

ĐẶC TÍNH LƯU LƯỢNG VÀ ĐỘ NHẠY HỆ THỐNG ĐO KHÍ NÉN: NGHIÊN CỨU CFD

FLOW RATE AND SENSITIVITY CHARACTERISTICS OF PNEUMATIC GAUGES: A CFD STUDY

Nguyễn Hoàn, Lê Viết Khải, Bành Quốc Nguyên*, Trần Anh Sơn, Hồ Minh Tuấn

Bộ môn Chế tạo máy, Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa,

Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

*Email: bqnguyen@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Hệ thống đo khí nén đóng vai trò thiết yếu trong đo không tiếp xúc, chuyển đổi kết quả biến thiên theo khoảng cách thành thay đổi lưu lượng thể tích. Nghiên cứu này sử dụng Động lực học chất lỏng tính toán (CFD) để khảo sát độ nhạy của hệ thống, tập trung vào ảnh hưởng của khoảng cách đầu phun đến bề mặt và ba tỷ lệ đường kính D/d (0.25, 0.5, 0.705) lên phản ứng lưu lượng thể tích. Mô hình CFD được xây dựng với mô hình tính toán dòng chảy rối SST $k - \omega$ (SST $k - \omega$). Kết quả mô phỏng sẽ làm rõ mối quan hệ phi tuyến tính giữa lưu lượng thể tích và chiều cao khe hở cho từng tỷ lệ D/d , từ đó xác định phạm vi đo tuyến tính và vùng hoạt động tối ưu của hệ thống. Việc đánh giá có hệ thống này cung cấp cái nhìn chi tiết để cải thiện thiết kế hệ thống đo khí nén, góp phần nâng cao độ nhạy, độ ổn định và khả năng lặp lại trong các ứng dụng công nghiệp đòi hỏi độ chính xác cao.

Từ khóa: Đo khí nén; Lưu lượng thể tích; Mô phỏng CFD; Mô hình dòng chảy rối; Chiều cao khe hở; Phân tích độ nhạy.

ABSTRACT

Pneumatic measuring devices are essential for non-contact dimensional measurement, converting dimensional variations into volume flow rate changes. This study utilizes Computational Fluid Dynamics (CFD) to investigate system sensitivity, focusing on the influence of nozzle-to-plate distance and three D/d diameter ratios (0.25, 0.5, 0.705) on the volume flow rate response. A CFD model was developed using the SST $k - \omega$ (SST $k - \omega$) turbulence model. Simulation results will clarify the nonlinear relationship between volume flow rate and gap height for each D/d ratio, thereby identifying the linear measurement range and optimal operating zone of the system. This systematic evaluation provides valuable insight for improving air gauge design, contributing to enhanced sensitivity, stability, and repeatability in high-precision industrial applications.

Keywords: Air gauging; Volume flow rate; CFD simulation; Turbulence modeling; Gap height; Sensitivity analysis.

1. TỔNG QUAN

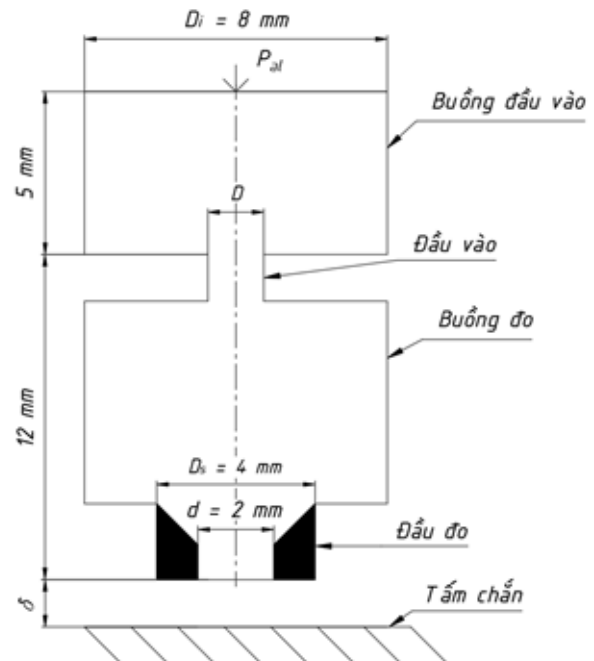
Hệ thống đo khí nén được sử dụng rộng rãi trong đo lường kích thước không tiếp xúc, nhưng việc cải thiện độ chính xác gặp nhiều thách thức do mối quan hệ phụ thuộc giữa phạm vi đo và độ nhạy [1-8]. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng ảnh hưởng của biên dạng hệ thống đo, đặc biệt là tỷ lệ đường kính đầu phun (D/d), ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất [8-10]. Nghiên cứu này sử dụng mô phỏng Động lực học chất lỏng tính toán (CFD) để khảo sát độ nhạy của hệ thống đo khí nén. Cụ thể, chúng tôi phân tích ảnh hưởng của khoảng cách giữa đầu phun và bề mặt đo, cùng với ba tỷ lệ D/d khác nhau (0.25, 0.5, 0.705), đến phản ứng lưu lượng thể tích. Mô hình CFD được xây dựng dựa trên các kích thước đã được xác thực [7, 9], nhằm cung cấp cái nhìn sâu sắc phục vụ cho việc cải tiến thiết kế và nâng cao hiệu suất tổng thể của hệ thống.

2. PHƯƠNG PHÁP

2.1. Đặt vấn đề

Mô hình mô phỏng được thực hiện dựa trên mô hình hệ thống đo khí nén từ các nghiên cứu trước [7, 9], nhằm khảo sát ảnh hưởng của ba tỷ lệ đường kính đầu phun D/d khác nhau (0.25, 0.5 và 0.705) đến đặc tính đo lường của hệ thống. Trong mô hình, khí nén được cấp vào hệ thống ở áp suất không đổi 3 bar. Đầu đo có đường kính ngoài D_s là 4 mm và đường kính trong d là 2 mm, đường kính đầu vào D (0.25; 0.5; 0.705) trong khi buồng vào có đường kính D_i là 8 mm. Để đảm bảo độ tin cậy của mô hình CFD, kết quả mô phỏng ban đầu được xác thực bằng dữ liệu thực nghiệm về lưu lượng thể tích thu được ở cùng điều kiện áp suất (3 bar) và khoảng cách từ 0 đến 1000 μm [7]. Sau bước xác thực, các đặc tính lưu lượng thể tích tĩnh sẽ

được phân tích trong dải khoảng cách từ đầu phun đến bề mặt đo δ từ 0 đến 1000 μm , nhằm đánh giá độ nhạy của hệ thống ứng với từng tỷ lệ D/d . Phân tích này hướng tới việc cung cấp các hiểu biết chuyên sâu để tối ưu hóa thiết kế và nâng cao độ chính xác trong đo lường của hệ thống khí nén.



Hình 1. Biên dạng hình học

2.2. Phương pháp số

Trong nghiên cứu này, mô hình dòng chảy rối SST $k - \omega$ của Menter [11] được lựa chọn nhờ khả năng kết hợp ưu điểm của mô hình $k - \omega$ trong vùng gần tường và mô hình $k - \epsilon$ trong vùng xa tường. Nhờ tính ổn định cao và độ chính xác trong các bài toán dòng chảy phức tạp, mô hình SST $k - \omega$ được xem là lựa chọn phù hợp cho mô phỏng hệ thống đo khí nén trong nghiên cứu này.

2.3. Cài đặt mô phỏng

Quy trình phân tích CFD bắt đầu với

việc xây dựng hình học và tạo lưới. Hình học của mô hình máy đo khí nén được thiết kế bằng phần mềm CAD, đảm bảo chính xác các thông số kích thước của đầu phun tương ứng với từng tỷ lệ đường kính D/d được khảo sát. Toàn bộ miền tính toán được chia lưới bằng lưới cấu trúc, trong đó lưới được tinh chỉnh rất mịn tại các vùng giữa đầu phun và bề mặt đo (tấm phẳng) nhằm nắm bắt đầy đủ các hiện tượng gần tường, thỏa mãn $y^+ \sim 1$ đảm bảo yêu cầu tính toán cho mô hình dòng chảy rối được lựa chọn. Không khí được giả định là khí lý tưởng, với độ nhớt động học được lấy là $\mu = 1.752 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$. Các điều kiện biên được thiết lập như sau: đầu vào áp suất tổng không đổi 3 bar (BC1), điều kiện tường không trượt áp dụng cho cả tường của hệ thống đo và tấm phẳng (BC2, BC4), và đầu ra (BC3). Để giảm chi phí tính toán, mô hình được giả định đối xứng trục (BC5), như trình bày trong Hình 2. Dòng khí trong buồng là khí nén, tuân theo định luật khí lý tưởng và ổn định theo thời gian (steady-state).



Hình 2. Miền tính toán

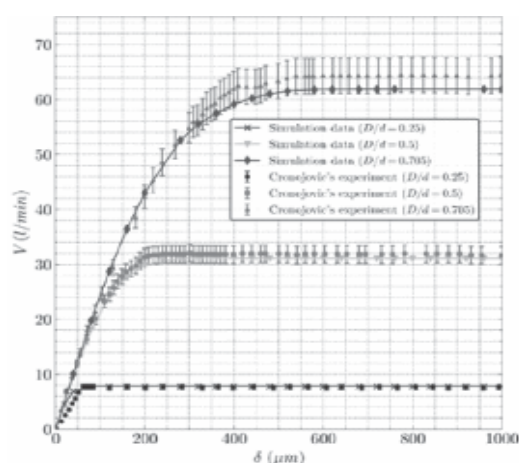
Bộ giải CFD thực hiện giải các phương trình chi phối thông qua quy trình lặp hội tụ, với quá trình hội tụ được giám sát thông qua biểu đồ phần dư. Giai đoạn xử lý hậu kỳ bao gồm việc trích xuất các biến dòng chảy quan trọng như lưu lượng thể tích và phân bố vận tốc để phục vụ phân tích. Các mô phỏng được thực hiện trên máy trạm HP Z6 G4 với bộ xử lý Intel Xeon Gold 6146 và bộ nhớ RAM 128 GB. Thời gian tính toán trung bình cho mỗi

trường hợp khoảng 2 giờ 30 phút với kích thước lưới gần 800,000 điểm cho trường hợp $D/d = 0.25$, nhưng đối với trường hợp $D/d = 0.5$ và 0.705 cần tính toán gradient của sóng xung kích (shock wave) tại vị trí đầu vào nên cần chia lưới mịn, do đó tổng số lưới cần là xấp xỉ 3,600,000 điểm, với thời gian giải gần 8 giờ 30 phút. Tất cả điểm lưới gần tường trong các mô phỏng đều đạt $y^+ \sim (1 - 5)$ tại những điểm có gradient lớn.

Độ tin cậy của mô hình được đảm bảo thông qua xác minh và xác thực. Xác minh bao gồm kiểm tra chất lượng lưới và đánh giá hợp lý các điều kiện biên. Xác thực được thực hiện bằng cách so sánh kết quả mô phỏng (lưu lượng thể tích) với dữ liệu thực nghiệm từ tài liệu [7] trong điều kiện cấp áp suất 3 bar và khoảng cách đầu phun – bề mặt từ 0 đến 1000 μm . Phân tích sâu hơn chỉ được tiến hành khi kết quả mô phỏng thể hiện độ tin cậy thỏa đáng với dữ liệu tham chiếu và đạt được nghiệm hội tụ ổn định.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Xác thực



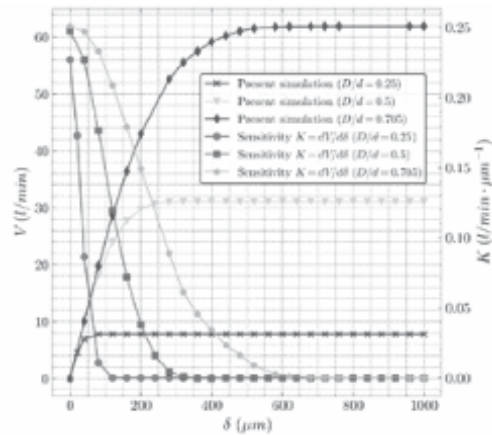
Hình 3. Xác thực kết quả mô phỏng về lưu lượng dòng chảy V với kết quả thực nghiệm của Crnojevic [7]

Độ tin cậy của mô hình được đảm bảo thông qua quá trình xác thực kỹ lưỡng. Mô hình CFD hiện tại đã được xác thực bằng cách so sánh lưu lượng thể tích V từ mô phỏng với dữ liệu thực nghiệm từ nghiên cứu của Crnojevic [7]. Hình 3 thể hiện sự tương đồng tốt giữa kết quả mô phỏng CFD hiện tại và dữ liệu thực nghiệm trên toàn bộ dải khoảng cách từ đầu phun đến bề mặt (δ) cho cả ba tỷ lệ đường kính D/d (0.25, 0.5, 0.705). Mô phỏng đã phản ánh đúng mối quan hệ phi tuyến đặc trưng giữa lưu lượng thể tích và khoảng cách, bao gồm cả giai đoạn tăng nhanh ban đầu và sau đó là giai đoạn ổn định. Sự tương quan chặt chẽ này khẳng định độ tin cậy của mô hình CFD hiện tại trong việc tái tạo đặc tính thực nghiệm của hệ thống đo khí, xác nhận tính phù hợp của nó cho các phân tích sâu hơn về đặc tính lưu lượng và độ nhạy. Ước tính độ không chắc chắn đo lường 5% của dữ liệu thực nghiệm [7] có thể giải thích cho các sai lệch nhỏ quan sát được.

3.2. Độ nhạy

Hình 4 minh họa đồng thời đặc tính tĩnh và độ nhạy $K = dV/d\delta$ của hệ thống đo khí nén đối với ba tỷ lệ đường kính khác nhau ($D/d = 0.25, 0.5, 0.705$). Đối với lưu lượng thể tích, tất cả các tỷ lệ D/d đều cho thấy V tăng nhanh khi khoảng cách δ tăng từ 0, sau đó đạt đến một giá trị bão hòa. Lưu lượng bão hòa tăng lên đáng kể khi tỷ lệ D/d tăng. Về độ nhạy, K đạt giá trị cao nhất tại khoảng cách rất nhỏ và giảm dần khi δ tăng lên. Phân tích cho thấy tỷ lệ D/d ảnh hưởng rõ rệt đến đặc tính độ nhạy: các tỷ lệ D/d nhỏ hơn (ví dụ: 0.25) mang lại độ nhạy đỉnh cao hơn nhưng có dải đo hiệu quả hẹp hơn (độ nhạy giảm nhanh về 0). Ngược lại, các tỷ lệ D/d lớn hơn (ví dụ: 0.705) có độ nhạy đỉnh thấp hơn nhưng duy trì khả năng đo lường hiệu quả trên một dải khoảng cách rộng hơn. Kết quả này cung cấp những hiểu biết chuyên sâu

có giá trị cho quá trình tối ưu hóa thiết kế máy đo khí nén, hướng tới sự cân bằng giữa độ nhạy và phạm vi đo.



Hình 4. Đặc tính lưu lượng và độ nhạy theo khoảng cách đầu phun bề mặt cho đường kính D/d khác nhau

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã ứng dụng mô phỏng Động lực học chất lỏng tính toán CFD với mô hình dòng chảy rối SST $k - \omega$ để khảo sát độ nhạy của hệ thống đo khí nén, tập trung vào ảnh hưởng của khoảng cách đầu phun đến bề mặt δ và ba tỷ lệ đường kính ($D/d = 0.25, 0.5, 0.705$) đến lưu lượng thể tích. Kết quả mô phỏng đã tái hiện chính xác dữ liệu thực nghiệm thu được từ nghiên cứu đã công bố trước đó. Bên cạnh đó, mô phỏng đã cho thấy rõ mối quan hệ phi tuyến tính giữa lưu lượng thể tích và chiều cao khe hở cho từng tỷ lệ D/d . Phân tích độ nhạy chỉ ra rằng tỷ lệ D/d nhỏ hơn mang lại độ nhạy cao hơn nhưng dải đo hiệu quả hẹp hơn, trong khi tỷ lệ D/d lớn hơn duy trì khả năng đo trên một dải với khoảng cách rộng hơn. Việc đánh giá này cung cấp cái nhìn chuyên sâu để cải thiện thiết kế hệ thống đo khí nén, góp phần nâng cao độ nhạy, độ ổn định và khả năng lặp lại trong các ứng dụng công nghiệp đòi hỏi độ chính xác cao.



Lời cảm ơn:

Nghiên cứu được tài trợ bởi Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM trong khuôn khổ đề tài mã số To-CK-2024-02. Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: **12/9/2025**

Ngày phản biện: **01/10/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. M. Rucki, “Recent Development of Air Gauging in Industry 4.0 Context”. *Sensors* 23 (2023) 2122. <https://doi.org/10.3390/s23042122>.
- [2]. R. Thomson, “In-Process Inspection with Air Gauges”. In: S. Murphy (Ed.), *In-Process Measurement and Control*, 1st ed., Routledge, New York, 1990.
- [3]. P. Koshy, D. Grandy, F. Klocke, “Pneumatic non-contact topography characterization of finish-ground surfaces using multivariate projection methods”. *Precis Eng* 35 (2011) 282-288. <https://doi.org/10.1016/J.PRECISIONENG.2010.11.001>.
- [4]. D. Grandy, P. Koshy, F. Klocke, “Pneumatic non-contact roughness assessment of moving surfaces”. *CIRP Annals* 58 (2009) 515-518. <https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2009.03.121>.
- [5]. C.J. Jermak, M. Jakubowicz, M. Wieczorowski, M. Rucki, “Fast and Precise Non-Contact Measurement of Cylindrical Surfaces with Air Gauges”. *Materials* 14 (2021) 3728. <https://doi.org/10.3390/ma14133728>.
- [6]. K. Khawaja, L. Seneviratne, K. Althoefer, “Wheel-tooling gap measurement system for ConformTM extrusion machinery based on a capacitive sensor”. *J. Manuf. Sci. Eng.* 127 (2005). <https://doi.org/10.1115/1.1870004>.
- [7]. C. Crnojevic, G. Roy, A. Bettahar, P. Florent, “The Influence of the Regulator Diameter and Injection Nozzle Geometry on the Flow Structure in Pneumatic Dimensional Control Systems”. *J. Fluids Eng.* 119 (1997) 609-615. <https://doi.org/10.1115/1.2819288>.
- [8]. M. Jakubowicz, “Accuracy of roundness assessment using air gauge with the slot-shaped measuring nozzle”. *Measurement* 155 (2020) 107558. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107558>.
- [9]. S.C.M. Yu, H.J. Poh, C.P. Tso, “Numerical simulation on the flow structure around the injection nozzles for pneumatic dimensional control systems”. *J. Fluids Eng.* 122 (2000) 735-742. <https://doi.org/10.1115/1.1319497>.
- [10]. M. Rucki, “Step response of the air gauge”. *Metrology and Measurement Systems* 14 (2007) 429.
- [11]. F.R. Menter, R. Sechner, A. Matyushenko, “Best Practice: RANS Turbulence Modeling in ANSYS CFD”, 2021. <https://www.ansys.com/resource-center/technical-paper/best-practice-rans-turbulence-modeling-in-ansys-cfd>.