

ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP SỐ PHÂN TÍCH ẢNH HƯỞNG CỦA BIÊN DẠNG VÒI PHUN ĐẾN ĐẶC TÍNH LÀM VIỆC EJECTOR

USING OF THE NUMERICAL METHOD TO ANALYZE INFLUENCE OF THE NOZZLE GEOMETRY ON EJECTOR PERFORMANCE

Nguyễn Chí Công, Nguyễn Mạnh Nền, Nguyễn Đức Bình

Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email: congnc.vck@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo sử dụng phương pháp số khảo sát đặc tính làm việc của ejector – một thiết bị phổ biến trong nhiều ngành công nghiệp như hệ thống điều hòa không khí HVAC, năng lượng, và xử lý nước thải. Ejector hoạt động theo nguyên lý sử dụng một dòng chảy chất lỏng hoặc khí vận tốc lớn để hút và hòa trộn với dòng chảy thứ cấp, tạo ra dòng hỗn hợp với vận tốc, áp suất, và tỷ lệ pha phù hợp. Bài báo tập trung phân tích ảnh hưởng của biên dạng của vòi phun sơ cấp (đường kính đầu ra vòi phun, chiều dài ống khuếch tán, áp suất dòng sơ cấp) đến đặc tính thủy động lực học của ejector. Kết quả tính toán mô phỏng số cho thấy tỷ số hòa trộn của ejector tăng nhanh khi đường kính đầu ra của vòi phun sơ cấp tăng, sau đó giảm khi đường kính đầu ra của vòi phun vượt quá một giá trị xác định. Do đó, tồn tại một khoảng tối ưu của đường kính đầu ra vòi phun sơ cấp, tại đó bộ phun đạt hiệu suất tốt nhất. Ngoài ra, kết quả tính toán mô phỏng số cũng chỉ ra rằng chiều dài ống khuếch tán có ảnh hưởng tương đối nhỏ đến hiệu suất của ejector. Tỷ số hòa trộn ban đầu tăng chậm khi chiều dài phần khuếch tán tăng đến một giá trị tối đa, sau đó giảm dần do lực cản ma sát dòng chảy tăng lên. Vì vậy, cũng tồn tại một giá trị tối ưu cho chiều dài ống khuếch tán, tại đó hiệu suất hòa trộn của ejector là tốt nhất. Kết quả nghiên cứu của bài báo là cơ sở lý thuyết tính toán thiết kế ejector có hiệu suất cao.

Từ khóa: Thiết bị hòa trộn; Ejector; CFD.

ABSTRACT

The paper employs numerical methods to investigate the operating characteristics of an ejector – a device widely used in various industries such as HVAC systems, energy, and wastewater treatment. The ejector operates based on the principle of using a high-velocity liquid or gas flow to entrain and mix with a secondary flow, generating a mixture with appropriate velocity, pressure, and phase ratio. This study focuses on analyzing the influence of the primary nozzle profile (nozzle exit diameter, diffuser length, and primary flow pressure) on the hydrodynamic characteristics of the ejector. Numerical simulation results indicate that the ejector's mixing ratio increases rapidly as the primary nozzle exit diameter increases but then decreases when the nozzle exit diameter exceeds a certain threshold. Therefore, there exists an optimal range for the primary nozzle exit diameter at which the ejector achieves its best performance. Additionally, the simulation results

reveal that the diffuser length has a relatively minor impact on the ejector's efficiency. The mixing ratio initially increases slowly as the diffuser length extends to a maximum value, after which it gradually decreases due to increased flow frictional resistance. Consequently, there is also an optimal diffuser length at which the ejector's mixing efficiency is maximized. The results of this study provide a theoretical foundation for designing high-performance ejectors.

Keywords: Mixing equipment; Ejector; CFD.

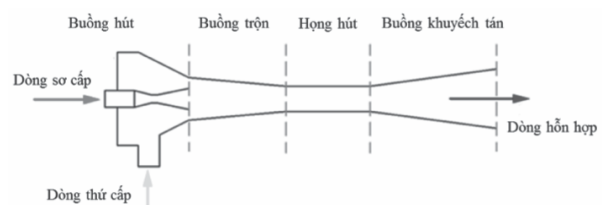
1. GIỚI THIỆU CHUNG

Trong nhiều hệ thống công nghiệp, ejector (hay còn gọi là thiết bị hòa trộn) đóng vai trò quan trọng nhờ khả năng chuyển đổi năng lượng của dòng chảy có động năng lớn để hút và hòa trộn với dòng chảy khác có động năng nhỏ hơn, từ đó tạo ra dòng chảy có áp suất, lưu lượng, và tỷ lệ hòa trộn giữa các pha mong muốn. Ejector được ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống điều hòa không khí (HVAC), sản xuất năng lượng, xử lý nước thải, và công nghiệp hóa chất... [1, 2]. Tuy nhiên, việc thiết kế và tối ưu hóa ejector nhằm đạt hiệu suất cao vẫn là một thách thức lớn do đặc tính thủy động lực học của thiết bị này phụ thuộc vào nhiều yếu tố phức tạp, bao gồm biên dạng hình học của ejector, các thông số đầu vào của dòng chảy và điều kiện vận hành. Bài báo này tập trung vào việc áp dụng phương pháp số (Computational Fluid Dynamics - CFD), phân tích ảnh hưởng tỷ số đường kính γ_d , và một số yếu tố vận hành đến hiệu suất làm việc của ejector. Các kết quả tính toán thu được trong quá trình mô phỏng số cho biết cấu trúc chi tiết của dòng chảy, phân bố áp suất, phân bố pha bên trong ejector, và cho biết các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu suất của thiết bị. Từ đó, nhóm tác giả xác định được kích thước tối ưu của vòi phun sơ cấp góp phần cải thiện hiệu suất làm việc của ejector.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Cấu tạo và nguyên lý làm việc của ejector

Hình 1 là cấu tạo của một ejector dùng để hòa trộn hỗn hợp hơi của hai chất lỏng (Steam Ejector) điển hình, thông thường nó bao gồm bốn bộ phận chính: vòi phun sơ cấp, buồng hút, buồng hòa trộn và buồng khuếch tán. Hơi sơ cấp có nhiệt độ và áp suất cao sẽ giãn nở và tăng tốc qua vòi phun sơ cấp, thường là một vòi phun có biên dạng như ống Laval. Quá trình này chuyển đổi năng lượng áp suất của hơi sơ cấp thành năng lượng động học, làm cho hơi sơ cấp thoát ra với tốc độ cao, tạo ra vùng áp suất thấp tại miệng vòi phun. Áp suất thấp tại miệng vòi phun sơ cấp, kết hợp với hiệu ứng trượt giữa hơi sơ cấp và hơi thứ cấp làm cho chất lỏng thứ cấp bị hút vào buồng làm việc của ejector. Dòng tia sau khi ra khỏi vòi phun sơ cấp gây ra nhiễu động mạnh trong buồng hút, dẫn đến sự hòa trộn, trao đổi động lượng và năng lượng giữa hai dòng chất lỏng.



Hình 1. Cấu tạo của Ejector phun hơi

Sự trao đổi này làm giảm động năng của dòng sơ cấp và tăng động năng của dòng thứ cấp. Sau đó, hai dòng chất lỏng hòa trộn với nhau thành một dòng duy nhất trong buồng trộn. Dòng chất lỏng hỗn hợp tiếp tục bị giảm tốc trong khuếch tán, và động năng của nó được chuyển đổi thành áp năng. Cuối cùng, dòng

chất lỏng hỗn hợp thoát ra khỏi ejector với một áp suất xác định [3-5]. Để thuận tiện trong quá trình khảo sát đặc tính thủy động lực học của ejector, ta xét hai thông số đặc trưng là tỷ lệ hòa trộn ω và tỷ số đường kính γ_d được định nghĩa như sau:

$$\omega = \frac{m_s}{m_p} \quad (1)$$

$$\gamma_d = \frac{d_1}{d_0} = \sqrt{\frac{A_1}{A_0}} \quad (2)$$

Trong đó: m_s là khối lượng hơi sơ cấp, m_p là khối lượng hơi thứ cấp, d_1 là đường kính vòi phun cơ sở, d_0 là đường kính họng hút của vòi phun cơ sở, A_1 là vận tốc của dòng sơ cấp tại đầu vòi phun, A_0 là vận tốc âm thanh.

2.2. Cơ sở lý thuyết tính toán mô phỏng số

Dòng chảy trong ejector được coi là dòng chảy dừng không nén được, đặc tính của nó được mô tả bởi phương trình liên tục, định luật bảo toàn động lượng và định luật bảo toàn năng lượng được trình bày như sau [6-8]:

▪ Phương trình liên tục:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3)$$

▪ Phương trình động lượng:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4)$$

▪ Phương trình năng lượng:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}[\rho u_i (\rho E + p)] = \bar{\nabla} \cdot \left(\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \bar{\nabla} \cdot [\rho u_j (\tau_{ij})] \quad (5)$$

Với:

$$\tau_{ij} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (6)$$

Trong đó: t là thời gian, ρ là khối lượng riêng của chất lỏng, u là vận tốc, E là năng lượng toàn phần, T là nhiệt độ, p là áp suất, τ là ứng suất nhớt, μ là hệ số nhớt động học, λ là hệ số dẫn nhiệt, i và j là các vectơ đơn vị trên các trục tọa độ x, y, z .

3. TÍNH TOÁN MÔ PHỎNG SỐ

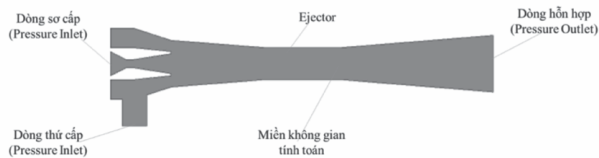
3.1. Mô hình tính toán mô phỏng

Ejector khảo sát trong bài báo này được thiết kế theo phương pháp Sokoloff, với giả thuyết dòng chảy trong ejector là dòng chảy dừng, quá trình hòa trộn của hai dòng xảy ra ở áp suất không đổi. Các thông số hình học chính của ejector được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Các thông số chính của ejector tính toán mô phỏng

STT	Tên	Ký hiệu	Giá trị (mm)	Đơn vị
1	Đường kính họng vòi phun	d_0	3,7	mm
2	Chiều dài họng hút	s_0	5	mm
3	Đường kính vòi phun	d_c	28,4	mm
4	Chiều dài ống loe	s_1	10	mm
5	Chiều dài ống thu hẹp	s_2	25	mm
6	Đường kính buồng hòa trộn	d_2	23,2	mm

Trong bài báo này, mô hình ejector, miền không gian tính toán được xây dựng trong phần mềm Solidworks, sau đó được đưa vào phần mềm Ansys Fluent để tiến hành chia lưới, đặt các điều kiện biên và tiến hành tính toán mô phỏng. Mô hình tính toán mô phỏng trường dòng trong ejector.



Hình 2. Mô hình bài toán mô phỏng số dòng chảy trong ejector

3.2. Chia lưới, điều kiện biên, các trường hợp tính toán mô phỏng

Trường dòng chảy bên trong ejector được tính toán mô phỏng bằng phần mềm FLUENT. So với vận tốc siêu âm tại đầu ra của vòi phun sơ cấp, vận tốc ban đầu tại đầu vào của dòng thứ cấp coi như không đáng kể và được bỏ qua trong quá trình tính toán. Đối với phần thành rắn là biên dạng của ejector được đặt là tường tiêu chuẩn với tính chất không thấm, không trượt, cách nhiệt. Điều kiện biên của dòng sơ cấp và dòng thứ cấp được đặt là “Pressure Inlet” trong khi điều kiện tại biên đầu ra được đặt là “Pressure Outlet” với giá trị áp suất bằng với áp suất của môi trường bên ngoài vòi phun.



Hình 3. Lưới chia trên miền không gian tính toán

Lưới phi cấu trúc được sử dụng để chia lưới miền không gian tính toán, ở vùng gần thành của ejector và miệng vòi phun sơ cấp nơi

mà có sự biến thiên lớn về áp suất, vận tốc, nhiệt độ lưới được chia mịn hơn nhằm khảo sát tốt hơn các hiện tượng rối do sự tương tác của dòng chảy với lớp biên gần thành của ejector.

Để nghiên cứu ảnh hưởng của đường kính vòi phun sơ cấp đến đặc tính dòng chảy và hiệu suất của ejector, nhóm tác giả thực hiện tính toán với các kích thước đường kính khác nhau của vòi phun sơ cấp. Áp suất của dòng sơ cấp 600 kPa tương ứng với nhiệt độ hơi bão hòa là 432,15 K, áp suất của dòng thứ cấp được tính toán cho ba trường hợp là 12 kPa, 15 kPa và 18 kPa.

4. KẾT QUẢ VÀ PHÂN TÍCH KẾT QUẢ

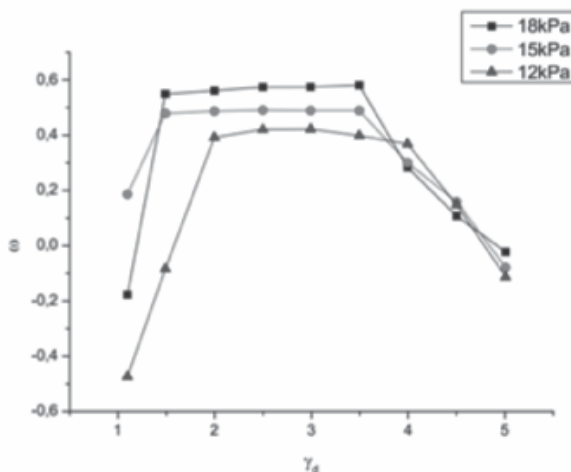
4.1. Sự phụ thuộc tỷ lệ hòa trộn ω và tỷ số đường kính γ_d

Hình 4 trình bày mối quan hệ của tỷ lệ hòa trộn ω của ejector với tỷ số đường kính γ_d tương ứng với ba áp suất của dòng hơi thứ cấp là 12 kPa, 15 kPa và 18 kPa, trong điều kiện áp suất hơi sơ cấp p_p được đặt là 600 kPa. Từ đồ thị, ta thấy rằng tỷ lệ hòa trộn ω ban đầu tăng mạnh khi tỷ số đường kính tăng từ 1-2, sau đó tỷ lệ hòa trộn gần như không tăng khi tỷ số đường kính tăng từ 2-4, khi tỷ số đường kính tiếp tục tăng thì tỷ lệ hòa trộn của ejector giảm mạnh.

Khi tỷ số đường kính đạt đến một giá trị nhất định, hơi sơ cấp từ vòi sơ cấp tạo ra áp suất đủ thấp cho phép dòng hơi thứ cấp được hút vào trong ejector và đạt điều kiện dòng chảy tới hạn (critical flow condition). Theo lý thuyết cơ học chất lỏng, sau khi dòng chảy đạt trạng thái tới hạn, lưu lượng khối cũng đạt giá trị cực đại và không thay đổi khi áp suất hút giảm. Do đó, khi đạt đến trạng thái tới hạn, ta tiếp tục tăng tỷ số đường kính γ_d thì vùng đầu ra của vòi phun



thứ cấp có áp suất thấp hơn nhưng lưu lượng khối của dòng hơi thứ cấp gần như không đổi. Điều này giải thích rằng tỷ số hòa trộn gần như không đổi khi tỷ số đường kính γ_d tăng lên vượt quá một giá trị nhất định Hình 4.



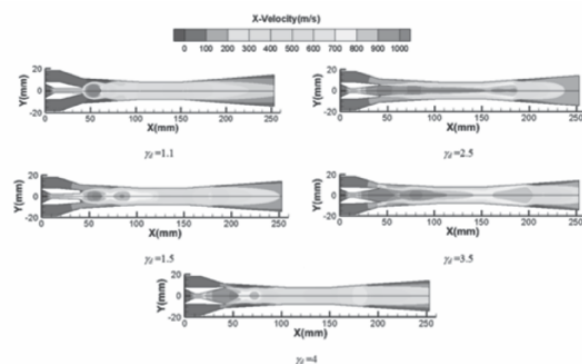
Hình 4. Sự phụ thuộc của tỷ lệ hòa trộn ω vào tỷ số đường kính γ_d tại các áp suất hơi thứ cấp khác nhau

Khi tỷ số đường kính tiếp tục tăng, áp suất tại đầu ra của vòi sơ cấp có thể tiếp tục giảm, tuy nhiên, đường kính đầu ra của vòi phun sơ cấp tăng làm giảm đáng kể diện tích tiết diện hiệu dụng cho dòng hơi thứ cấp được hút vào. Diện tích tiết diện hiệu dụng giảm cùng với áp suất cao do hiệu ứng dừng của hơi sơ cấp tốc độ cao gần thành ejector sẽ làm giảm mạnh lưu lượng khối của dòng hơi thứ cấp được hút vào, thậm chí tạo ra dòng chảy ngược của dòng thứ cấp. Do đó, có thể thấy rằng tồn tại một khoảng tỷ số đường kính tối ưu để ejector hơi đạt được hiệu suất tốt nhất.

4.2. Ảnh hưởng của tỷ số đường kính γ_d đến trường phân bố vận tốc trong Ejector

Hình 5 là trường phân bố vận tốc của dòng chảy trong Ejector tương ứng với các tỷ lệ đường kính khác nhau ở cùng một điều

kiện biên $p_s = 15 \text{ kPa}$, $p_p = 600 \text{ kPa}$. Trường phân bố vận tốc cho thấy rằng, khi dòng hơi sơ cấp có vận tốc cao đi qua đầu ra của vòi phun ejector, sự mở rộng đột ngột của đầu vòi phun sơ cấp gây ra sự nhiễu động lớn trường dòng tại vùng đầu vòi phun và tạo ra sóng xung kích xiên. Các sóng xung kích này lan truyền qua chất lỏng, đến lớp biên sát thành của ejector và bị phản xạ, biến thành sóng giãn nở. Sóng giãn nở sau đó lại được chuyển đổi thành sóng nén tại vùng lớp biên, trong quá trình biến đổi này năng lượng của sóng xung kích dần biến mất. Do đó, bên trong ejector hình thành nên một chuỗi sóng xung kích biến đổi giãn nở và trao đổi năng lượng liên tục. Các sóng xung kích này làm tăng nhanh áp suất tĩnh của dòng chất lỏng hỗn hợp, khiến trạng thái dòng chảy chuyển từ siêu âm sang cận âm.



Hình 5. Trường phân bố vận tốc trong Ejector tại các tỷ số đường kính khác nhau

Trường phân bố vận tốc của dòng khí trong ejector cho thấy rằng vận tốc chuyển động của dòng khí trước khi ra khỏi vòi phun sơ cấp đạt vận tốc siêu âm. Đặc biệt với trường hợp ejector có tỷ số đường kính $\gamma_d = 1,1$, và $\gamma_d = 1,5$ thì vận tốc của dòng khí sau khi ra khỏi vòi phun lại tiếp tục tăng tốc thêm đạt tới vận tốc siêu âm khoảng 1000 m/s. Trường phân bố vận tốc của dòng khí trong ejector rất không đồng đều do đó tồn tại của dòng chảy trong ejector rất lớn, điều này làm giảm hiệu suất thủy động

lực học của Ejector. Đối với vòi phun có tỷ số đường kính $\gamma_d = 2,5$, $\gamma_d = 3,5$ và 4, ta thấy trường phân bố vận tốc của dòng khí sau khi ra khỏi vòi phun đều đạt trạng thái siêu âm và tương đối đồng đều dẫn đến tổn thất năng lượng của dòng chảy trong ejector là tương đối nhỏ nên hiệu suất thủy động lực học của nó tương đối tốt. Trong các trường hợp khảo sát, trường phân bố vận tốc của dòng khí trong ejector có tỷ số đường kính $\gamma_d = 3,5$ là đồng đều nhất từ đầu vòi phun sơ cấp cho đến đầu ra của ejector, do đó tổn thất năng lượng của dòng chảy trong trường hợp này là nhỏ nhất. Do đó, hiệu suất của ejector có tỷ số đường kính $\gamma_d = 3,5$ đạt giá trị lớn nhất.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã ứng dụng phương pháp số để phân tích đặc tính làm việc của ejector, qua đó đánh giá ảnh hưởng của tỷ số đường kính γ_d đến đặc tính thủy động lực học của ejector. Dưới đây là một số kết quả chính:

- Khi tỷ số đường kính $\gamma_d < 1,5$, tỷ số hòa trộn tăng tuyến tính với tỷ số đường kính γ_d và sau đó đạt đến giá trị tối ưu tương ứng với tỷ số đường kính $1,5 < \gamma_d < 3,5$. Khi tỷ số đường kính $\gamma_d > 3,5$ thì tỷ số hòa trộn của ejector giảm mạnh, do đó với một điều kiện vận hành nhất định, tồn tại một khoảng tỷ số đường kính γ_d tối ưu giúp ejector đạt hiệu suất cao nhất.

- Ở điều kiện làm việc $p_s = 15$ kPa, $p_p = 600$ kPa, ejector khảo sát đạt trạng thái tối hạn kép là lưu lượng khối của dòng sơ cấp, dòng thứ cấp, và dòng hỗn hợp đạt giá trị cực đại tương ứng với tỷ số đường kính γ_d trong khoảng 1,5-3,5.

Những kết quả thu được không chỉ góp phần hiểu rõ hơn về đặc tính của dòng chảy

và truyền nhiệt bên trong ejector mà còn cung cấp cơ sở khoa học cho việc tối ưu hóa thiết kế, nâng cao hiệu suất hệ thống. Nghiên cứu có thể được mở rộng bằng cách kết hợp với các phương pháp thực nghiệm để kiểm chứng mô phỏng và tối ưu hóa thiết kế ejector trong các điều kiện vận hành thực tế. ❖

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT24-25.46. ❖

Ngày nhận bài: 18/02/2025

Ngày phản biện: 06/3/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Chen, W., et al., "Numerical assessment of ejector performance enhancement by means of combined adjustable-geometry and bypass methods". Applied Thermal Engineering, 2019. 149: p. 950-959.
- [2]. Zou, J., et al., "Theoretical studies on wide-operating-range ejector based on operating conditions and multi-parameter coupling effect in proton exchange membrane fuel cell system". Applied Thermal Engineering, 2024. 251: p. 123602.
- [3]. Jiang, X., et al., "Modeling and experimental research on adjustable ejector in fuel cell gas circulation system". Applied Thermal Engineering, 2024. 257: p. 124431.
- [4]. Dai, Z., et al., "Advanced exergy analysis on an ejector using zeotropic mixture in a refrigeration system". International Journal of Refrigeration, 2025. 172: p. 266-283.
- [5]. Al-Doori, G., et al., "A review of axial and radial ejectors: Geometric design, computational analysis, performance, and machine learning approaches". Applied Thermal Engineering, 2025. 266: p. 125694.
- [6]. Jack P. Holman, J.L., "Fluid_Mechanics". 5 ed.: McGraw-Hill.
- [7]. ANSYS Fluent Theory Guide. 2013. 814.
- [8]. Wang, K., et al., "Optimization design of steam ejector primary nozzle for MED-TVC desalination system". Desalination, 2019. 471: p. 114070.