

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG SỐ DÒNG PHUN NHIÊN LIỆU CNG RỐI XOÁY TRONG BUỒNG ĐỐT LÒ HƠI

A NUMERICAL SIMULATION RESEARCH OF SWIRLING TURBULENT CNG FLOW IN BOILER COMBUSTION CHAMBERS

Nguyễn Thanh Hào

Khoa Cơ khí Công nghệ, Trường Đại học Nông Lâm Thành phố Hồ Chí Minh

Email: nt.hao@hcmuaf.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày một ứng dụng của phương pháp mô phỏng số dòng phun nhiên liệu CNG rối xoáy trong buồng đốt lò hơi dùng để tính toán kích thước buồng đốt mà trước đây khả năng nghiên cứu duy nhất và là cơ sở để thiết kế buồng đốt đều bằng thực nghiệm, điều này đòi hỏi tiêu tốn nhiều công sức, chi phí và phương tiện thực hiện mô hình. Các nghiên cứu mô phỏng số này cho phép xác định các thông số hình học cơ bản của ngọn lửa, dự báo giới hạn thay đổi của các thông số, đảm bảo sự tối ưu và hiệu quả của quá trình cháy.

Từ khóa: CNG; Lò hơi; Dòng phun rối xoáy; Quá trình cháy; Buồng đốt.

ABSTRACT

The article presents an application of the numerical simulation method for swirling turbulent CNG fuel jets in a boiler combustion chamber used to calculate the combustion chamber size, which previously could only be researched and served as the basis for designing the combustion chamber entirely through experiments, which required a lot of effort, cost, and equipment to carry out the modeling. These numerical simulation studies allow the determination of the basic geometric parameters of the flame, predict the range of parameter variations, and ensure the optimization and efficiency of the combustion process.

Keywords: CNG; Boiler; Swirling turbulent flow; Combustion; Chamber.



1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nhiên liệu CNG là hỗn hợp chất khí có khả năng cháy, thành phần chủ yếu là các hydrocarbon. Cùng với than đá và dầu mỏ, khí thiên nhiên được xếp vào nhóm nhiên liệu hóa thạch. Thành phần chính của CNG là metan (CH_4), chiếm 70 ÷ 90% thể tích. Ngoài ra, còn có etan (C_2H_6), propan (C_3H_8), butan (C_4H_{10}), pentan (C_5H_{12}) và các ankan khác. CNG thường được tìm thấy cùng với các mỏ dầu trong vỏ Trái Đất, được khai thác và xử lý để trở thành nhiên liệu, hiện cung cấp khoảng 25% nhu cầu năng lượng toàn cầu.

Ảnh hưởng của hiệu ứng xoáy lên dòng lưu chất đã được biết đến từ nhiều năm trước. Các nghiên cứu về dòng xoáy được ứng dụng trong nhiều ngành kỹ thuật như trong cyclone, các thiết bị phun dùng trong nông nghiệp, các thiết bị trao đổi nhiệt [1], [2]... Tuy nhiên, các ứng dụng trên cho hiệu quả không cao như mong muốn vì trước đây khả năng nghiên cứu duy nhất và là cơ sở để thiết kế các thiết bị đều bằng thực nghiệm, điều này đòi hỏi tiêu tốn nhiều công sức và phương tiện thực hiện mô hình. Ứng dụng quan trọng nhất của dòng xoáy trong công nghiệp là các thiết bị buồng đốt của turbines, lò hơi, động cơ đốt, lò nung trong công nghiệp... Thông thường dòng xoáy có tác dụng làm tăng mức độ rối của nhiên liệu trong buồng đốt, nên hiệu quả hòa trộn giữa không khí và nhiên liệu tăng, làm cho quá trình cháy ổn định và cháy sạch.

Số lượng và khối lượng các nghiên cứu bằng thực nghiệm về quá trình cháy của nhiên liệu CNG trong thiết bị vòi phun rối xoáy có thể được giảm thiểu đáng kể và việc thiết kế chế tạo các thiết bị buồng đốt khí có thể được đơn giản hơn nhờ vào các tính toán kiểm chứng. Mô hình số của quá trình cháy khí thiên nhiên trong thiết bị vòi phun rối xoáy hoàn toàn có thể thực

hiện được bằng các phương pháp tính toán hiện đại như phương pháp sai phân hữu hạn hoặc phương pháp khối hữu hạn với sự hỗ trợ của máy tính. Các mô hình tính toán này cho phép xác định các thông số hình học cơ bản của ngọn lửa, dự báo giới hạn thay đổi của các thông số, đảm bảo sự tối ưu và hiệu quả của quá trình cháy.

2. MÔ HÌNH TOÁN

Quá trình cháy nhiên liệu CNG xuất phát từ các phản ứng hóa học với giả thiết va chạm giữa các phân tử khí là không đáng kể. Do đó, hệ phương trình cháy chính là hệ phương trình động học của các phản ứng hóa học, phương trình liên tục, phương trình bảo toàn năng lượng, phương trình cân bằng moment động lượng. Hệ phương trình toán mô tả quá trình cháy của dòng phun khí thiên nhiên rối xoáy không đẳng nhiệt như sau [3], [4]:

- Phương trình liên tục:

$$\left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\rho \cdot r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho \cdot r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right] + \Omega = 0 \quad (1)$$

- Phương trình cân bằng moment động lượng:

$$r^2 \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\Omega}{r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\Omega}{r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[r^3 \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu}{r} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial r} \left[r^3 \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\mu}{r} \right) \right] - r \cdot \frac{\partial}{\partial r} (\rho \cdot w^2) - r \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{u^2 + v^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial r} + r^2 \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u^2 + v^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

- Phương trình bảo toàn năng lượng:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(r \cdot w \cdot \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot w \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left[r^3 \cdot \mu \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{w}{r} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial r} \left[r^3 \cdot \mu \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{w}{r} \right) \right] = 0 \quad (3)$$

- Phương trình cân bằng hỗn hợp cháy:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(f \cdot \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(f \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu}{P} \cdot r \cdot \frac{\partial f}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\mu}{P} \cdot r \cdot \frac{\partial f}{\partial r} \right) = 0 \quad (4)$$

Trong đó mỗi quan hệ giữa các thành

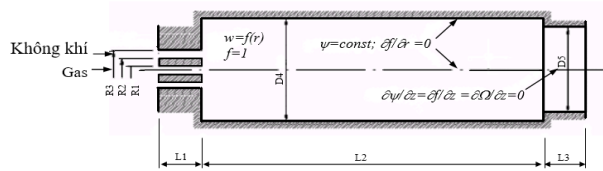
phần vận tốc u, v với hàm dòng ψ được xác định như sau [1]:

$$u = \frac{1}{\rho \cdot r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial r}; v = -\frac{1}{\rho \cdot r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (5)$$

Các phương trình này được biến đổi về dạng phương trình của đường dòng ψ và cường độ xoáy Ω , cho ta phương trình vi phân tổng quát sau [4]:

$$a_\varphi \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\varphi \cdot \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\varphi \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[b_\varphi \cdot r \cdot \frac{\partial (c_\varphi \cdot \varphi)}{\partial z} \right] - \frac{\partial}{\partial r} \left[b_\varphi \cdot r \cdot \frac{\partial (c_\varphi \cdot \varphi)}{\partial r} \right] + r \cdot d_\varphi = 0 \quad (6)$$

Điều kiện biên:

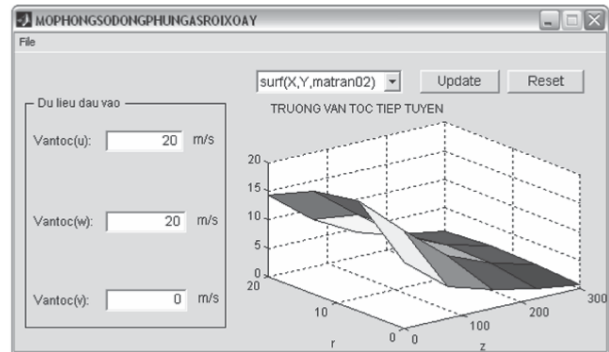


Hình 1. Các điều kiện biên

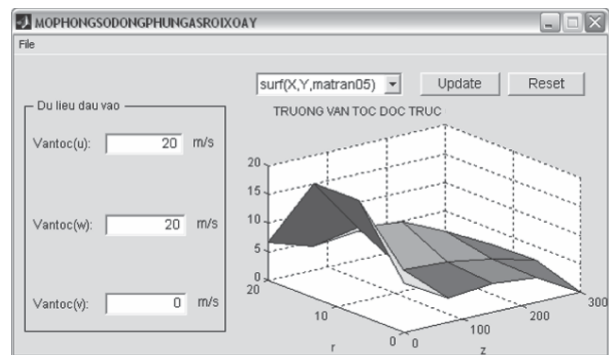
3. MÔ PHỎNG SỐ

Bằng phương pháp khối phần tử hữu hạn sau khi rời rạc phương trình tổng quát (6), ta được hệ phương trình đại số tuyến tính. Sau đó, ta sử dụng thuật toán ma trận ba đường chéo kết hợp với phương pháp lặp để giải hệ phương trình đại số tuyến tính. Việc tính toán được tiến hành trên máy tính, chương trình tính toán được xây dựng bằng phần mềm Matlab. Trong đó, giá trị của các thông số cơ bản chính là giá trị tại các điểm nút của lưới sai phân trong quá trình tính toán giải hệ phương trình dòng phun nhiên liệu CNG rời xoáy.

Kết quả tính toán trên hình 2 và hình 3 cho thấy đồ thị phân bố vận tốc u theo phương dọc trục và vận tốc w theo phương tiếp tuyến của dòng phun nhiên liệu CNG rời xoáy không phải là những đường thẳng mà nó là những đường cong, càng ra xa thì vận tốc của dòng phun càng giảm.



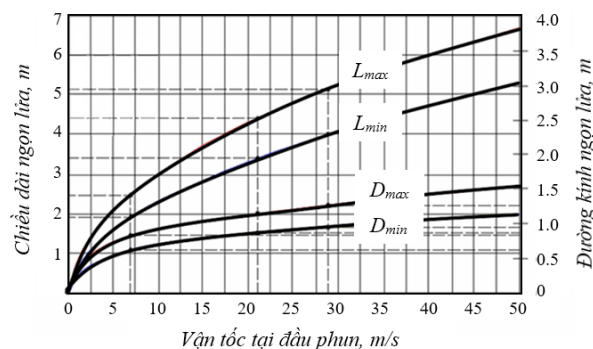
Hình 2. Trường phân bố vận tốc tiếp tuyến nhiên liệu CNG



Hình 3. Trường phân bố vận tốc dọc trục nhiên liệu CNG

Từ các trường phân bố vận tốc được mô phỏng trên đây, ứng với mỗi giá trị vận tốc ban đầu (u_0, w_0, v_0) và hệ số cường độ xoáy S , ta xác định được các thông số hình học đó là chiều dài ngọn lửa L và đường kính ngọn lửa D , điều này cho phép ta chọn được thông số hình học tối ưu nhất cho buồng đốt nhiên liệu CNG rời xoáy đảm bảo cho quá trình cháy sạch.

Bằng cách thay đổi hệ số cường độ xoáy S từ 0 đến 1.0, ta tìm được mối quan hệ giữa thông số động học và thông số hình học như minh họa trong hình 4. Quá trình tính toán cho thấy khi hệ số xoáy S tăng thì chiều dài L giảm và đường kính D tăng, quá trình hòa trộn giữa nhiên liệu CNG và không khí đồng đều, do đó quá trình cháy càng mãnh liệt và cháy hoàn toàn.



Hình 4. Đồ thị quan hệ giữa vận tốc và kích thước

Như vậy, ứng với vận tốc phun nhiên liệu CNG thiết kế cho trước, bằng cách tra đồ thị quan hệ giữa vận tốc và kích thước trong hình 5, ta có thể xác định được kích thước ngọn lửa trong buồng đốt. Từ đó suy ra kích thước thiết kế buồng đốt tương ứng đảm bảo cho quá trình cháy sạch đối với thiết bị đốt nhiên liệu CNG rối xoáy.

4. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu cho thấy căn cứ vào mô phỏng số, ta có thể thay đổi một cách dễ dàng các thông số hình học của buồng đốt. Trong khi đối với phương pháp nghiên cứu thực nghiệm thì công việc này đòi hỏi tiêu tốn rất nhiều thời gian và chi phí.

Mô phỏng số dòng phun nhiên liệu CNG rối xoáy có thể cung cấp thông tin tương đối chính xác về các thông số động học và hình học của thiết bị trong lĩnh vực kỹ thuật buồng đốt. Từ đó có thể cải tiến các chi tiết liên quan đảm bảo cho quá trình cháy sạch. ❖

Ngày nhận bài: 16/3/2026

Ngày phản biện: 24/3/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. A. K. Gupta, D. G. Lilley, N. Syred, "Swirl Flows". Department of Mechanical Engineering University, 1984.
- [2]. Dobrin Toporov, Detelin Markov, Dobrin Toporov, Stefan Yotovsk, "CFD Support in Combustion Modelling". Computational Fluid Dynamics Center - Technical University Sofia, 1997.
- [3]. Nguyễn Thanh Hào, "Ứng dụng phương pháp khối hữu hạn giải hệ phương trình dòng phun rối xoáy hai pha không đẳng nhiệt trong buồng đốt". Tạp chí Khoa học và Công nghệ, số 58/2006.
- [4]. Nguyễn Thanh Hào, "Study the process of burning FO fuel in swirling turbulent combustion chamber". M.Sc, HCMUT, 2004.
- [5]. Frank M. Kelso, "A Primer on Matlab". Mechanical Engineering Department University of Minnesota, 2000.
- [6]. Jiri Brada, "Mathematical Model of Two-Phase Flows". Glass Service, Inc., Vsetin, Czech Republic, 2001.
- [7]. John D. Anderson, "JR. Computational Fluid Dynamics The Basics With Applications". McGraw Hill International Editions, 1995.