trung tâm của ống hóa hơi. Nhiệt độ cao gần thành ống là do các bức tường này được mô hình hóa với nhiệt độ không đổi, dù mức độ truyền nhiệt cao nhưng nhiệt độ gần thành



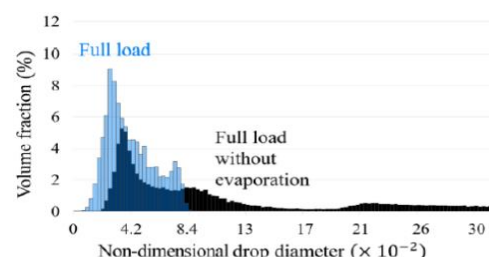
Hình 11. Đường đẳng nhiệt độ dọc theo mặt cắt dọc ống hóa hơi tại DP

vẫn giữ ở mức tương đối cao.

c. Phân bố kích thước giọt

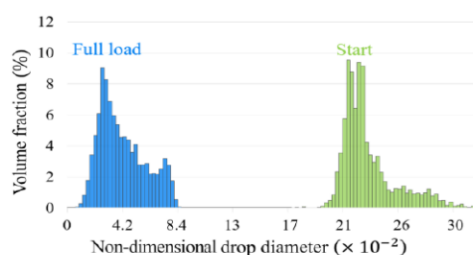
Phân bố kích thước giọt của các tia phun được xác định bằng cách xử lý hậu kỳ các phần tử DPM tại cuối ống hóa hơi, nơi tia phun nhiên liệu thoát ra. Bên cạnh kết quả ở DP và SIC, kết quả cho trường hợp DP không có hóa hơi cũng được thảo luận để làm rõ tầm quan trọng của quá trình hóa hơi. Đường kính trung bình Sauter (SMD) của các tia phun tại điều kiện DP tăng 37% nếu không có hóa hơi, điều này nhấn mạnh ảnh hưởng đáng kể của quá trình hóa hơi đến hiệu suất phân rã. Phân bố kích thước giọt của chế độ DP ở 2 điều kiện có hóa hơi và không hóa hơi thể hiện ở Hình 12.

Kết quả chỉ ra rằng quá trình hóa hơi làm giảm độ biến thiên của phân bố kích thước giọt, như thể hiện trong Hình 12, khi so sánh phân bố giọt có và không



Hình 12. Phân bố kích thước giọt tại DP và trường hợp không có hóa hơi

có hóa hơi. Các giọt lớn trong phân bố không có hóa hơi không xuất hiện trong phân bố có hóa hơi, do tốc độ hóa hơi tăng theo đường kính giọt. Hình 13 so sánh phân bố giọt tại điều kiện DP (có hóa hơi) và SIC, cho thấy các điều kiện khởi động động cơ (SIC) ảnh hưởng mạnh đến hiệu suất phân rã tia phun nhiên liệu, với SMD tại SIC lớn hơn khoảng 7 lần so với DP. Sự chênh lệch này giải thích bởi hiệu suất phân rã kém và thiếu hóa hơi trước tại SIC. Mặc dù cả hai phân bố có độ rộng tương tự, tại DP, quá trình bay hơi làm giảm kích thước giọt lớn, khiến phân bố giọt chặt chẽ hơn.



Hình 13. So sánh phân bố kích thước giọt nhiên liệu tại DP và chế độ không tải SIC

6. Kết luận

Trong nghiên cứu này, quá trình phân rã tia phun và hóa hơi nhiên liệu trong ống hóa hơi của động cơ tua-bin khí cỡ nhỏ được nghiên cứu bằng cách kết hợp giữa phương pháp mô phỏng và thực nghiệm. Các mô phỏng cho thấy giọt nhiên liệu tại điều kiện DP nhỏ hơn các giọt ở điều kiện SIC, và có sự thay đổi đột ngột về kích thước giọt sau khi kết thúc dòng lõi, do gia tốc lớn của giọt. Quá trình hóa hơi chủ yếu phụ thuộc vào vận tốc tương đối giữa không khí và các giọt nhiên liệu, và sự truyền nhiệt từ không khí vào giọt. Các điều kiện khởi động động cơ ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất phân rã nhiên liệu, với đường kính trung bình Sauter tại SIC lớn hơn 7 lần so với DP. Cả kim phun nhiên liệu và hệ thống hóa hơi đều góp phần vào các vấn đề đánh lửa trong quá trình khởi động. Các điều kiện khởi động có thể cải thiện bằng cách tối ưu hóa tỷ lệ vận tốc không khí và giọt nhiên liệu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. A. R. Nascimento et al. (2013), *Micro gas turbine engine: a review*, Progress in gas turbine performance, Vol.125, pp.1-14.
- [2] JetCat. (2024). *P130-RX Specifications*. Available: https://www.jetcat.de/en/productdetails/produkte/jetcat/produkte/RC%20ENGINES/Engines/p130_rx
- [3] M. Benjamin, R. Jensen, and M. Arienti (2010), *Review of atomization: Current knowledge and*

future requirements for propulsion combustors, Atomization Sprays, Vol.20, No.6.

- [4] F. Fuchs, V. Meidinger, N. Neuburger, T. Reiter, M. Zündel, and A. Hupfer (2016), *Challenges in designing very small jet engines-fuel distribution and atomization*, in 16th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery.
- [5] A. H. Lefebvre and V. G. McDonell (2017), *Atomization and sprays*. CRC press.
- [6] Y. Lin, J. Liu, Q. Xu, and W. Wei (2006), *Study on vaporisation rate of a mini T-vaporiser under atmospheric pressure condition*, Journal of Aerospace Power, Vol.21(5).
- [7] A. Burluka and R. Borghi (2001), *Development of a Eulerian model for the "atomization" of a liquid jet*, Atomization sprays, Vol.11, No.6.
- [8] C. W. Hirt and B. D. Nichols (1981), *Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries*, Journal of computational physics, Vol.39, No.1, pp.201-225.
- [9] K. Luo, C. Shao, M. Chai, and J. Fan (2019), *Level set method for atomization and evaporation simulations*, Progress in Energy Combustion Science, Vol.73, pp.65-94.
- [10] L. Luo, G. Wang, and X. Qu (2025), *Review on the Recent Numerical Studies of Liquid Atomization*, Applied Sciences, Vol.15, No.9, p.4928.
- [11] E. Taskinoglu and J. Bellan (2010), *Large Eddy Simulations of Temporal Mixing Layers Under Supercritical Thermodynamic Conditions: O₂/H₂*, in 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, p.206.
- [12] H. N. Huu, Q. N. Quoc, and P. P. Xuan (2025), *Design and operational evaluation of the combustion chamber of commercial Jetcat P130RX microturbine*, Hội nghị khoa học về công nghệ thông tin, điện tử, Tự động hóa, Khoa học và công nghệ vũ trụ, Hà Nội.
- [13] J. C. Lasheras and E. Hopfinger (2000), *Liquid jet instability and atomization in a coaxial gas stream*, Annual review of fluid mechanics, Vol.32, No.1, pp.275-308.

Ngày nhận bài:	29/05/2025
Ngày nhận bản sửa:	28/06/2025
Ngày duyệt đăng:	09/07/2025