

ẢNH HƯỞNG CẤU TẠO THIẾT BỊ EJECTOR TRONG ỨNG DỤNG GIA TĂNG THU HỒI KHÍ VÀ CONDENSATE TẠI MỎ HẢI THẠCH

Trần Ngọc Trung¹, Trần Vũ Tùng¹, Lý Văn Dao¹, Ngô Hữu Hải¹, Triệu Hùng Trường²

¹Công ty Điều hành Dầu khí Biển Đông

²Đại học Mỏ - Địa chất

Email: trungtn@biendongpoc.vn

Tóm tắt

Để tận thu khí và condensate tại các giếng đã suy giảm áp suất đồng thời với các giếng khác vẫn cho sản lượng và áp suất ổn định, phương pháp sử dụng thiết bị bề mặt Ejector được nghiên cứu đánh giá tính khả thi về kỹ thuật và hiệu quả kinh tế. Đây là thiết bị đơn giản, chi phí thấp, thời gian triển khai nhanh để gia tăng thu hồi cho các giếng suy giảm áp suất.

Bài báo trình bày phương pháp số để nghiên cứu hiệu suất của thiết bị Ejector dựa trên bộ thông số (tỷ số hút entrainment và tỷ số nén). Dòng chảy của lưu chất bên trong thiết bị Ejector được mô phỏng thông qua kỹ thuật mô phỏng động lực học chất lỏng tính toán (computational fluid dynamics). Kết quả nghiên cứu đã xây dựng mô hình có độ tin cậy cao và được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng của các thông số đến hiệu suất Ejector trong điều kiện làm việc tại mỏ khí condensate Hải Thạch. Thông qua kết quả mô hình, đường kính họng vòi phun sơ cấp (D_1) và đường kính vùng thiết diện không đổi (D_m) có ảnh hưởng lớn nhất đến hiệu suất của Ejector. Việc tăng hay giảm so với giá trị tối ưu sẽ làm giảm hiệu suất thiết bị hoặc gây ra hiện tượng dòng chảy đảo lưu tại cổng thứ cấp. Bài toán tối ưu quy hoạch phi tuyến đa mục tiêu cho ứng dụng gia tăng thu hồi khí và condensate cho mỏ Hải Thạch được xây dựng thông qua kết quả mô phỏng các mô hình.

Từ khóa: Ejector, CFD, nâng cao thu hồi khí/condensate, mỏ Hải Thạch.

1. Giới thiệu

Thiết bị Ejector đã được phát minh và nghiên cứu từ thế kỷ XIX, tuy nhiên việc nghiên cứu ứng dụng trong gia tăng thu hồi cho mỏ dầu và khí/condensate mới chỉ được đẩy mạnh trong khoảng 2 thập kỷ trở lại đây [1 - 4].

Mô hình mô phỏng dòng chảy chất lưu bên trong thiết bị Ejector giúp gia tăng khả năng thu hồi khí condensate được xây dựng thông qua kỹ thuật mô phỏng động lực học chất lỏng tính toán (CFD - computational fluid dynamics) [5]. Phương pháp mô phỏng CFD đóng vai trò quan trọng trong việc kiểm chứng lý thuyết để từ đó có thể áp dụng thực nghiệm. Mô phỏng CFD trong nghiên cứu này được xây dựng cho hỗn hợp khí tự nhiên có thành phần cấu tử, tính chất vật lý tương tự như điều kiện thực tế tại mỏ Hải Thạch.

Bài báo tập trung phân tích ảnh hưởng đến hoạt động của Ejector trong giới hạn của tỷ số hút, tỷ số áp suất khi

xem xét các khía cạnh hình học khác nhau, gồm vị trí vòi sơ cấp (NXP), đường kính vòi phun sơ cấp, đường kính và chiều dài khu vực thiết diện không đổi, góc hội tụ buồng trộn. Kết quả từ nghiên cứu này cũng được so sánh tham khảo với các nghiên cứu khác về tối ưu cấu trúc thiết bị Ejector. Trên cơ sở đó, bài toán tối ưu quy hoạch phi tuyến đa mục tiêu cho ứng dụng gia tăng thu hồi khí và condensate cho mỏ Hải Thạch đã được xây dựng từ kết quả mô phỏng các mô hình.

2. Cơ sở lý thuyết và phương pháp nghiên cứu

Thiết bị Ejector đầu tiên được phát minh và ứng dụng vào năm 1858 bởi Henry Giffard [6]. Ejector là thiết bị hướng dòng đơn giản với 2 cổng chất lưu đầu vào (dòng chảy chất lưu sơ cấp/thứ cấp) và 1 cổng phân tán (diffuser). Nguyên lý cơ bản của thiết bị là tạo ra áp suất âm tại khu vực buồng hút bằng cách cho dòng chảy chất lưu áp suất cao đi qua khe hở hẹp của vòi phun hội tụ để hút dòng áp suất thấp tại cổng thứ cấp.

Ngày nhận bài: 24/6/2020. Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa: 25/6 - 29/7/2020.

Ngày bài báo được duyệt đăng: 13/8/2020.

2.1. Các thông số để phân tích và đánh giá hiệu suất hoạt động của thiết bị Ejector

Hai thông số là tỷ số hút entrainment và tỷ số nén thường được sử dụng để phân tích và đánh giá hiệu suất của thiết bị Ejector. Tỷ số hút entrainment ω , biểu thị đặc trưng cho khả năng của Ejector trong việc có thể hút được khối lượng chất lưu thứ cấp trên khối lượng chất lưu sơ cấp, được xác định bởi điều kiện đầu vào:

$$\omega = \frac{m_s}{m_p} \tag{1}$$

Với m_s là khối lượng dòng chảy chất lưu thứ cấp, m_p là khối lượng dòng chảy sơ cấp.

Trong trường hợp áp dụng tại mỏ Hải Thạch, giá trị khối lượng dòng chảy sơ cấp (m_p) phải là biến trong hàm mục tiêu. Giá trị m_p phải luôn nhỏ hơn m_{p-max} , trong đó m_{p-max} là khối lượng dòng chảy chất lưu sơ cấp tối đa có thể duy trì được cho từng phương án. Ngoài ra, tỷ số nén τ giữa áp suất đầu ra với áp suất đầu vào thứ cấp thường được coi là tỷ số nén đặc trưng của thiết bị:

$$\tau = \frac{P_b}{P_s} \tag{2}$$

Trong đó:

P_b : Áp suất đầu ra hay áp suất ngược;

P_s : Áp suất tại cổng thứ cấp.

2.2. Các nhóm thông số ảnh hưởng đến hiệu suất của thiết bị Ejector

Nhiều nghiên cứu tập trung vào đánh giá và xem xét các khía cạnh khác nhau đã ảnh hưởng đến hiệu suất hoạt động của thiết bị Ejector như cấu tạo hình học và thiết kế của Ejector; thông số nhiệt độ và áp suất vận hành của hệ thống; đặc tính dòng chảy chất lưu. Đầu tiên, các thông số vận hành của hệ thống như nhiệt độ, áp suất và lưu

lượng dòng chảy lưu sơ cấp, thứ cấp và áp suất ngược trực tiếp ảnh hưởng đến khả năng hoạt động và hiệu suất của Ejector [7, 8]. Tiếp theo là ảnh hưởng từ các thông số khác đại diện cho đặc tính dòng chảy chất lưu như hệ số nén, thành phần cấu tử, tính chất vật lý của dòng chảy chất lưu [9]. Vấn đề là cần tối ưu hóa cấu trúc bên trong thiết bị Ejector để đạt được hiệu suất làm việc cao nhất. Đã có nhiều nghiên cứu về ảnh hưởng của cấu tạo hình học lên hiệu suất hoạt động của Ejector. Trong ứng dụng Ejector cho hệ thống làm lạnh, các kích thước cấu tạo khác nhau được nghiên cứu có thể kể đến: vị trí vòi hội tụ (nozzle exit position - NXP) [10 - 13]; tỷ số diện tích (area ratio) [14 - 17]; kích thước buồng trộn [18]; kích thước và góc phần khúc tán (diffuser size and diverging angle); hình dạng vòi hội tụ [19 - 21]; chiều dài và đường kính vùng thiết diện không đổi (constant area section) [22, 23]. Tuy nhiên, ngoài kết quả đã đạt được, trong các công trình đã thực hiện vẫn tồn tại một số mâu thuẫn. Khó khăn chính của việc thiết kế và ứng dụng Ejector là lựa chọn được các kích thước hình học khác nhau về chiều dài, góc độ hay đường kính để có thể tìm được phương án tối ưu cho từng điều kiện làm việc khác nhau.

3. Tổng quan các nghiên cứu về xây dựng và kiểm chứng mô hình thiết bị Ejector

Các nghiên cứu gần đây đã xây dựng các mô hình mô phỏng như: mô hình nhiệt động lực học, mô hình động lực học chất lỏng tính toán để mô phỏng, phân tích và tối ưu hóa hoạt động của Ejector. Ngoài ra, còn có nhiều nghiên cứu về phương pháp kiểm chứng mô hình (phương pháp thí nghiệm và phương pháp kiểm chứng bằng hình ảnh về sự chuyển động của dòng chảy chất lưu) nhằm đánh giá, so sánh, hiệu chuẩn và nâng cao độ chính xác kết quả của mô hình. Sự kết hợp giữa mô phỏng và kiểm chứng mô hình đã đưa ra các đánh giá chi tiết về dòng chảy chất

Schlieren	Shadowgraph	Light Scattering	Rayleigh Scattering	Laser Tomography	Direct Photography
<ul style="list-style-type: none"> J.Fabri, R. Siestrunk (1958) H.Kuroda (1981) Y-C.Hsia, A. Krothapallit, D. Baganofft (1988) Y.Zhu, P.Jiang (2014) 	<ul style="list-style-type: none"> K.Kontis, H. Zare - Behtash (2009) AB.Little, Y. Bartosiewicz, S. Garimella (2015) AB.Little, S. Garimella (2016) 	<ul style="list-style-type: none"> P.Desevaux, Prenel và cộng sự (1994) 	<ul style="list-style-type: none"> P.Desevaux, Prenel và cộng sự (1995) Desevaux (2001) 	<ul style="list-style-type: none"> T.Marynowski, P. Desevaux, Y. Mercadier (2009) A.Bouhanguel, P. Desevaux, E. Gavignet (2011) 	<ul style="list-style-type: none"> Y.-H.Zhu, Wang và cộng sự (2016) J.Zhu & Elbel, (2018) Y.Li, Deng và cộng sự (2018)

Hình 1. Phương pháp kiểm chứng bằng hình ảnh dòng chảy chất lưu (flow visualization)

lưu, phát hiện các điểm cục bộ, dị thường về áp suất hay lưu lượng bên trong cấu tạo thiết bị Ejector. Trong số các nghiên cứu được xem xét, có các kỹ thuật kiểm chứng bằng hình ảnh dòng chảy chất lưu khác nhau được sử dụng để hiểu rõ hơn về các kiểu dòng chảy. Tuy nhiên, các phương pháp Schlieren và Shadowgraphy chủ yếu được sử dụng vì đã chứng minh được độ chính xác và hiệu quả.

Thông thường có 2 phương án mô phỏng toán học hoạt động dòng chất lưu là trạng thái ổn định (steady state) và tức thời (transient modelling). Các nghiên cứu chủ yếu tập trung vào việc thực hiện mô phỏng trạng thái ổn định. Đối với mô phỏng tức thời thiết bị Ejector trong ứng dụng gia tăng thu hồi từ giếng suy giảm áp suất, cho đến nay chưa có nghiên cứu nào cụ thể. Nguyên nhân chính là do việc giải phương trình sai phân đòi hỏi sự rời rạc hóa Δt phải rất nhỏ vì vận tốc dòng rất lớn, đặc biệt khu vực gần vòi phun. Do vậy, để đạt được trạng thái ổn định đòi hỏi khối lượng tính toán vô cùng lớn. Ngoài ra, thông số dòng sơ cấp và thứ cấp như áp suất, nhiệt độ và thành phần cấu tử thay đổi liên tục, dẫn đến khó khăn và tính hiệu quả của mô phỏng tức thời.

Keenan và Neumann lần đầu tiên giới thiệu mô hình nhiệt động lực học 1-D dựa trên lý thuyết về động lực khí lý tưởng của Ejector [24]. Trong khi đó, các báo cáo khoa học đầu tiên được thực hiện bằng cách sử dụng phương pháp CFD để mô phỏng hoạt động thiết bị Ejector đã đạt được kết quả mô phỏng tích cực về mặt dòng chảy cục bộ bên trong Ejector trong khoảng những năm 1990 - 2000 [25, 26]. Phương pháp CFD đã chứng minh được khả năng trong việc mô phỏng, phân tích dòng chảy chất lưu bên trong các Ejector và tối ưu hóa hoạt động của Ejector ở các điều kiện hoạt động, hình dạng cấu tạo và chất lưu hoạt động khác nhau. Mô phỏng CFD cho phép xem xét các hiện tượng và chế độ dòng chảy khác nhau xảy ra trong Ejector như: các sóng xung kích, hiện tượng trộn lẫn, dòng chảy tại lớp cận biên, thay đổi pha, tính nén được, dòng chảy siêu âm, dòng chảy phức tạp... Nhìn chung, mô hình CFD có độ chính xác cao hơn tuy nhiên lại phức tạp, đòi hỏi nhiều thời gian và nỗ lực tính toán hơn so với mô hình nhiệt động lực học và vẫn còn khoảng cách so với kết quả thí nghiệm hoặc thực địa (sai số tỷ lệ hút entrainment khoảng 10 - 13,2% [27 - 31]).

4. Nghiên cứu gia tăng thu hồi khí và condensate cho các giếng suy giảm áp suất tại mỏ Hải Thạch

4.1. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Ejector được sử dụng nhằm gia tăng khả năng thu hồi trong khai thác dầu khí được giới thiệu lần đầu tiên

bởi Clanton như là một giải pháp tận dụng năng lượng và thân thiện với môi trường khi sử dụng năng lượng lãng phí đi qua van điều tiết đầu giếng của hệ thống công nghệ dầu khí [32]. Ứng dụng của Ejector trong gia tăng thu hồi dầu khí thường sử dụng 2 phương án cơ bản là lấy khí từ đầu ra của máy nén khí hoặc từ giếng cao áp lân cận làm nguồn chất lưu dẫn động. Có 2 phương án lấy khí áp cao khác nhau để thu hồi khí/condensate tại mỏ Hải Thạch, đó là sử dụng khí khô thương mại cao áp tại đầu ra máy nén khí và dùng khí từ giếng có áp suất cao và lưu lượng lớn nhất [5]:

4.2. Lựa chọn mô hình nhiễu loạn (turbulence model trong mô phỏng thiết bị Ejector)

Liên quan đến thông số vận hành như khối lượng dòng chảy và tỷ số hút entrainment, cả 2 mô hình nhiễu loạn (turbulence model) trong mô phỏng CFD dựa trên k- ϵ và k- ω đều được chứng minh là hoạt động khá tốt và có ưu thế riêng. Tuy nhiên, những mô hình nhiễu loạn khác nhau có sự không nhất quán trong việc dự đoán đặc tính dòng chảy cục bộ (như biên dạng cấu trúc sóng xung kích, giá trị biên dạng của vận tốc, áp suất...) và do đó phát sinh mâu thuẫn trong khi so sánh các kết quả đạt được. Bartosiewicz và Aidoun đã thử nghiệm 6 mô hình nhiễu loạn khác nhau [33], đầu tiên mô phỏng hệ thống Ejector bằng cách xem xét trường hợp không có dòng chảy thứ cấp để làm sáng tỏ cường độ sóng xung kích. Bằng cách này, đã tìm thấy ưu điểm cho các mô hình nhiễu loạn k- ϵ RNG và k- ω -SST. Trong khi đó, mô hình nhiễu loạn k- ω -SST chứng minh được ưu thế trong việc dự đoán hiện tượng trộn lẫn của 2 luồng chất lưu sơ cấp và thứ cấp. Trong nghiên cứu khác, Zhu và Jiang [34] đã nghiên cứu cấu trúc sóng xung kích sinh ra bên trong Ejector bằng cách áp dụng các mô hình k- ϵ Realizable, k- ϵ RNG, k- ϵ Standard và mô hình k- ω -SST bên cạnh việc kiểm chứng mô hình bằng hình ảnh dòng chảy chất lưu. Trong số các mô hình được thử nghiệm, k- ϵ RNG cho kết quả phù hợp nhất với các thí nghiệm sử dụng phương pháp Schlieren quang học. Ngoài ra, mô hình k- ϵ Realizable, k- ϵ RNG và k- ω -SST cho kết quả giống nhau trong việc dự đoán vị trí của các sóng xung kích. Một nghiên cứu tương tự đã được Little và Garimella thực hiện [35], báo cáo mô hình rối k- ϵ RNG cho kết quả tương đồng với phương pháp kiểm chứng bằng hình ảnh dòng chảy chất lưu. Bằng cách tăng cường độ mịn tại khu vực biên và cận biên của Ejector, Little và Garimella đã thu được nhiều kết quả chính xác hơn thông qua mô hình k- ω -SST và mô hình đó đã đạt được các đặc tính dòng chảy cận biên như đã được chỉ ra bởi các công trình của Barkosiewicz và cộng sự [36]. Tuy nhiên, việc

tăng độ mịn của lưới đi kèm với khối lượng tính toán lớn hơn. Do đó, mô hình rối k-ε RNG đang được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu do có ưu thế về độ chính xác cũng như khối lượng tính toán ít hơn.

4.3. Mô hình động lực học chất lỏng tính toán cho 2 phương án sử dụng Ejector

Mô hình CFD cho 2 phương án sử dụng Ejector được xây dựng cho dòng chất lưu chịu nén, dòng rối và trạng thái ổn định với chi tiết như trong Bảng 1. Dòng chảy chất lưu và phương trình truyền nhiệt được lựa chọn là đối xứng qua trục dựa trên cấu tạo vật lý của thiết bị đồng thời giúp giảm thời gian tính toán cho mô hình.

Mô hình mô phỏng CFD được xây dựng có các thành phần cấu tử hỗn hợp khí dựa trên dữ liệu thành phần giống và khí tại đầu ra máy nén tại mỏ Hải Thạch để đảm bảo thời gian tính toán và độ chính xác mô phỏng dòng chảy lưu chất.

5. Kết quả và thảo luận

5.1. Phân tích các yếu tố ảnh hưởng tỷ lệ hút entrainment với điều kiện áp dụng tại mỏ Hải Thạch

Nhược điểm của Ejector đã được chỉ ra trong các nghiên cứu trước đó [7, 28, 42] là hiệu suất thiết

bị Ejector thấp, đặc biệt là trong trường hợp áp suất đầu ra cao hoặc áp suất dòng thứ cấp thấp. Cấu trúc Ejector được nghiên cứu tại mỏ Hải Thạch [5] được phát triển từ hình dạng tối ưu [7, 42, 43]. Tuy nhiên, khác với các nghiên cứu này, nhóm tác giả chạy mô phỏng trong 2 điều kiện áp suất ngược khác nhau để kiểm chứng. Đây là các điều kiện vận hành bình tách công nghệ số 1 tại giàn PQP-HT. Thực tế, sự tương tác giữa 9 thông số về kích thước và hình dạng khác nhau của Ejector khí tự nhiên và ảnh hưởng của chúng đã được nghiên cứu trong quá trình tối ưu hóa tỷ lệ hút entrainment của Ejector hoạt động tại điều kiện 12 MPa áp suất sơ cấp, 2 MPa áp suất thứ cấp và 5,2 MPa áp suất đầu ra [7]. Ngoài ra, mô hình CFD được kiểm chứng khi so sánh với kết quả thực nghiệm của Chong, Hu và cộng sự [8]. Kết quả mô hình CFD và thí nghiệm có sai số trung bình khoảng 0,6% tại chế độ tới hạn (ngheet đôi). Dựa trên kết quả của mô hình CFD, phương pháp Kriging kết hợp với giải thuật di truyền, nhóm tác giả đã kết luận rằng góc hội tụ của vòi phun và chiều dài vòi phun tính từ đoạn hội tụ không có tác động lên giá trị tỷ lệ hút entrainment. Ngoài ra, góc nghiêng của đường thứ cấp chỉ có tác động nhỏ lên tỷ lệ hút entrainment trong thiết kế tối ưu. Mô hình Kriging dựa trên bộ dữ liệu mô phỏng đã không thể dự báo được ảnh hưởng của chiều dài ống trộn. Trong khi đó, đường kính ống trộn, vị trí NXP, góc nghiêng của đường thứ cấp là các thông số có ảnh hưởng lớn nhất đến tỷ lệ hút entrainment. Phương pháp tối ưu dựa trên mẫu

Bảng 1. Chi tiết mô hình CFD cho 2 phương án sử dụng Ejector tại mỏ Hải Thạch

Thông số	Diễn giải
Tính phụ thuộc thời gian	Trạng thái ổn định.
Phương pháp phân chia cấu trúc	Phân chia mắt lưới tứ giác (quadrilateral). Xác định tính độc lập của tỷ lệ hút entrainment và biên dạng áp suất so với số ô mắt lưới.
Bộ giải	- Thuật toán SIMPLE cho mối quan hệ giữa áp suất và vận tốc dòng chất lưu; - Tính đối lưu (convective terms) được rời rạc hóa dựa trên sơ đồ "second order upwind" [27].
Mô hình nhiễu loạn	k-ε Re-Normalization Group.
Miền tính toán	- Theo áp suất và nhiệt độ cho các phương án 1 và 2 [5] - Miền tính toán (boundary condition) cho dòng sơ cấp và thứ cấp là theo điều kiện "pressure inlet" trong khi đầu ra của Ejector có miền tính toán là "pressure outlet".
Vùng cận tường	Khu vực cận tường được xử lý dưới dạng "standard wall function" vì đã chứng minh được kết quả chính xác cho các tính toán khu vực cận tường cho dòng chảy chất lưu có Reynold cao [23, 37].
Chất lưu	- Hỗn hợp khí bao gồm methane, ethane, propane, nitrogen và carbon dioxide [5] - Phương trình khí thực Peng Robison cho tỷ trọng hỗn hợp khí; - Độ nhớt, nhiệt dung riêng hay độ dẫn nhiệt của chất lưu được lấy từ NIST (National Institute of Standards and Technology) được gọi là REFPROP (Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database) [38].
Độ hội tụ	Độ hội tụ được tính toán cho từng vòng lặp. Vòng lặp sẽ dừng lại khi phần dư nhỏ hơn 10 ⁻⁶ cho các phương trình liên tục, động lượng và năng lượng.
Thông số quan sát	- Tỷ lệ hút entrainment đặc trưng cho khả năng có thể hút được khối lượng chất lưu thứ cấp trên khối lượng chất lưu sơ cấp tại điều kiện đầu vào; - Đồ thị lưu lượng dòng thứ cấp so với áp suất dòng thứ cấp; - Lưu lượng dòng sơ cấp cho từng phương án.
Độc lập cấu trúc mạng lưới	Phương pháp xác định hệ số cấu trúc lưới hội tụ (Grid Convergence Index - GCI) giúp định lượng được độ hội tụ của kết quả mô hình mô phỏng gồm rất nhiều mắt lưới [39 - 41].

Bảng 2. Thông số vận hành và kích thước cấu tạo Ejector khí tự nhiên được nghiên cứu tại mỏ Changqing, Trung Quốc

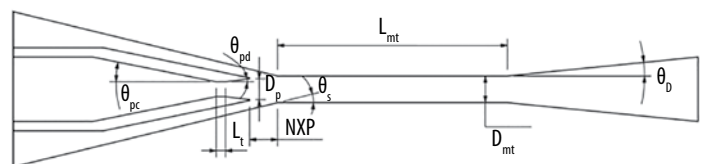
Tác giả	Thông số vận hành	D_t (mm)	D_{mt} (mm)	L_{mt} (mm)	θ_s (độ)	θ_D (độ)
(Chong, Yan và cộng sự, 2009) [42]	$P_p = 12 \text{ MPa}$, $m_p = 80.000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$, $P_s = 3 \text{ MPa}$, $m_s = 24.000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$, $P_b = 5,2 \text{ MPa}$	6	9,6	38,4	28°	
(W.Chen, Chong và cộng sự, 2013) [28]	$P_p = 11 \text{ đến } 13 \text{ MPa}$, $P_s = 3 \text{ đến } 5 \text{ MPa}$, $P_b = 5,1 \text{ đến } 5,6 \text{ MPa}$	5,4	9,4	47	14°	$\theta_D = 1,43^\circ$

Bảng 3. Kích thước tối ưu theo nghiên cứu của Hassan Amin, Elbadawy và cộng sự đạt được thông qua 216 bộ kích thước khác nhau [7]

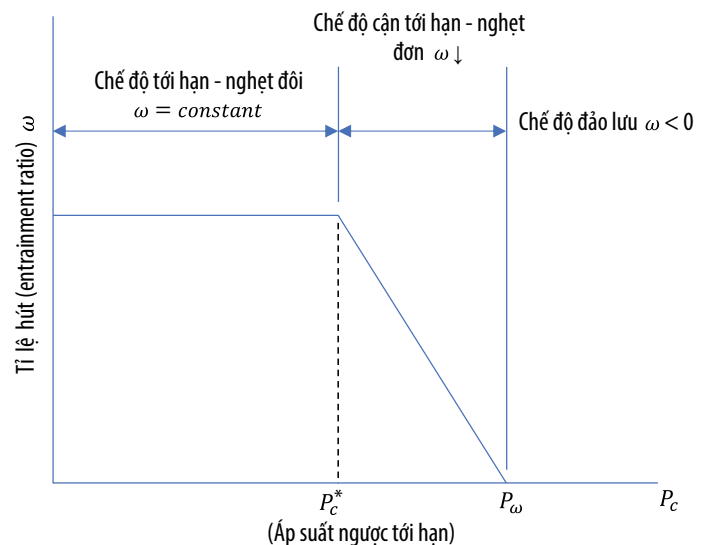
Thông số	D_t (mm)	θ_{pc} (độ)	θ_{pd} (độ)	D_p (mm)	NXP (mm)	θ_s (độ)	D_{mt} (mm)	θ_D (độ)	L_{mt} (mm)	L_t (mm)
Kích thước tối ưu	4,6	11,2071	7,0631	6,4717	8,822	13,5	8,3	5,5723	72,4	2,938
				$D_p/D_t = 1,4069$	$NXP/D_t = 1,9178$		$D_{mt}/D_t = 1,8045$		$L_{mt}/D_t = 15,7391$	$L_t/D_t = 0,6387$
Dải thay đổi cho 216 bộ kích thước	4,6	4 - 14	1 - 15	5,06 - 6,67	1 - 39	13,5 - 38	7,13 - 13,662	1 - 15	7,13 - 276	0 - 4,6
				D_p/D_t từ 1,1 - 1,45	NXP/D_t từ 0,2174 - 8,4783		D_{mt}/D_t từ 1,55 - 2,97		L_{mt}/D_t từ 1,55 - 60	L_t/D_t từ 0 - 1

đại diện đã được sử dụng kết hợp với mô phỏng CFD đã chứng minh được tính hiệu quả trong nghiên cứu tối ưu hóa cấu tạo hình học và ảnh hưởng của từng thông số lên tỷ lệ hút entrainment của Ejector khí tự nhiên. Cũng sử dụng phương pháp tối ưu thông qua mô phỏng CFD các mẫu Ejector đại diện (surrogate based optimization technique) kết hợp với giải thuật tiến hóa đa mục tiêu (multi-objective evolutionary algorithm), Carrilo, Sanchez và cộng sự đã nghiên cứu tối ưu hóa đặc điểm cấu tạo thiết bị Ejector 1 pha sử dụng cho hệ thống làm lạnh [44]. Nhóm tác giả đã báo cáo kết quả nghiên cứu mô phỏng CFD giúp gia tăng 55% áp suất ngược, 110% tỷ lệ hút cho Ejector dùng không khí lý tưởng và tăng 10% áp suất ngược, 35% tỷ lệ hút cho Ejector dùng CO₂ với tính chất khí thực. Ngoài ra, đường kính vòi phun sơ cấp và đường kính phần thiết diện không đổi có ảnh hưởng lớn nhất đến hiệu suất thiết bị. Những thông số cấu tạo khác của thiết bị có ảnh hưởng rất nhỏ hoặc không có ảnh hưởng.

Các thông số và kết quả mô phỏng CFD cho điều kiện áp dụng tại mỏ Hải Thạch được liệt kê chi tiết trong Phụ lục 1. Trong nghiên cứu của Chen, Chong và cộng sự thiết kế Ejector khí tự nhiên hoạt động tại điều kiện sơ cấp là 11 - 13 MPa, thứ cấp là 3 - 5 MPa và áp suất đầu ra từ 5,1 - 5,6 MPa, cho kết quả tỷ lệ hút entrainment tối ưu đạt được là 34,9% [28]. Trong khi đó, nghiên cứu của Hassan Amin, Elbadawy thì thiết kế Ejector hoạt động tại điều kiện 12 MPa áp suất sơ cấp, 2 MPa áp suất thứ cấp và 5,2 MPa áp suất đầu ra



Hình 2. Các kích thước hình học ảnh hưởng đến tỷ lệ hút entrainment theo nghiên cứu của Hassan Amin, Elbadawy và cộng sự [7]

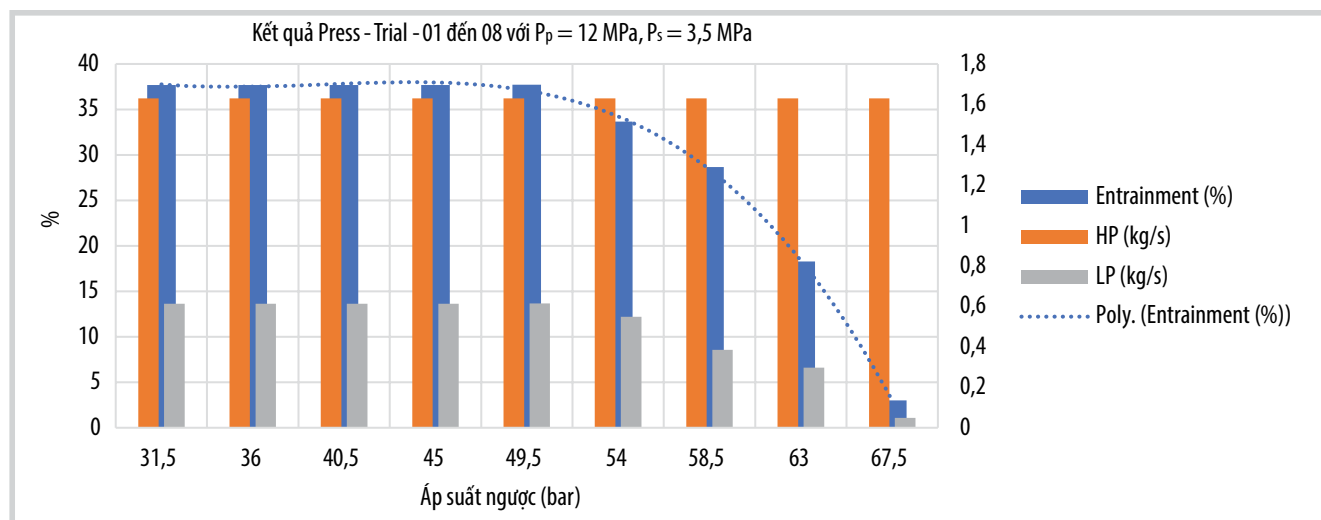


Hình 3. Đồ thị tỷ số hút entrainment so với áp suất ngược [6]

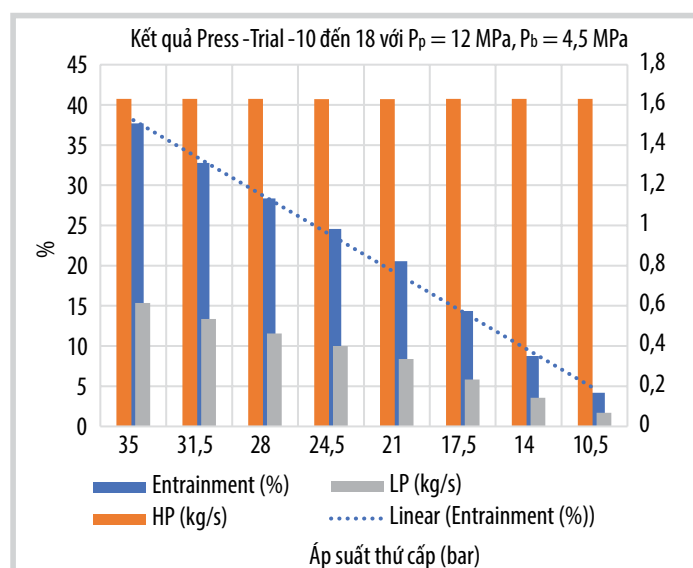
và cho kết quả tỷ lệ hút entrainment tối ưu là 19,45% thông qua mô phỏng CFD sử dụng methane làm lưu chất hoạt động [7].

5.1.1. Hiệu suất của thiết bị Ejector theo các chế độ

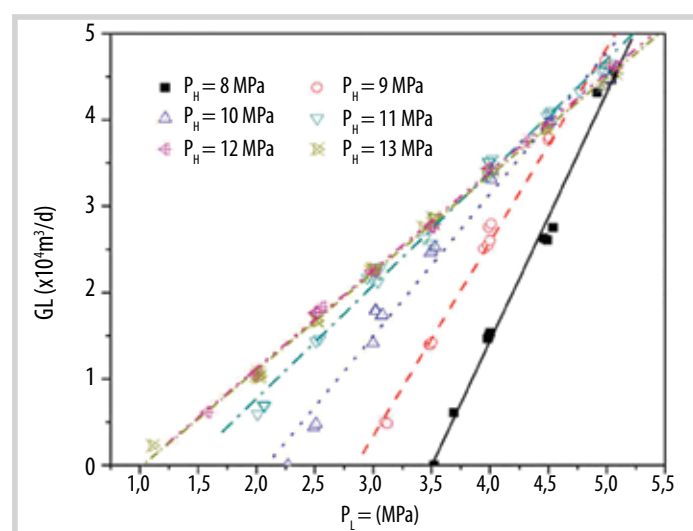
Hiệu suất Ejector được chia làm 3 chế độ: chế độ tới hạn - nghẹt đôi (critical mode), chế độ cận tới hạn - nghẹt đơn (subcritical) và chế độ đảo lưu (backflow mode) [45].



Hình 4. Kết quả thử nghiệm đồ thị tỷ lệ hút entrainment so với áp suất ngược trong điều kiện mỏ Hải Thạch



Hình 5. Kết quả mô phỏng đồ thị tỷ lệ hút entrainment so với áp suất thứ cấp trong điều kiện mỏ Hải Thạch



Hình 6. Kết quả thử nghiệm đồ thị tỷ lệ hút entrainment so với áp suất thứ cấp trong điều kiện mỏ tại Trung Quốc (trong đó P_H = áp suất sơ cấp, P_1 áp suất thứ cấp) [42]

Tại chế độ cận tới hạn, tỷ số hút entrainment là không đổi so với áp suất ngược cho đến một giá trị nhất định (gọi là áp suất ngược tới hạn - critical back pressure) và tỷ số hút entrainment bắt đầu giảm khi áp suất ngược tăng. Trong Hình 4, khối lượng dòng sơ cấp không đổi khi áp suất ngược tăng tuy nhiên khối lượng dòng thứ cấp sẽ giảm do bị nghẽn. Nếu áp suất ngược thấp hơn giá trị áp suất ngược tới hạn, dòng chất lưu sơ cấp và thứ cấp đều bị nghẽn, tỷ lệ hút entrainment là không đổi. Chế độ này còn được gọi là chế độ vận hành tới hạn theo áp suất ngược. Tuy nhiên, khi áp suất ngược lớn hơn giá trị tới hạn, thiết bị Ejector sẽ đi vào chu trình cận tới hạn. Tỷ lệ hút entrainment sẽ bị giảm đột ngột do giảm dòng chảy thứ cấp. Nếu tiếp tục gia tăng áp suất ngược, thiết bị Ejector sẽ không thể tạo ra tỷ lệ hút entrainment nữa, sẽ có hiện tượng dòng chảy ngược từ đầu sơ cấp sang đầu thứ cấp [46]. Do đó ngay cả khi có thể duy trì được lưu lượng và áp suất dòng sơ cấp thì việc thay đổi áp suất ngược có thể không tạo ra được tỷ lệ hút tối ưu hoặc tạo ra dòng chảy đảo lưu.

Ngoài ra, kết quả mô phỏng còn chỉ ra đồ thị tỷ lệ hút so với áp suất thứ cấp trong điều kiện mỏ Hải Thạch. Khối lượng dòng sơ cấp là không đổi trong điều kiện áp suất thứ cấp giảm. Trong khi đó, tỷ lệ hút và khối lượng dòng thứ cấp là tuyến tính theo áp suất thứ cấp. Mô hình mô phỏng tại mỏ Hải Thạch trong trường hợp này là tương đồng với đồ thị đạt được từ thử nghiệm thực địa tại trạm khí của mỏ Changqing (Petro China) như Chong, Yan và cộng sự [42]. Trong nghiên cứu công bố năm 2009, Chong, Yan và cộng sự đã báo cáo rằng lưu lượng dòng khí tự nhiên sơ cấp tăng tuyến tính với sự gia tăng của áp suất sơ cấp

Phụ lục 1. Kết quả mô hình với các kích thước và điều kiện khác nhau

Mô hình	D _t (mm)	θ	θ	D _p (mm)	NXP	θ	D _{mt} (mm)	θ	L _{mt} (mm)	L _t (mm)	HP Press (bar)	LP Press (bar)	Discharge Press (bar)	Entrainment (%)	HP Flow (kg/s)	LP Flow (kg/s)
Trail A-01 đến A-11	6,118 - 11,96	11,2071	7,0631	12,9434	8,822	13,5	16,6	5,5723	72,4	2,938	120	30	45	-45,49	0,61159	-0,27822
Trail A-21 đến A-33	5,244 - 11,96	11,2071	7,0631	12,9434	8,822	13,5	16,6	5,5723	72,4	2,938	120	30	40	-40,45	0,449665	-0,181894
Trail A-41 đến A-51	3,22 - 5,98	11,2071	7,0631	6,4717	8,822	13,5	8,3	5,5723	72,4	2,938	120	30	40	-33,40	0,158375	-0,0529
Trail A-61 đến A-69	3,68 - 5,98	11,2071	7,0631	6,4717	8,822	13,5	8,3	5,5723	72,4	2,938	120	30	45	0,49%	0,207079	0,0010139
Trail B-01 đến B-09	9,2	11,2071	7,0631	12,9434	8,822	13,5	14,94 - 21,58	5,5723	72,4	2,938	120	30	45	22,75	1,38219	0,31144
Trail B-11 đến B-21	9,2	11,2071	7,0631	12,9434	8,822	13,5	14,94 - 28,22	5,5723	72,4	2,938	120	30	40	22,74	1,3822	0,3144
Trail B-31 đến B-42	4,6	11,2071	7,0631	6,4717	8,822	13,5	6,64 - 14,94	5,5723	72,4	2,938	120	30	40	12,01	0,346197	0,0415637
Trail B-51 đến B-60	4,6	11,2071	7,0631	6,4717	8,822	13,5	6,64 - 13,28	5,5723	72,4	2,938	120	30	45	12,01	0,346198	0,0415912
Trail C-01 đến C-13	9,2	11,2071	7,0631	12,9434	7,4987 - 26,466	13,5	16,6	5,5723	72,4	2,938	120	30	45	37,30	1,3812	0,515273
Trail C-21 đến C-33	9,2	11,2071	7,0631	12,9434	7,4987 - 26,466	13,5	16,6	5,5723	72,4	2,938	120	30	40	37,43	1,37966	0,516387
Trail C-41 đến C-53	4,6	11,2071	7,0631	6,4717	3,5288 - 35,288	13,5	8,3	5,5723	72,4	2,938	120	30	40	39,59	0,323727	0,128176
Trail C-61 đến C-73	4,6	11,2071	7,0631	6,4717	3,5288 - 35,288	13,5	8,3	5,5723	72,4	2,938	120	30	45	39,59	0,323727	0,128172
Trail D-01 đến D-07	9,2	11,2071	7,0631	12,9434	8,822	10,8 - 20,25	16,6	5,5723	72,4	2,938	120	30	45	37,46	1,37656	0,515715
Trail D-11 đến D-17	9,2	11,2071	7,0631	12,9434	14,822	10,8 - 20,25	16,6	5,5723	72,4	2,938	120	30	40	37,38	1,37772	0,514967
Trail D-21 đến D-28	4,6	11,2071	7,0631	6,4717	8,822	9,45 - 21,6	16,6	5,5723	72,4	2,938	120	30	40	39,26	0,346234	0,13594
Trail D-31 đến D-38	4,6	11,2071	7,0631	6,4717	8,822	9,45 - 21,6	16,6	5,5723	72,4	2,938	120	30	45	39,26	0,346234	0,135922
Trail E-01 đến E-06	9,2	11,2071	7,0631	12,9434	20,822	13,5	16,6	6,5723	57,92 - 94,12	2,938	120	30	45	31,67	1,37744	0,4362
Trail E-11 đến E-16	9,2	11,2071	7,0631	12,9434	20,822	13,5	16,6	6,5723	57,92 - 94,12	2,938	120	30	40	37,17	1,37738	0,51194
Trail E-21 đến E-31	4,6	11,2071	7,0631	6,4717	8,822	13,5	16,6	5,5723	14,48 - 130,32	2,938	120	30	40	39,72	0,346162	0,137495
Trail E-41 đến E-51	4,6	11,2071	7,0631	6,4717	8,822	13,5	16,6	5,5723	14,48 - 130,32	2,938	120	30	45	31,56	0,346162	0,10926

và không phụ thuộc vào áp suất thứ cấp [42]. Lưu lượng dòng thứ cấp và tỷ lệ hút entrainment của khí tự nhiên đều tăng tuyến tính với sự gia tăng áp suất thứ cấp dưới mỗi điều kiện áp suất sơ cấp.

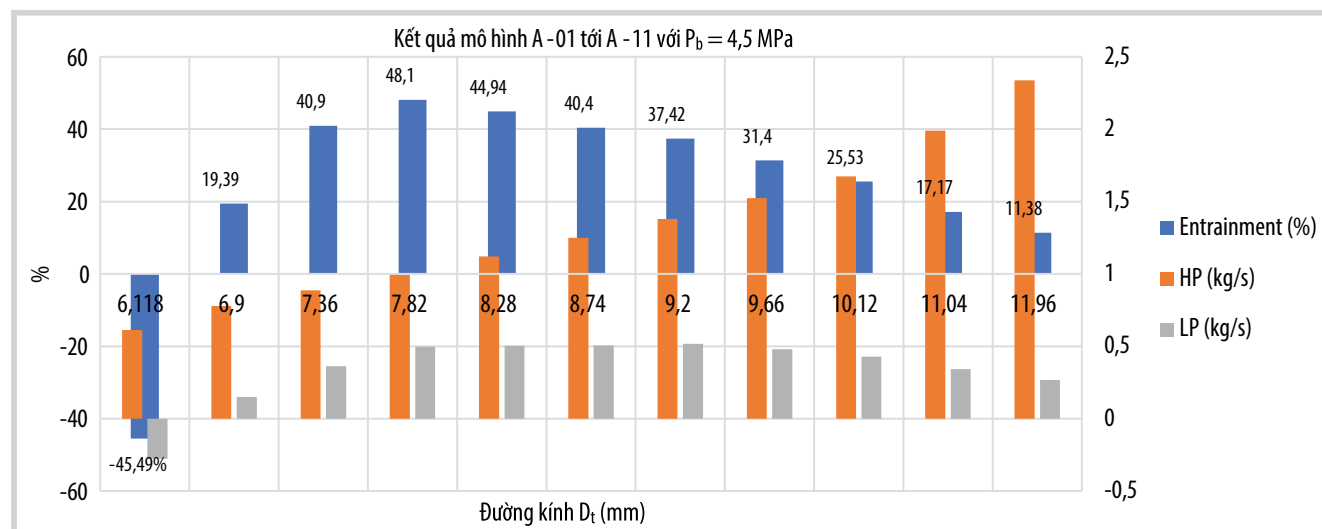
Nghiên cứu ảnh hưởng của việc thay đổi điều kiện vận hành dòng sơ cấp và thứ cấp, Peeran và Sarshar [47] báo cáo rằng nếu tổng lưu lượng của đường sơ cấp và thứ cấp giảm lớn hơn 25% thì phải cần thay đổi họng hội tụ để đảm bảo hiệu suất thiết bị. Do đó, việc có thể giám sát và đảm bảo chế độ hoạt động tối ưu của thiết bị theo thời gian thực (sử dụng các thiết bị đo đạc thực địa) khi so sánh với kết quả mô phỏng CFD là vô cùng cần thiết [31]. Kết quả của mô hình CFD cho phép tính toán phương án vận hành thiết bị bằng cách so sánh hiệu suất của thiết bị theo thời gian thực (sử dụng các thiết bị đo đạc thực địa) với kết

quả mô phỏng CFD. Ngoài ra, có thể áp dụng Ejector sớm hơn so với kế hoạch suy giảm áp của giếng HT (áp suất thứ cấp vẫn còn cao hơn áp suất thiết kế).

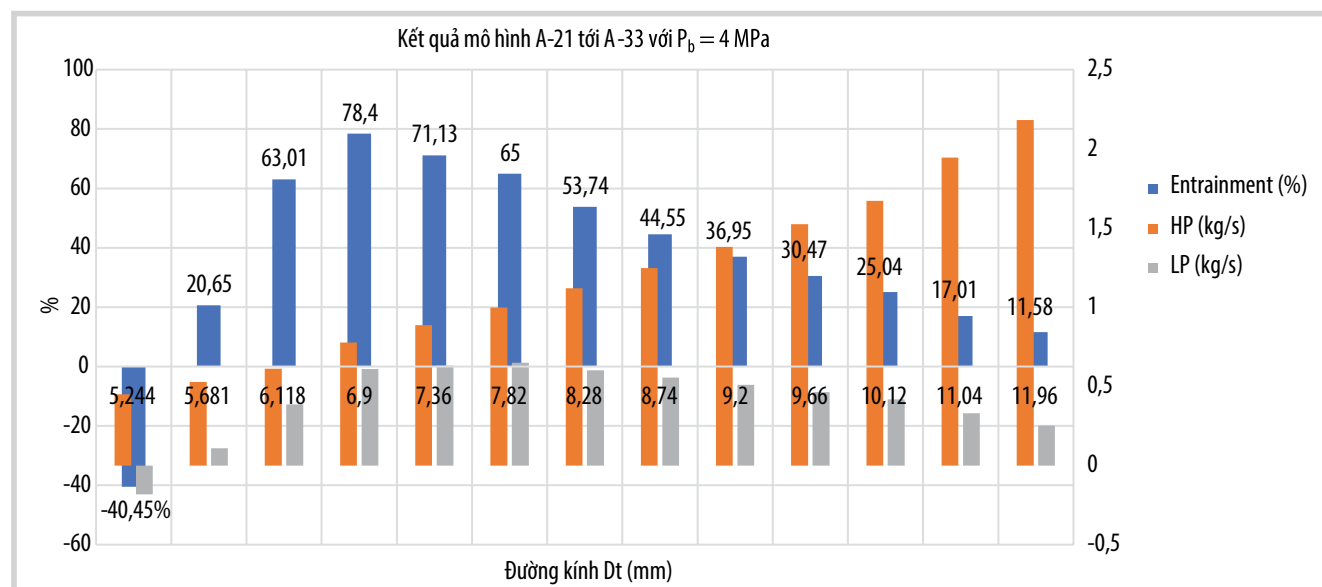
5.1.2. Đường kính họng vòi phun sơ cấp D_t

Trong các nghiên cứu [7, 28, 42], giá trị D_t luôn cố định. Trong nghiên cứu về tối ưu 216 cấu tạo Ejector của Hassan, Elbadawy và cộng sự, giá trị D_t cố định tại 4,6 mm trong khi các giá trị khác được thay đổi [7]. Tuy nhiên, có thể thấy đường kính họng vòi phun sơ cấp D_t là giá trị gây ảnh hưởng rất lớn đến khối lượng dòng sơ cấp và qua đó ảnh hưởng đến tỷ lệ hút như Hình 7 - 10.

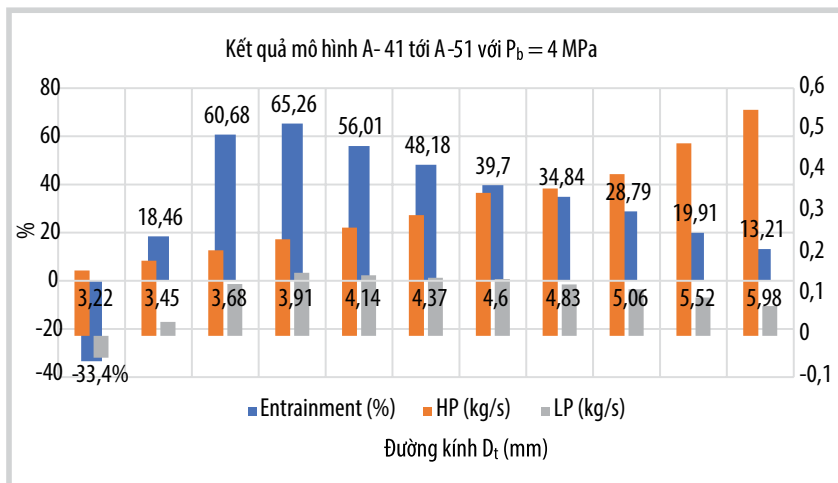
Từ các đồ thị kết quả mô hình trên, có thể thấy luôn có giá trị D_t tối ưu để tỷ lệ hút cao nhất. Tuy nhiên, khi giá trị



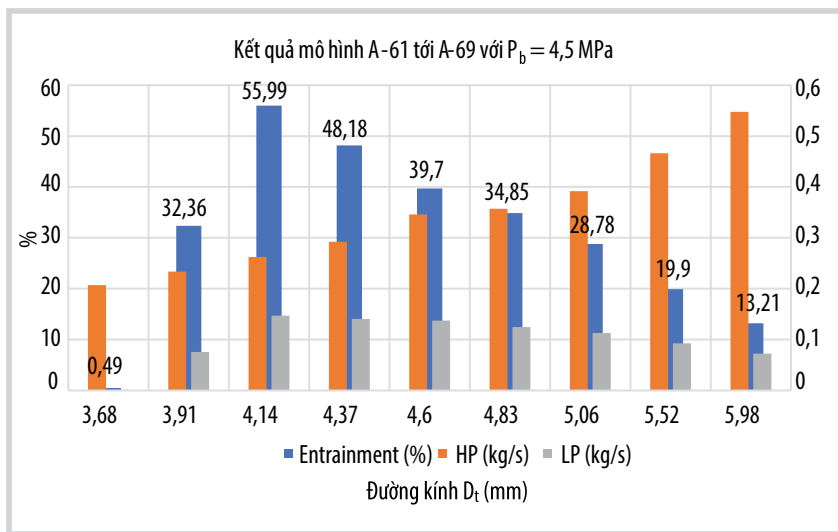
Hình 7. Kết quả mô hình với bộ thông số A-01 đến A-11 trong điều kiện áp suất ngược = 4,5 MPa



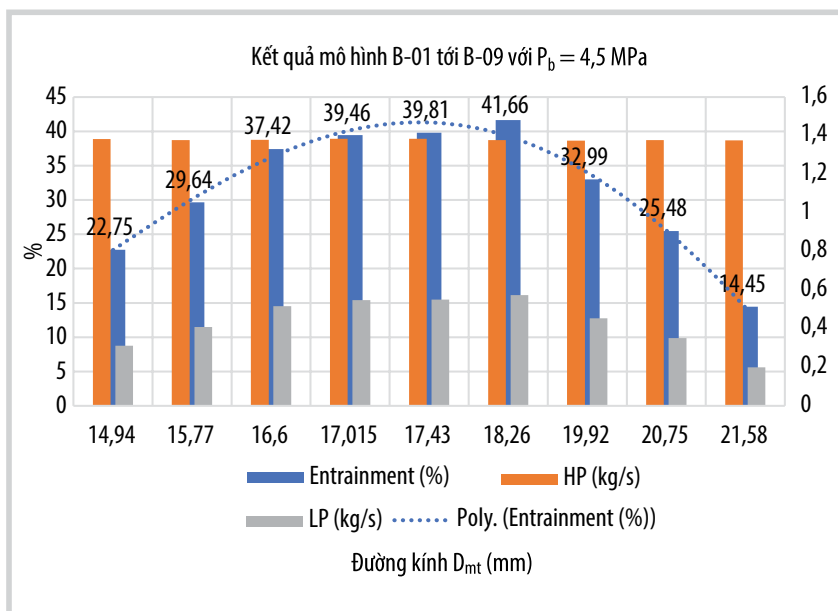
Hình 8. Kết quả mô hình với bộ thông số A-21 đến A-33 trong điều kiện áp suất ngược = 4 MPa



Hình 9. Kết quả mô hình với bộ thông số A-41 đến A-51 trong điều kiện áp suất ngược = 4 MPa



Hình 10. Kết quả mô hình với bộ thông số A-61 đến A-69 trong điều kiện áp suất ngược = 4,5 MPa



Hình 11. Kết quả mô hình với bộ thông số B-01 đến B-09 trong điều kiện áp suất ngược = 4,5 MPa

D_t cao hơn hoặc thấp hơn giá trị D_t tối ưu này thì tỷ lệ hút giảm xuống hoặc tạo ra dòng chảy đảo lưu tại cổng thứ cấp. Lưu lượng dòng sơ cấp tăng tuyến tính theo giá trị D_t . Với cùng một giá trị D_t , khi áp suất ngược tăng lên thì lưu lượng sơ cấp ko đổi. Trong khi đó, lưu lượng dòng thứ cấp bị giảm đi và do đó giảm tỷ lệ hút. Ngoài ra, giá trị D_t tối ưu thay đổi khi áp suất ngược thay đổi.

5.1.3. Đường kính vùng thiết diện không đổi D_{mt}

Nhóm tác giả tiến hành tăng khoảng giá trị mô phỏng D_{mt} (từ 3,32 – 14,11 mm) và rộng hơn (từ 7,13 - 13,662 mm) so với nghiên cứu của Hassan Amin và cộng sự [7]. Kết quả của mô hình B-01 đến B-60 được biểu diễn như Hình 11 - 14.

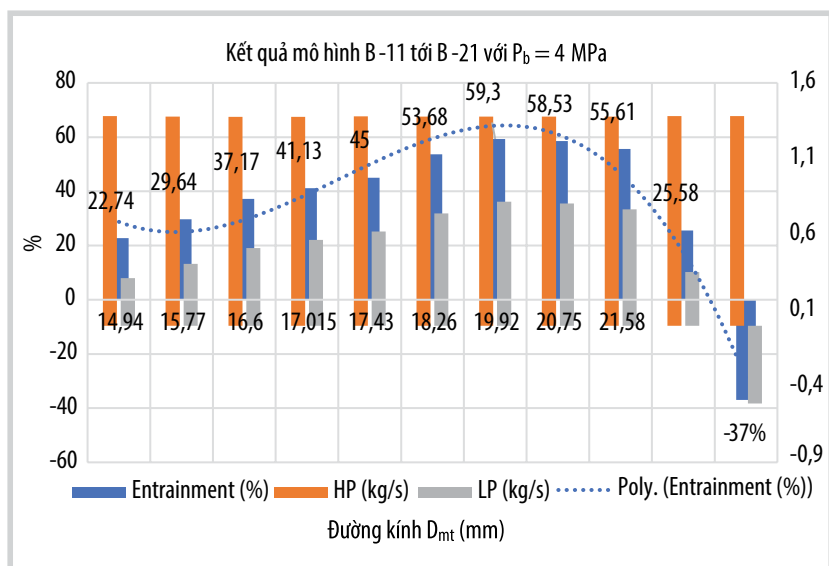
Từ kết quả mô hình, có thể thấy khi D_{mt} thay đổi thì khối lượng dòng sơ cấp không đổi, tuy nhiên khối lượng dòng thứ cấp thay đổi. Khi gia tăng giá trị D_{mt} sẽ tạo ra hiện tượng đảo lưu tại cổng thứ cấp, còn nếu D_{mt} quá thấp sẽ làm giảm hiệu suất rất nhiều. Tại cùng một giá trị D_{mt} , việc gia tăng áp suất ngược sẽ làm giảm hiệu suất hoặc tạo ra dòng đảo lưu.

Ngoài ra, giá trị D_{mt} tối ưu thay đổi khi áp suất ngược thay đổi.

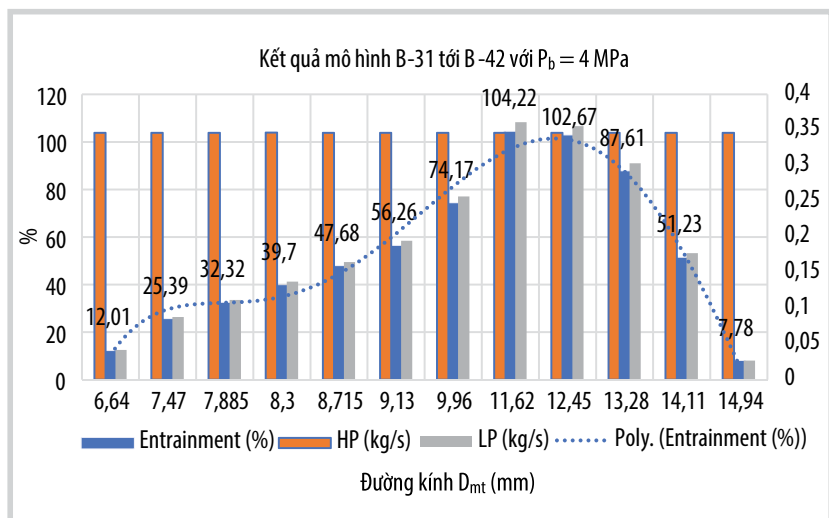
5.1.4. Vị trí vòi hội tụ NXP

Khi thay đổi giá trị vị trí NXP thì tỷ lệ hút entrainment, khối lượng dòng sơ cấp và thứ cấp gần như không thay đổi (Hình 15). Tỷ lệ hút entrainment, khối lượng dòng sơ cấp và thứ cấp không thay đổi tại cùng một giá trị NXP khi giá trị áp suất đầu ra thay đổi. Ngoài ra, giá trị tối ưu của NXP không thay đổi khi áp suất đầu ra thay đổi. Do đó, ảnh hưởng của NXP đến tỷ lệ hút rất nhỏ.

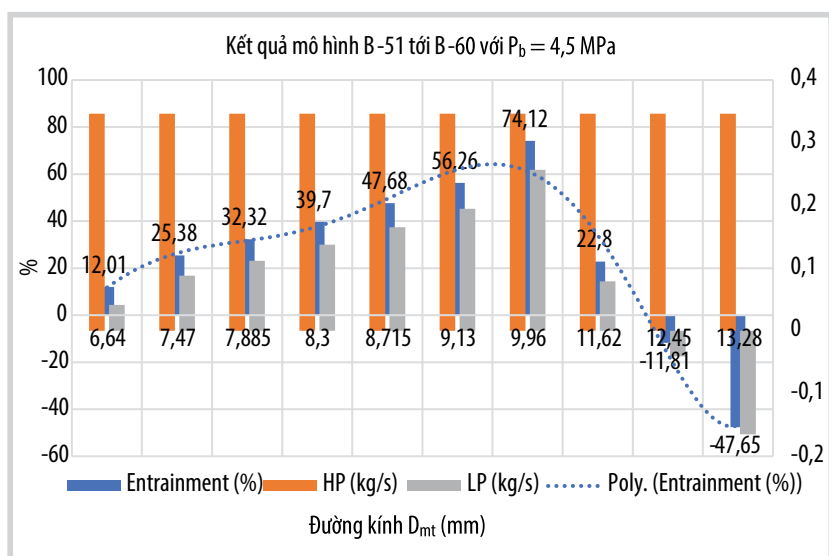
Theo nghiên cứu của W.Chen và cộng sự [28], giá trị vị trí vòi hội tụ tối ưu nằm trong khoảng 3,6 - 7,2 mm.



Hình 12. Kết quả mô hình với bộ thông số B-11 đến B-21 trong điều kiện áp suất ngược = 4 MPa



Hình 13. Kết quả mô hình với bộ thông số B-31 đến B-42 trong điều kiện áp suất ngược = 4 MPa



Hình 14. Kết quả mô hình với bộ thông số B-51 đến B-60 trong điều kiện áp suất ngược = 4,5 MPa

Trong nghiên cứu của Hassan Amin [7], giá trị tối ưu NXP là 8.822 mm. Khi áp dụng cùng một cấu tạo Ejector như của Hassan Amin và cộng sự [7] cho điều kiện mỏ Hải Thạch, giá trị vị trí vòi hội tụ tối ưu là 9,7042 mm.

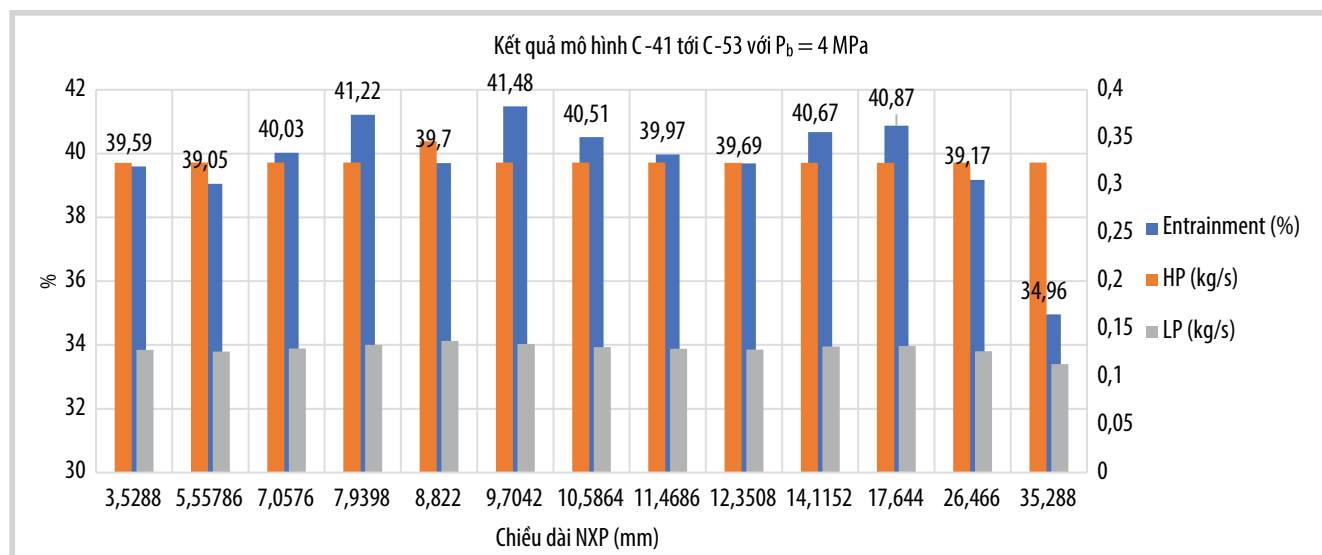
5.1.5. Góc hội tụ buồng trộn cấp θ_s và chiều dài vùng thiết diện không đổi L_{mt}

Khi thay đổi θ_s và L_{mt} thì giá trị tỷ lệ hút entrainment, khối lượng dòng sơ cấp và thứ cấp thay đổi rất nhỏ theo như kết quả mô hình từ D-01 đến E-51. Tỷ lệ hút entrainment, khối lượng dòng sơ cấp và thứ cấp không thay đổi tại cùng một giá trị θ_s và L_{mt} ngay cả khi giá trị áp suất đầu ra thay đổi. Ngoài ra, thay đổi giá trị θ_s và L_{mt} không ảnh hưởng đến khối lượng dòng sơ cấp. Góc hội tụ buồng trộn tối ưu theo nghiên cứu của Wu và cộng sự [48], W.Chen và cộng sự [49] là 14°. Còn trong nghiên cứu của Hassan Amin, Elbadawy và cộng sự, 2019 thì giá trị tối ưu θ_s là 13,5°. Áp dụng các kích thước khác theo nghiên cứu của Hassan Amin và cộng sự [7] cho điều kiện tại mỏ Hải Thạch giá trị tối ưu θ_s cũng là 13,5°.

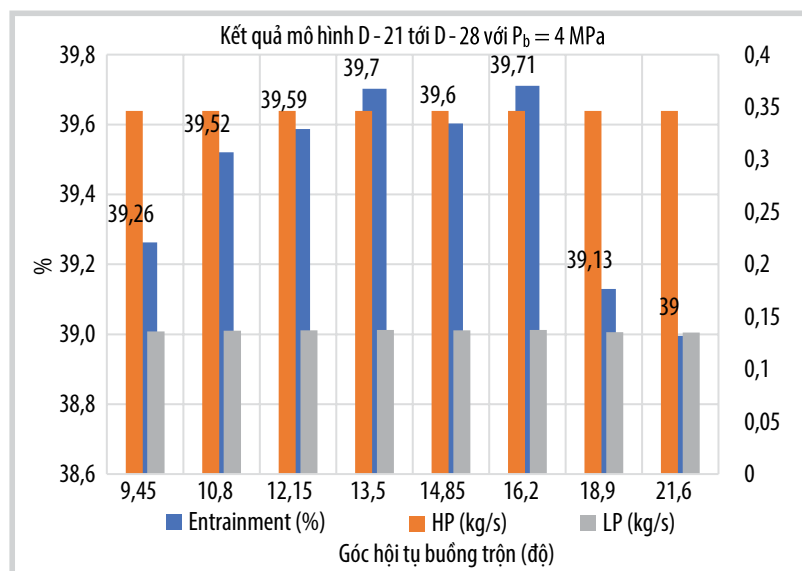
Ngoài ra, các nghiên cứu về tỷ lệ giữa $\frac{D_{mt}}{L_{mt}}$ tối ưu có các kết quả rất khác nhau. Tỷ lệ này tối ưu tại 4,0 theo Chong và cộng sự [42]; 5,0 theo Wu và cộng sự [48] và W.Chen và cộng sự [49]; trong khoảng từ 2 - 8 theo W.Chen và cộng sự [28]. Trong khi đó, giá trị L_{mt} tối ưu theo nghiên cứu của Hassan Amin và cộng sự [7] là 72,4mm và tỷ lệ $\frac{D_{mt}}{L_{mt}} = 15,739$. Khi áp dụng kích thước từ nghiên cứu của Hassan Amin và cộng sự [7] vào điều kiện mỏ HT thì giá trị L_{mt} gần như không tạo ra khác biệt trong dải thay đổi từ 14,48 - 130,32 mm, tương ứng với tỷ lệ $\frac{D_{mt}}{L_{mt}}$ trong khoảng từ 3,15 - 28,3.

5.2. Tối ưu ứng dụng gia tăng thu hồi khí condensate tại mỏ Hải Thạch

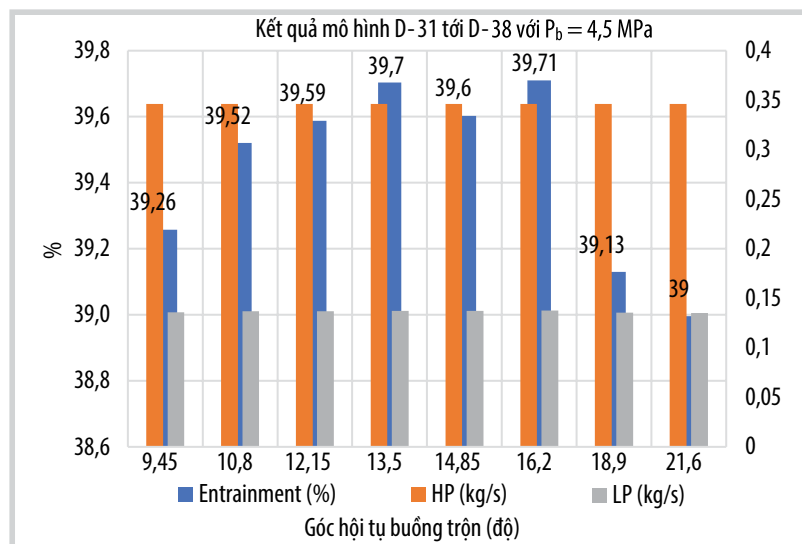
Với từng điều kiện thông số vận hành thiết bị, luôn có một bộ thông số cấu trúc giúp đạt được tỷ lệ hút tối ưu.



Hình 15. Kết quả mô hình với bộ thông số C-41 đến C-53 trong điều kiện áp suất ngược = 4 MPa

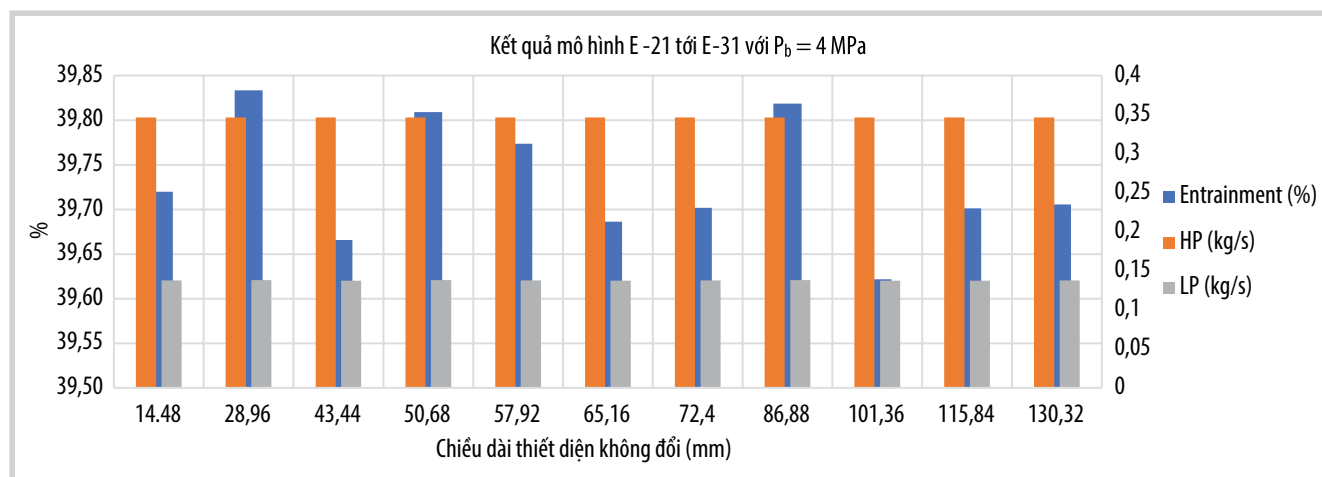


Hình 16. Kết quả mô hình với bộ thông số D-21 đến D-28 trong điều kiện áp suất ngược = 4 MPa

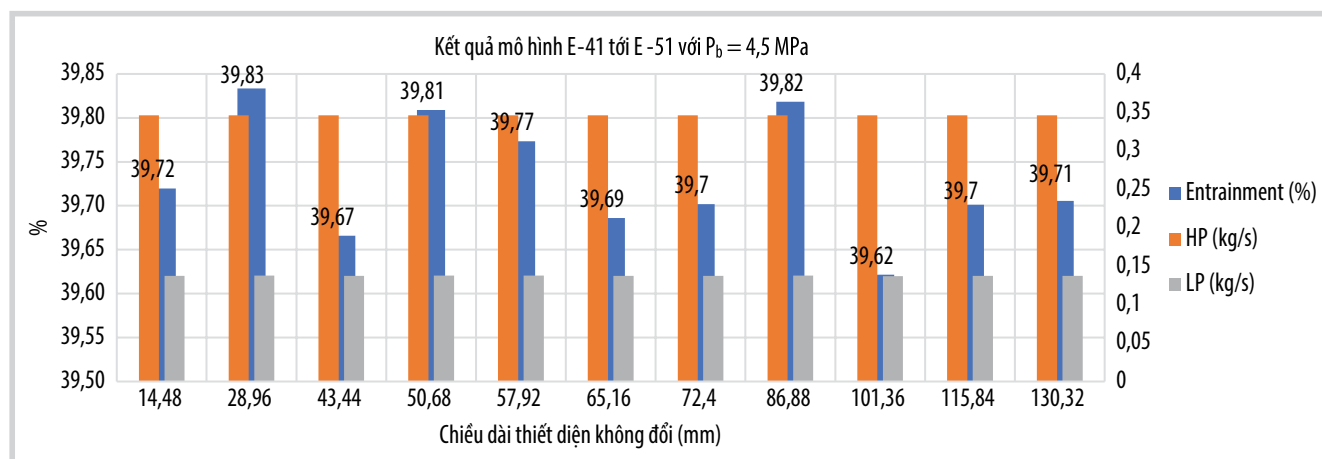


Hình 17. Kết quả mô hình với bộ thông số D-31 đến D-38 trong điều kiện áp suất ngược = 4,5 MPa

Bất kỳ sự thay đổi lớn nào của điều kiện vận hành đường sơ cấp và thứ cấp (thường là giảm so với ban đầu) thì hiệu suất làm việc của Ejector sẽ thay đổi đột ngột, có thể phải thay đổi hình dạng và kích thước các bộ phận bên trong thiết bị Ejector để có thể duy trì và cải thiện hiệu suất làm việc. Để giải quyết vấn đề thay đổi áp suất, lưu lượng của đường sơ cấp và thứ cấp, Peeran và Sarsha đề xuất phương án thiết kế tổng quát [47] cho phép thay đổi các bộ lõi bên trong như: vòi phun, họng hội tụ (mixing tube) mà không cần phải thiết kế lại thiết bị Ejector (như đầu kết nối, thân thiết bị hay bệ đỡ). Một bộ lõi sẽ được thiết kế tối ưu tương ứng cho một dải vận hành nhất định. Bằng cách thay đổi các bộ phận bên trong, thiết bị Ejector có thể gia tăng hiệu suất trở lại nhanh chóng và tiết kiệm. Tại các thời điểm khác nhau ứng với việc suy giảm áp suất dòng sơ cấp, có thể chế tạo các bộ phận bên trong để sẵn sàng thay thế. Phương pháp được sử dụng để tính toán được số lượng các bộ lõi bên trong Ejector theo nghiên cứu của Maulana Araci, Al-Ashaab và cộng sự, được gọi là Set-Based Concurrent Engineering (SBCE). Phương pháp này rất cần thiết trong việc gia tăng thu hồi khí trong thời gian dài với các điều kiện vận hành liên tục thay đổi hoặc có nhiều giếng khác nhau cần được gia tăng thu hồi. Thực tế, việc thu hồi khí



Hình 18. Kết quả mô hình với bộ thông số E-21 đến E-31 trong điều kiện áp suất ngược = 4 MPa



Hình 19. Kết quả mô hình với bộ thông số E-41 đến E-51 trong điều kiện áp suất ngược = 4,5 MPa

của nhiều giếng khí như của BIENDONG POC sẽ cần nhiều bộ lõi Ejector được tính toán và thiết kế trước nhằm tối ưu khả năng thu hồi cũng như đảm bảo việc vận hành thiết bị thường xuyên. Nhóm tác giả đã đánh giá việc áp dụng phương pháp SBCE trong nghiên cứu phát triển sản phẩm và mô phỏng CFD đạt được hiệu quả tốt do giảm các mẫu thử, đẩy nhanh quá trình nghiên cứu và tối ưu được lượng sản phẩm thu hồi [50].

Dựa trên kết quả của mô hình CFD, nghiên cứu này đã chỉ ra kích thước đường kính họng vòi phun sơ cấp D_v, đường kính vùng thiết diện không đổi D_i có ảnh hưởng lớn nhất đến tỷ lệ hút entrainment. Trong khi đó, các giá trị khác là vị trí vòi hội tụ NXP, góc hội tụ buồng trộn và chiều dài vùng thiết diện không đổi chỉ có ảnh hưởng nhỏ đến hiệu suất thiết bị. Kết quả này tương đồng với nghiên cứu của Carrilo, Sanchez và cộng sự khi nghiên cứu tối ưu hóa đặc điểm cấu tạo thiết bị Ejector một pha sử dụng cho hệ thống làm lạnh [44]. Nhóm tác giả nhận định đường kính vòi phun sơ cấp và đường kính phần thiết diện không đổi có ảnh hưởng lớn nhất đến hiệu suất thiết bị. Những

thông số khác của cấu tạo thiết bị có ảnh hưởng rất nhỏ hoặc không có ảnh hưởng. Do đó, để có thể tìm được cấu tạo (hoặc nhiều bộ cấu tạo) Ejector tối ưu cho điều kiện mỏ Hải Thạch thì hàm ràng buộc phải gồm:

$$\left\{ \begin{aligned} \omega &= f(P_p, P_s, P_b, D_v, D_{mt}, \theta_s, NXP, L_{mt}) = \frac{m_s}{m_p} \\ m_p &\leq m_{p-max} \\ m_s &> 0 \\ P_{b-max} &= 4,5 MPa \end{aligned} \right.$$

Trong đó, m_{p-max} là giá trị lưu lượng tối đa của phương án 1 (40 triệu ft³ chuẩn/ngày) và phương án 2 (10,5 triệu ft³ chuẩn/ngày). Hàm đa mục tiêu gồm việc đảm bảo tỷ lệ hút entrainment ω là tối đa. Ngoài ra, giá trị của áp suất thứ cấp mà tại đó Ejector vẫn cho tỷ lệ hút dương (gọi là P_{s-min}) phải là tối thiểu. Như vậy, Ejector có thể tận thu giếng tới áp suất thấp nhất. Do đó, hàm mục tiêu như sau:

$$\left\{ \begin{aligned} \omega &\text{ là } max \\ P_{s-min} &\text{ là } min \\ P_{b-max} &\end{aligned} \right.$$

6. Kết luận

Việc xây dựng mô hình hoạt động chính xác của thiết bị Ejector bằng phương pháp mô phỏng CFD hỗn hợp khí tự nhiên hỗ trợ hiệu quả cho việc nghiên cứu triển khai giải pháp gia tăng thu hồi cho mỏ khí, condensate. Tại mỏ Hải Thạch, 2 phương án lấy khí từ giếng tốt nhất hoặc dùng khí tại đầu ra của máy nén khí cao áp để làm nguồn dẫn động để gia tăng thu hồi sử dụng thiết bị Ejector đã được mô phỏng CFD.

Kết quả nghiên cứu đã đưa ra mô hình có độ tin cậy cao và được sử dụng để nghiên cứu ảnh hưởng các thông số kích thước cấu tạo đến hiệu suất Ejector trong điều kiện làm việc tại mỏ Hải Thạch. Thông qua kết quả mô hình, đường kính họng vòi phun sơ cấp (D_t) và đường kính vùng thiết diện không đổi (D_{mt}) có ảnh hưởng lớn nhất đến hiệu suất của Ejector. Đường kính họng vòi phun sơ cấp ảnh hưởng chính đến khối lượng dòng chất lưu sơ cấp. Trong khi đó, đường kính vùng thiết diện không đổi tác động đến khối lượng dòng thứ cấp. Luôn có một giá trị tối ưu của D_t và D_{mt} tương ứng với điều kiện áp suất sơ cấp, thứ cấp và áp suất ngược. Việc tăng hay giảm so với giá trị tối ưu của nó sẽ làm giảm hiệu suất thiết bị hoặc gây ra hiện tượng dòng chảy đảo lưu tại cổng thứ cấp. Trong khi đó, vị trí vòi hội tụ NXP, góc hội tụ buồng trộn cấp θ_s và chiều dài vùng thiết diện không đổi L_{mt} có ảnh hưởng rất nhỏ đến tỷ lệ hút entrainment, khối lượng dòng sơ cấp và thứ cấp. Trong điều kiện tại mỏ Hải Thạch, luôn có một giá trị tối ưu của bộ thông số bao gồm đường kính họng vòi phun sơ cấp (D_t) và đường kính vùng thiết diện không đổi (D_{mt}), vị trí vòi hội tụ NXP, góc hội tụ buồng trộn cấp θ_s và chiều dài vùng thiết diện không đổi L_{mt} cho mỗi giá trị áp suất ngược tương ứng với áp suất đầu vào hệ thống công nghệ. Cuối cùng, bài toán tối ưu quy hoạch phi tuyến đa mục tiêu cho ứng dụng gia tăng thu hồi khí và condensate cho mỏ Hải Thạch được xây dựng thông qua kết quả mô phỏng các mô hình.

Phương hướng nghiên cứu tiếp theo về gia tăng thu hồi khí condensate bằng thiết bị Ejector bao gồm việc tối ưu hóa cấu tạo hình học Ejector khí tự nhiên với bộ thông số vận hành của mỏ Hải Thạch và Mộc Tinh trong tương lai gắn với bài toán quy hoạch phi tuyến đa mục tiêu. Ngoài ra, việc gia tăng thu hồi khí kéo dài tại 2 mỏ có thể sẽ đòi hỏi nhiều bộ lõi khác nhau. Vì vậy, hướng nghiên cứu nữa là tối ưu được số lượng thiết kế bộ lõi này và qua đó thu hồi được lượng sản phẩm lớn hơn tại cụm mỏ Hải Thạch - Mộc Tinh.

Tài liệu tham khảo

- [1] A.J.Green, Kevin Ashton, and A.T.Reade, "Gas production improvements using ejectors", *Offshore Europe, Aberdeen, United Kingdom, 7 - 10 September, 1993*. DOI: 10.2118/26684-MS.
- [2] M.M.Sarshar, "Jet-boosting the profitability of marginal oil and gas fields", *World Pumps*, Vol. 387, pp. 24 - 26, 1998. DOI: 10.1016/S0262-1762(99)80605-1.
- [3] Marco Villa, Giambattista De Ghetto, Francesco Paone, Giancarlo Giacchetta, and Maurizio Bevilacqua, "Ejectors for boosting low-pressure oil wells", *SPE Production & Facilities*, Vol. 14, No. 4, pp. 229 - 234, 1999. DOI: 10.2118/59091-PA.
- [4] P.Andreussi, S.Sodini, V.Faluomi, P.Ciandri, A.Ansiati, F.Paone, C.Battaia, and G.De Ghetto, "Multiphase ejector to boost production: First application in the Gulf of Mexico", *Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 5 - 8 May, 2003*. DOI: 10.4043/15170-MS.
- [5] Trần Ngọc Trung, Triệu Hùng Trường, Ngô Hữu Hải, Trần Vũ Tùng, và Lý Văn Dao, "Nghiên cứu xây dựng mô hình mô phỏng động lực học chất lỏng tính toán (CFD) cho thiết bị Ejector sử dụng nâng cao tỷ lệ thu hồi mỏ khí condensate Hải Thạch", *Tạp chí Dầu khí*, Số 5, tr. 14 - 24, 2020.
- [6] Bourhan M.Tashtoush, Moh'd A.Al-Nimr, and Mohammad A.Khasawneh, "A comprehensive review of ejector design, performance, and applications", *Applied Energy*, Vol. 240, pp. 138 - 172, 2019. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.185.
- [7] Amin Hassan Amin, Ibrahim Elbadawy, E.Elgendy, and M.Fatouh, "Effect of geometrical factors interactions on design optimization process of a natural gas ejector", *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 9, 2019. DOI: 10.1177/1687814019880368.
- [8] Daotong Chong, Mengqi Hu, Weixiong Chen, Jinshi Wang, Jiping Liu, and Junjie Yan, "Experimental and numerical analysis of supersonic air ejector", *Applied Energy*, Vol. 130, pp. 679 - 684, 2014. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.02.023.
- [9] Dariusz Butrymowicz, Kamil Śmierciew, Jarosław Karwacki, and Jerzy Gagan, "Experimental investigations of low-temperature driven ejection refrigeration cycle operating with isobutane", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 39, pp. 196 - 209, 2014. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2013.10.008.

- [10] Kanjanapon Chunnanond and Satha Aphornratana, "An experimental investigation of a steam ejector refrigerator: the analysis of the pressure profile along the ejector", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, No. 2, pp. 311 - 322, 2004. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2003.07.003.
- [11] Satha Aphornratana and Ian W.Eames, "A small capacity steam-ejector refrigerator: Experimental investigation of a system using ejector with movable primary nozzle", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 20, No. 5, pp. 352 - 358, 1997. DOI: 10.1016/S0140-7007(97)00008-X.
- [12] R.Yapıcı, H.K.Ersoy, A.Aktoprakoğlu, H.S.Halkacı, and O.Yiğit, "Experimental determination of the optimum performance of ejector refrigeration system depending on ejector area ratio", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 31, No. 7, pp. 1183 - 1189, 2008. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2008.02.010.
- [13] Jia Yan, Wenjian Cai, and Yanzhong Li, "Geometry parameters effect for air-cooled ejector cooling systems with R134a refrigerant", *Renewable Energy*, Vol. 46, pp. 155 - 163, 2012. DOI: 10.1016/j.renene.2012.03.031."
- [14] E.Rusly, Lu Aye, W.W.S.Charters, and A.Ooi, "CFD analysis of ejector in a combined ejector cooling system", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 28, No. 7, pp. 1092 - 1101, 2005. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2005.02.005.
- [15] I.W.Eames, S.Wu, M.Worall, and S.Aphornratana, "An experimental investigation of steam ejectors for applications in jet-pump refrigerators powered by low-grade heat", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, Vol. 213, pp. 351 - 361, 1999. DOI: 10.1243/0957650991537734.
- [16] Szabolcs Varga, Armando C.Oliveira, and Bogdan Diaconu, "Influence of geometrical factors on steam ejector performance - A numerical assessment", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 32, No. 7, pp. 1694 - 1701, 2009. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2009.05.009.
- [17] Yan Jia and Cai Wenjian, "Area ratio effects to the performance of air-cooled ejector refrigeration cycle with R134a refrigerant", *Energy Conversion and Management*, Vol. 53, No. 1, pp. 240 - 246, 2012. DOI: 10.1016/j.enconman.2011.09.002.
- [18] Tony Utomo, Myongkuk Ji, Pilhwan Kim, Hyomin Jeong, and Hanshik Chung, "CFD analysis on the influence of converging duct angle on the steam ejector performance", 2008.
- [19] Michal Palacz, Michal Haida, Jacek Smolka, Andrzej J.Nowak, Krzysztof Banasiak, and Armin Hafner, "HEM and HRM accuracy comparison for the simulation of CO₂ expansion in two-phase ejectors for supermarket refrigeration systems", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 115, pp. 160 - 169, 2017. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.122.
- [20] Lei Wang, Jia Yan, Chen Wang, and Xianbi Li, "Numerical study on optimization of ejector primary nozzle geometries", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 76, pp. 219 - 229, 2017. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2017.02.010.
- [21] Kangkang Xue, Kaihua Li, Weixiong Chen, Daotong Chong, and Junjie Yan, "Numerical investigation on the performance of different primary nozzle structures in the supersonic Ejector", *Energy Procedia*, Vol. 105, pp. 4997 - 5004, 2017. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1000.
- [22] Moon Soo Lee, Hoseong Lee, Yunho Hwang, Reinhard Radermacher, and Hee-Moon Jeong, "Optimization of two-phase R600a ejector geometries using a non-equilibrium CFD model", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 109, pp. 272 - 282, 2016. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.08.078.
- [23] K.Pianthong, W.Seehanam, M.Behnia, T.Sriveerakul, and S.Aphornratana, "Investigation and improvement of ejector refrigeration system using computational fluid dynamics technique", *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, No. 9, pp. 2556 - 2564, 2007. DOI: 10.1016/j.enconman.2007.03.021.
- [24] J.H.Keenan and E.P.Neumann, "A Simple air Ejector", *Transactions of American Society of Mechanical Engineers*, Vol. 64, 1942.
- [25] Heuy-Dong Kim, Toshiaki Setoguchi, Shen Yu, and S.Raghunathan, "Navier-Stokes computations of the supersonic ejector-diffuser system with a second throat", *Journal of Thermal Science*, Vol. 8, No. 2, pp. 79 - 83, 1999. DOI:10.1007/s11630-999-0028-2.
- [26] James R.DeBonis, "Full Navier-Stokes analysis of a two-dimensional mixer/ejector nozzle for noise suppression", *AIAA/SAE/ASME/ASEE 28th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Nashville, Tennessee, 6 - 8 July, 1992*. DOI:10.2514/6.1992-3570.
- [27] Weixiong Chen, Huiqiang Chen, Chaoyin Shi, Kangkang Xue, Daotong Chong, and Junjie Yan, "A novel ejector with a bypass to enhance the performance". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 93, pp. 939 - 946, 2016. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.067.

- [28] Weixiong Chen, Daotong Chong, Junjie Yan, and Jiping Liu, "The numerical analysis of the effect of geometrical factors on natural gas ejector performance", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 59, No. 1, pp. 21 - 29, 2013. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.04.036.
- [29] Weixiong Chen, Huiqiang Chen, Chaoyin Shi, Kangkang Xue, Daotong Chong, and Junjie Yan, "Impact of operational and geometrical factors on ejector performance with a bypass", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 99, pp. 476 - 484, 2016. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.074.
- [30] Weixiong Chen, Kangkang Xue, Yingchun Wang, Daotong Chong, and Junjie Yan, "Numerical assessment on the performance of two-stage ejector to boost the low-pressure natural gas", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 34, pp. 575 - 584, 2016. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.07.031.
- [31] Weixiong Chen, Chenxi Huang, Daotong Chong, and Junjie Yan 2019, "Numerical assessment of ejector performance enhancement by means of combined adjustable-geometry and bypass methods", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 149, pp. 950 - 959, 2019. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.12.052.
- [32] G.W.Clanton, "Design and application of the gas jet Ejector on marginal gas wells", *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 18, No. 4, pp. 419 - 423, 1966. DOI: 10.2118/1274-PA.
- [33] Yann Bartosiewicz, Philippe Desevaux, Zine Aidoun, and Yves Mercadier, "CFD-Experiments integration in the evaluation of six turbulence models for supersonic Ejectors modeling", *Proceedings of Integrating CFD and Experiments Conference, Glasgow, UK, 2003*.
- [34] Yin Hai Zhu and Peixue Jiang, "Experimental and numerical investigation of the effect of shock wave characteristics on the ejector performance", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 40, pp. 31 - 42, 2013. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2013.11.008.
- [35] Adrienne B.Little and Srinivas Garimella, "Shadowgraph visualization of condensing R134a flow through ejectors", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 68, pp. 118 - 129, 2016. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2016.04.018.
- [36] Y.Bartosiewicz, ZineAidoun, P.Desevaux, and Yves Mercadier, "Numerical and experimental investigations on supersonic ejectors", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 26, No. 1, pp. 56 - 70, 2005. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2004.07.003.
- [37] Yin Hai Zhu, Wenjian Cai, Changyun Wen, and Yanzhong Li, "Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 5 - 6, pp. 898 - 905, 2009. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2008.04.025.
- [38] NIST Chemistry WebBook, *NIST standard reference database number 69*, 2018. DOI: 10.18434/T4D303.
- [39] P.J.Roache, "Perspective: A method for uniform reporting of grid refinement studies ", *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 116, No. 3, pp. 405 - 413, 1994. DOI: 10.1115/1.2910291.
- [40] P.J.Roache, "Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 29, pp. 123 - 160, 1997. DOI: 10.1146/annurev.fluid.29.1.123.
- [41] P.J.Roache, "Verification of codes and calculations", *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 5, pp. 696 - 702, 1998. DOI: 10.2514/2.457.
- [42] Daotong Chong, Junjie Yan, Gesheng Wu, and Jiping Liu, "Structural optimization and experimental investigation of supersonic ejectors for boosting low pressure natural gas", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 14, pp. 2799 - 2807, 2009. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2009.01.014.
- [43] Weixiong Chen, Daotong Chong, Junjie Yan, Sheng-Chao Dong, and Ji-Ping Liu, "Numerical investigation of Two-Phase flow in natural gas Ejector", *Heat Transfer Engineering*, Vol. 35, 2014. DOI: 10.1080/01457632.2013.838069.
- [44] José Antonio Expósito Carrillo, Francisco José Sánchez de La Flor, and José Manuel Salmerón Lissén, "Single-phase ejector geometry optimisation by means of a multi-objective evolutionary algorithm and a surrogate CFD model", *Energy*, Vol. 164, pp. 46 - 64, 2018. DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.176.
- [45] B.J.Huang, C.B.Jiang, and F.L.Hu, "Ejector performance characteristics and design analysis of jet refrigeration system", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 107, No. 3, pp. 792 - 802, 1985. DOI: 10.1115/1.3239802.
- [46] Jianyong Chen, Sad Jarall, Hans Havtun, and Björn Palm, "A review on versatile ejector applications in refrigeration systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 49, pp. 67 - 90, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.073.

[47] Syed M.Peeran and N.Beg S.Sarshar, "Novel examples of the use of surface jet pumps (SJPs) to enhance production & processing. Case studies & lessons learnt", *North Africa Technical Conference and Exhibition, Cairo, Egypt*, 15 - 17 April, 2013. DOI: 10.2118/165382-MS.

[48] Gesheng Wu, Daotong Chong, Weixiong Chen, and Junjie Yan, "Supersonic ejector to boost production from low pressure natural gas field", *International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring*, 19 - 20 February, 2011. DOI: 10.1109/CDCIEM.2011.146.

[49] Weixiong Chen, Daotong Chong, Junjie Yan, and Jiping Liu, "Numerical optimization on the geometrical factors of natural gas ejectors", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, No. 8, pp. 1554 - 1561, 2011. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2011.02.026.

[50] Zehra C.Araci, Ahmed Al-Ashaab, Piotr W.Lasiz, Jakub W.Flisiak, Muhd I.I.Maulana, Najam Beg, and Abdullah Rehman, "Trade-off curves applications to support Set-based design of a surface jet pump", *Procedia CIRP*, Vol. 60, pp. 356 - 361, 2017. DOI: 10.1016/j.procir.2017.01.028.

STRUCTURAL INVESTIGATION OF SUPERSONIC EJECTOR FOR BOOSTING LOW PRESSURE WELLS IN HAI THACH GAS CONDENSATE FIELD

Tran Ngoc Trung¹, Tran Vu Tung¹, Ly Van Dao¹, Ngo Huu Hai¹, Trieu Hung Truong²

¹Bien Dong Petroleum Operation Company (BIENDONG POC)

²Hanoi University of Mining and Geology

Email: trungtn@biendongpoc.vn

Summary

To recover gas and condensate at pressure-reducing wells simultaneously with other wells which still give stable flow rate and pressure, a method using a surface device called ejector has been studied to evaluate its technical feasibility and economic efficiency. Ejector is a simple, low-cost solution which can be deployed quickly to increase recovery for pressure-reduced gas condensate wells.

The paper presents a numerical method to study the ejector's performance based on a set of parameters (entrainment and compression ratios). The fluid flowing inside the Ejector is simulated using computational fluid dynamic (CFD) technique. The results of the CFD model was used to study the effect of geometrical dimensions on the ejector's performance under Hai Thach field's operating conditions. The primary nozzle (D_t) and the constant cross-sectional area diameter (D_{mt}) have the highest impact on the ejector's performance. The diameter of the primary nozzle (D_t) mainly affects the primary fluid flow. Meanwhile, the constant cross-sectional diameter (D_{mt}) affects the secondary fluid flow. The multi-objective nonlinear programming optimisation technique for ejector application to increase the recovery of gas and condensate for Hai Thach field was developed based on the simulation results of CFD models.

Key words: Ejector, CFD, boosting gas and condensate production, Hai Thach Field.