

Potential applications of foam pig technology in cleaning oil and gas pipelines in Vietnam



Thanh Van Nguyen^{1,*}, Duyen Quang Le¹, Long Khac Nguyen¹, Toan Huu To¹, Dung Quoc Nguyen², Thanh Viet Vu²

¹ Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

² Joint Venture Vietsovpetro, Ho Chi Minh City, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:
Received 2nd Sept. 2025
Revised 3rd Jan. 2026
Accepted 28th Jan. 2026

Keywords:
CFD,
Foam Pig,
Non-Newtonian,
Non-piggable,
Paraffin deposition,
Pipe cleaning.

ABSTRACT

Wax, asphaltene and solid deposition in infield oil and gas pipelines is a major cause of increased pressure loss, reduced throughput and operational risks. In Vietnam, many infield pipelines were constructed decades ago without pig launching and receiving facilities or exhibit complex geometries, which limits the applicability of conventional mechanical pigging techniques. This paper presents the scientific basis, international research overview and field-test-based assessment of the applicability of Foam Pig technology for oil and gas pipeline cleaning in Vietnam. Based on a critical review of representative international studies, the paper summarizes major technological advances, advantages and remaining technical challenges associated with Foam Pig application in non-piggable pipelines. Particular emphasis is placed on the analysis of industrial trial data obtained from the MSP-A → MSP-B pipeline at the Bach Ho field. The experimental results are interpreted using the Herschel–Bulkley rheological model to clarify the influence of key operating parameters, including driving pressure, gas injection rate and gel rheological properties, on Foam Pig movement stability and cleaning efficiency. The results indicate that, when an appropriate rheological operating window and driving regime are selected, Foam Pig can travel stably through pipeline bends, maintain sufficient circumferential sealing, and achieve wax removal efficiency exceeding 90%, while being fully recovered without structural damage. By integrating theoretical analysis, field trial results and international experience, this study proposes a technical evaluation framework for assessing the applicability of Foam Pig technology to infield pipelines under Vietnamese operating conditions. In addition, a group of candidate pipelines suitable for Foam Pig application is identified. The findings provide a scientific basis for the standardization and wider deployment of Foam Pig technology in Vietnam’s oil and gas industry.

Copyright © 2026 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

E - mail: nguyenvanthanh@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2026.67(3).11



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <https://tapchi.humg.edu.vn>

Công nghệ làm sạch đường ống vận chuyển dầu khí bằng Foam Pig và khả năng ứng dụng tại Việt Nam

Nguyễn Văn Thành^{1,*}, Lê Quang Duyệt¹, Nguyễn Khắc Long¹, Tô Hữu Toàn¹, Nguyễn Quốc Dũng², Vũ Việt Thanh²

¹ Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

² Liên Doanh Việt - Nga Vietsovpetro, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:

Nhận bài 02/9/2025

Sửa xong 03/01/2026

Chấp nhận đăng 28/01/2026

Từ khóa:

CFD,

Foam Pig,

Làm sạch tuyến ống,

Lắng đọng paraffin,

Non-piggable,

Phi Newton.

TÓM TẮT

Lắng đọng paraffin, asphaltene và cặn cơ học trong các tuyến ống vận chuyển dầu khí nội mỏ là nguyên nhân làm gia tăng tổn thất áp suất, suy giảm lưu lượng và tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn vận hành. Trong điều kiện thực tế tại Việt Nam, nhiều tuyến ống được xây dựng từ lâu, không được trang bị hệ thống phóng–thu nhận pig hoặc có hình học phức tạp, khiến các phương pháp pig cơ học truyền thống khó hoặc không thể áp dụng được. Bài báo này trình bày cơ sở khoa học, tổng quan các nghiên cứu và kết quả thử nghiệm thực tế về khả năng ứng dụng công nghệ Foam Pig trong làm sạch đường ống vận chuyển dầu khí tại Việt Nam. Trên cơ sở tổng hợp và phân tích các công bố quốc tế tiêu biểu, nghiên cứu làm rõ những tiến bộ công nghệ, ưu điểm và các tồn tại kỹ thuật của Foam Pig khi áp dụng cho các tuyến ống “non-piggable”. Đặc biệt, dữ liệu thử nghiệm tại tuyến MSP-A → MSP-B mỏ Bạch Hổ được sử dụng để đối chiếu với mô hình lưu biến Herschel–Bulkley, qua đó đánh giá ảnh hưởng của các thông số vận hành như áp suất bơm đẩy, lưu lượng khí và đặc tính gel đến khả năng di chuyển và hiệu quả làm sạch của Foam Pig. Kết quả cho thấy, khi lựa chọn phù hợp cửa số lưu biến và chế độ vận hành, Foam Pig có thể di chuyển ổn định qua các đoạn cong, đạt hiệu quả loại bỏ paraffin trên 90% và được thu hồi nguyên vẹn, đáp ứng yêu cầu vận hành an toàn. Từ các phân tích lý thuyết, thực nghiệm và kinh nghiệm quốc tế, bài báo đề xuất khung đánh giá khả năng áp dụng Foam Pig cho các tuyến ống nội mỏ tại Việt Nam, đồng thời xây dựng danh mục các tuyến tiềm năng. Kết quả nghiên cứu góp phần cung cấp cơ sở khoa học cho việc chuẩn hóa và mở rộng ứng dụng công nghệ Foam Pig trong ngành dầu khí Việt Nam.

© 2026 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

*Tác giả liên hệ

E - mail: nguyenvanthanh@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2026.67(3).11

1. Mở đầu

Trong khai thác dầu khí, quá trình vận chuyển sản phẩm khai thác qua các tuyến ống nội mỏ thường gặp vấn đề lắng đọng paraffin, asphaltene và cặn cơ học, gây tăng tổn thất áp suất và suy giảm hiệu suất vận hành (Singh và nnk., 2000). Việc vệ sinh định kỳ bằng pig cơ học là giải pháp phổ biến, song nhiều tuyến ống trong các mỏ Việt Nam được xây dựng từ lâu và không đồng bộ, không có hệ thống phóng và thu pig (launcher/receiver) hoặc có hình học phức tạp, nhiều đoạn cong, hoặc có đường kính khác nhau khiến việc sử dụng pig cứng truyền thống không khả thi.

Trong bối cảnh đó, Foam Pig - dạng thoi mềm có cấu trúc xếp đàn hồi, có thể nén biến dạng khi di chuyển qua các khúc cong và chênh tiết diện - được xem là giải pháp tiềm năng thay thế. Công nghệ này đã được áp dụng thành công ở một số quốc gia có điều kiện tương đồng, như Brazil (Lima và Alves, 1995) hay Trung Quốc (Gao và nnk., 2021), và được thử nghiệm lần đầu tại Việt Nam trên tuyến MSP-A → MSP-B mỏ Bạch Hổ.

Mục tiêu của nghiên cứu này là tổng hợp cơ sở lý thuyết, đánh giá kết quả thử nghiệm và xây dựng khung khoa học cho việc mở rộng ứng dụng Foam Pig tại các mỏ dầu khí Việt Nam.

Bài báo phân tích, luận giải các kết quả áp dụng foam pig trong làm sạch đường ống vận chuyển dầu khí trên thế giới, liên hệ với nền tảng lý thuyết và nghiên cứu quốc tế, nhằm rút ra khuyến nghị cho ứng dụng ở Việt Nam.

Điểm khác biệt của nghiên cứu này so với các công bố trước đó, đó là: (i) xây dựng khung phân loại và lựa chọn tuyến ống phù hợp với Foam Pig dựa trên điều kiện đặc thù của thềm lục địa Việt Nam (độ cong nhỏ, áp suất thấp, nhiều tuyến không có launcher/receiver); (ii) phân tích và đối chiếu kết quả thử nghiệm Foam Pig tại MSP-A → MSP-B với mô hình lưu biến (Herschel-Bulkley) để xác định thông số vận hành thích hợp; (iii) đề xuất bộ tiêu chí kỹ thuật đánh giá khả năng áp dụng Foam Pig cho các tuyến nội mỏ, lần đầu tiên tổng hợp từ kết quả thực nghiệm trong nước kết hợp với dữ liệu quốc tế. Các đóng góp này tạo cơ sở khoa học cho việc chuẩn hóa công nghệ Foam Pig tại Việt Nam.

2. Tình hình nghiên cứu và ứng dụng foam pig trong làm sạch đường ống vận chuyển dầu khí trên thế giới

2.1. Cơ sở lý thuyết phương pháp

Một trong những yếu tố quan trọng quyết định hiệu quả của Foam Pig là đặc tính lưu biến của vật liệu gel trong mối tương quan với điều kiện biên của đường ống.

Dòng chảy trong ống chịu chi phối bởi hệ phương trình Navier-Stokes, với đặc thù phi Newton của khối Foam Pig và khí/condensate xung quanh. Foam Pig thường được mô tả bằng chất lỏng Herschel-Bulkley hoặc Bingham với tham số ứng suất trượt giới hạn (τ_y), chỉ số lưu biến (n) và hệ số độ nhớt (k) (Chhabra và Richardson, 2008; Papanastasiou, 1987). Sự tương tác Pig-thành ống tạo vùng đệm ma sát và vùng màng bôi trơn mỏng; nếu τ_y /áp lực đẩy không đủ, hình thành sự trượt khí (gas bypass) làm giảm hiệu suất quét.

Ở những tuyến ống có nhiệt độ và áp suất thấp như tại thềm lục địa Việt Nam, việc lựa chọn khoảng giá trị thích hợp cho τ_y và độ nhớt biểu kiến (η) là tối quan trọng: nếu τ_y quá thấp, khối Foam Pig sẽ dễ xảy ra hiện tượng trượt khí do không duy trì được độ kín; ngược lại, nếu τ_y quá cao, áp suất cần thiết để đẩy Pig vượt qua khúc cong sẽ vượt quá khả năng vận hành thực tế (Versteeg và Malalasekera, 2007).

Sự cân bằng này càng trở nên phức tạp khi xem xét tới ảnh hưởng của điều kiện biên, bao gồm áp suất đầu vào, nhiệt độ chất lưu, và cấu trúc hình học ống. Trong trường hợp không được tối ưu, hiện tượng nứt vỡ hoặc biến dạng quá mức của khối Pig có thể xảy ra, làm giảm hiệu quả làm sạch (Gao và nnk., 2021).

Do đó, một khung thiết kế bền vững phải đặt trên cơ sở khảo sát cửa sổ lưu biến, trong đó τ_y , η và tốc độ Pig (U) được điều chỉnh để đảm bảo hiệu suất vận hành trong phạm vi Δp cho phép (Li và nnk., 2020).

Hiệu quả làm sạch đường ống của foampig phụ thuộc chủ yếu vào các yếu tố sau đây:

2.1.1. Đặc tính vật liệu và cơ chế làm việc

Foam Pig là khối polymer xốp, thường cấu tạo từ PHPA hoặc PVA có thêm phụ gia tạo đàn hồi, chất bôi trơn và tác nhân phá hủy (breaker). Khi được bơm vào đường ống bằng khí nén hoặc chất lỏng, Foam Pig di chuyển như một piston mềm, vừa tiếp xúc cơ học để cạo sạch cặn bám, vừa tạo vùng dòng rối quét sạch sáp và asphaltene (Li và nnk., 2020).

Khả năng làm sạch của Foam Pig phụ thuộc vào cấu trúc tế bào bọt, tỷ trọng, độ đàn hồi và độ nhớt của gel nền. Các nghiên cứu (Gao và nnk., 2021) cho thấy foam có tỷ trọng $0,7 \div 1,0 \text{ g/cm}^3$ và yield stress $1.000 \div 2.000 \text{ Pa}$ đạt hiệu quả làm sạch cao mà vẫn ổn định trong điều kiện ống cong có tỷ số $R/D < 3$.

2.1.2. Mô hình lưu biến và cơ sở mô phỏng

Foam Pig được mô tả bằng mô hình Herschel-Bulkley (Papanastasiou, 1987; Chhabra và Richardson, 2008):

$$\tau = \tau_y + k\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

Trong đó: τ_y - ứng suất trượt tới hạn; k - hệ số độ nhớt; n - chỉ số lưu biến.

Thông qua mô hình này, ta có thể xác định được điều kiện di chuyển tối ưu, giới hạn phá hủy và lực cản tổng. Các nghiên cứu CFD gần đây (Versteeg và Malalasekera, 2007) cho thấy profile áp suất dọc tuyến và vận tốc Pig phụ thuộc mạnh vào quan hệ $\Delta p - \tau_y$.

Trong nghiên cứu này, mô hình Herschel-Bulkley được lựa chọn để mô tả hoạt động của Foam Pig. Do Foam Pig đồng thời có ba đặc tính: (i) có ứng suất trượt tới hạn (τ_y), (ii) có độ nhớt phụ thuộc tốc độ cắt (shear-thinning), và (iii) biến dạng đàn hồi - nhớt dưới tác động nén tại khúc cong. Mô hình Power-law không phản ánh được ứng suất chảy - thông số quyết định khả năng duy trì độ kín chu vi cần thiết khi di chuyển trong ống.

2.1.3. Tương tác Pig - Ống và nguy cơ phá hủy cấu trúc

Các thử nghiệm chỉ ra rằng vùng biến dạng cực đại của Foam Pig xuất hiện tại khúc cong nhỏ và các điểm co tiết diện. Khi tốc độ tăng áp suất (ramp-up rate) vượt $0,03 \text{ MPa/s}$, ứng suất cắt cục bộ có thể vượt giới hạn đàn hồi và phá vỡ khối Pig. CFD kết hợp FSI (Fluid-Structure Interaction) là công cụ hữu hiệu để mô phỏng hiện tượng này (Deng và nnk., 2017). Hình 1 mô phỏng tương tác giữa foam pig và ống vận chuyển bằng CFD/FSI.

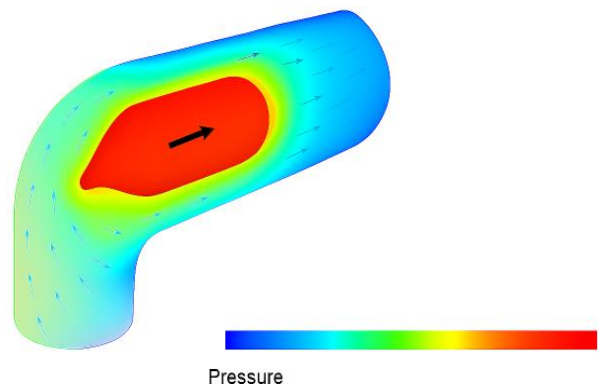
Theo Li và nnk., (2020) và Gao và nnk., (2021), đường kính Foam Pig thường chiếm khoảng $80 \div 90\%$ đường kính trong của ống ($D_{\text{pig}} \approx 0,8 \div 0,9 D_{\text{ống}}$): Nếu nhỏ hơn $0,8$ sẽ giảm khả năng bịt kín, xuất hiện dòng bypass dẫn đến giảm hiệu quả làm sạch; Nếu lớn hơn $0,9$ sẽ tăng ma sát và nguy cơ mắc kẹt tại khúc cong.

2.2. Một số ứng dụng thực tế trên thế giới

Foam Pig đã được triển khai trong nhiều bối cảnh quốc tế khác nhau, từ các tuyến ống offshore Brazil, hệ thống đường dài ở Trung Quốc, cho đến các ứng dụng đặc thù tại châu Âu và Mỹ. Những kinh nghiệm này đem lại cái nhìn toàn diện không chỉ về những thành tựu nổi bật mà còn cả các vấn đề còn tồn tại cần khắc phục.

Tại Brazil, Lima và Alves (1995) đã thử nghiệm Foam Pig cho các tuyến ống ngoài khơi không có thiết bị phóng/thu Pig. Kết quả chứng minh Foam Pig có khả năng vượt qua nhiều khúc cong với hiệu quả làm sạch đáng kể, nhưng đồng thời cũng chỉ ra hiện tượng trượt khí khi mật độ hoặc độ cứng không được lựa chọn phù hợp. Trong khi đó, Deng và nnk. (2017) tại Trung Quốc đã phát triển kỹ thuật pigging phân đoạn để ứng phó với các tuyến ống dài. Giải pháp này giúp giảm áp suất đẩy nhưng vận hành phức tạp.

Tại Trung Quốc, tuyến ống Long-distance pipelines-Segmental pigging được làm sạch bằng kỹ thuật pigging phân đoạn đã giảm áp suất đẩy và rủi ro kẹt ở đường dài, hỗ trợ kiểm soát vận tốc Pig. Khó khăn gặp phải là tăng độ phức tạp lịch vận hành và yêu cầu giám sát sát sao áp suất từng đoạn (Deng và nnk., 2017).



Hình 1. Mô phỏng tương tác giữa foam pig và ống vận chuyển.

Ở các nước Âu/Mỹ, Foam Pig cho làm khô đầy nước hiệu quả khi vận hành cho đường ống có nhiều cấp đường kính và bán kính cong nhỏ. Khó khăn gặp phải là sự kiểm soát áp đỉnh khi chuyển pha nước-khí; nguy cơ slugging (Li và nnk., 2020).

Tại Nga/Azerbaijan, áp dụng cho đường ống offshore cũ, Foam Pig đã cho thấy hiệu quả ở tuyến ống thiếu hoặc không thể trang bị thiết bị phòng-thu nhận pig; cải thiện độ sạch nội ống trước khi tái khởi động. Khó khăn gặp phải là tình trạng bề mặt trong ống lão hóa, có nhiều gờ hàn nên yêu cầu foam pig phải có tính mềm-dai không mắc kẹt khi vận hành (Li và nnk., 2020).

Các nghiên cứu trong phòng thí nghiệm cũng củng cố hiệu quả của Foam Pig. Gao và nnk. (2021) cho thấy Foam Pig có thể đạt hiệu suất bóc tách sáp tới 95% nếu lựa chọn thông số lưu biến phù hợp, song rủi ro phá hủy khối khi tốc độ cắt cao vẫn tồn tại.

Li và nnk. (2020) tổng kết rằng, mặc dù Foam Pig có ưu điểm vượt trội về tính linh hoạt, công thức gel hiện nay chưa được chuẩn hóa, và điều này cản trở việc áp dụng đại trà trong quy mô công nghiệp.

Các vấn đề tương tự cũng được ghi nhận trong thực tế: Cho (1988) chỉ ra rằng bề mặt Pig dạng texture có thể cải thiện độ kín, song lại dễ bị mài mòn trong đường ống thô ráp; Mackay (2013) nhận định rằng khi xử lý cát, vận tốc quá cao sẽ gây xói mòn ở các co hẹp; Singh và nnk. (2000) cho

thấy hiện tượng kết tủa paraffin subsea có thể làm giảm đáng kể hiệu quả vận hành, hàm ý rằng foam pigging cần kết hợp với các biện pháp bổ trợ như gia nhiệt hoặc hóa chất.

Điểm chung rút ra là Foam Pig hiệu quả trong việc giải quyết các tuyến “non-piggable”, nhưng để tối ưu hóa cần sự kết hợp giữa thiết kế vật liệu, phân tích thủy lực và mô phỏng số (Versteeg và Malalasekera, 2007). Đây chính là hướng nghiên cứu đang được mở rộng thông qua các công cụ CFD, vốn cho phép dự đoán phân bố áp suất và vận tốc trong ống, từ đó hỗ trợ hiệu chỉnh τ_y và U_{pig} trước khi triển khai thực tế.

Bảng 1 trình bày các nghiên cứu tiêu biểu và kết quả làm sạch đường ống vận chuyển dầu khí trên thế giới.

3. Khả năng áp dụng làm sạch đường ống vận chuyển bằng foam pig tại Việt Nam

3.1. Đặc điểm một số tuyến ống vận chuyển dầu khí tại bể Cửu Long

Điều kiện vận hành tại các tuyến nội mỏ Việt Nam (áp suất thấp 3÷20 bar, nhiệt độ 25÷35°C, nhiều co nhỏ $R/D < 3$) làm cho τ_y và η trở thành hai tham số quan trọng nhất. Kết quả thử nghiệm tại MSP-A → MSP-B cho thấy khi $\tau_y < 1.200$ Pa, Foam Pig dễ bị nứt và xuất hiện bypass; nhưng khi τ_y trong khoảng 1.500÷2.100 Pa thì Pig di chuyển

Bảng 1. Tổng hợp một số kết quả làm sạch đường ống vận chuyển dầu khí trên thế giới bằng foam pig.

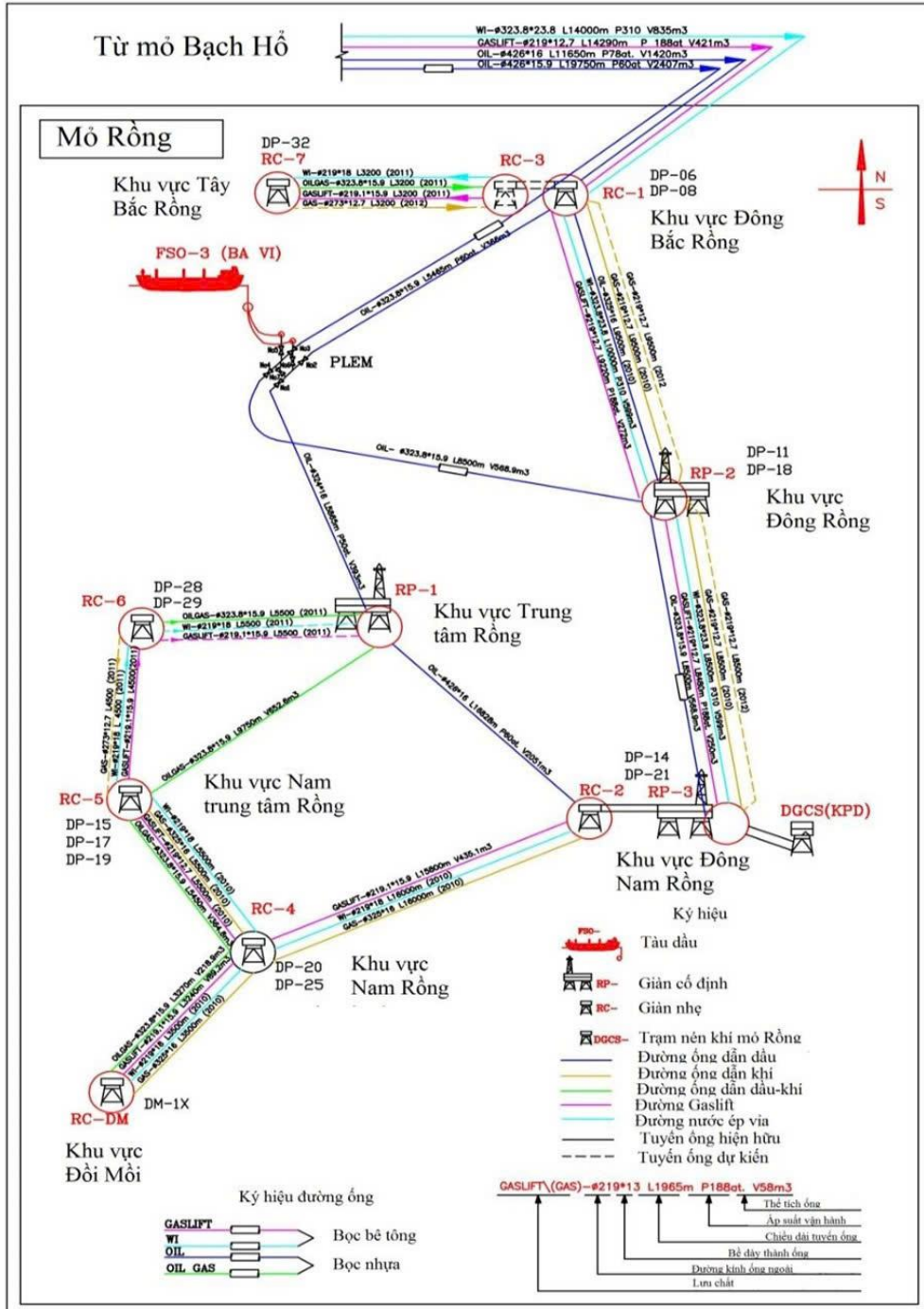
STT	Nghiên cứu	Khu vực	Nội dung chính	Kết quả	Tồn tại
1	Lima và Alves (1995)	Brazil	Ứng dụng đường ống ngoài khơi, tuyến ống nhỏ	Thành công 80÷90%	Gel yếu ở áp cao
2	Gao và nnk. (2021)	Trung Quốc	Thí nghiệm làm sạch lắng đọng wax	Hiệu quả >95%	Cần kiểm soát độ bền gel của pig
3	Deng và nnk. (2017)	Trung Quốc	Pigging phân đoạn	Giảm tổn hao áp suất Δp từ 20÷30%	Cần thêm thiết bị phụ
4	Singh và nnk. (2000)	Mỹ	Phòng ngừa lắng đọng paraffin	Đề xuất pig mềm kết hợp hóa học	Không áp dụng vùng nước sâu
5	Petrobras report	Brazil	Thực nghiệm tại mỏ	Giảm thời gian chờ 30%	
6	Papanastasiou (1987)	-	Mô hình vật liệu yield	Cơ sở FSI hiện đại	Không thử nghiệm thực
7	Cho (1988)	Hàn Quốc	Thiết kế pig bề mặt nhám	Tăng hiệu quả quét	Tăng nội ma sát
8	Li và nnk. (2020)	Trung Quốc	Foam Pig chống asphaltene	Thành công ở quy mô phòng thí nghiệm	Chưa áp dụng thực nghiệm

ổn định, độ kín được duy trì và độ sâu quét paraffin tăng đáng kể. Xu hướng này phù hợp với kết luận của Gao và nnk. (2021) và Deng và nnk. (2017).

Nhiều tuyến nội mỏ tại bể Cửu Long như: MSP-5 → MSP-2, MSP-8 → MSP-6, MSP-3 → CPP-2, BK-9 → MSP-9, CPP-2 → FSO-2, RD-WHP → RD-

CPP, STT-A → STT-B và WHP-TU → WHP-DH-1 có đặc điểm không có hệ thống phóng/thu nhận pig hoặc có độ cong lớn khiến pig cứng không thể vận hành.

Hình 2 thể hiện sơ đồ thu gom dầu khí cụm mỏ Bạch Hổ - Rồng (Nguyễn và nnk., 2024).



Hình 2. Sơ đồ phát triển khai thác Nam Rồng - Đồi Mồi kết nối mỏ Rồng.

Từ các nghiên cứu và đặc điểm tuyến ống vận chuyển nêu trên, có thể xây dựng một khung đánh giá khả năng áp dụng Foam Pig cho các tuyến nội mỏ Việt Nam. Khung này cần dựa trên ba thông số chính: (i) đặc tính hình học của ống (đường kính, chiều dài, bán kính cong), (ii) điều kiện vận hành (áp suất, nhiệt độ, chế độ dòng), và (iii) tính chất của chất lắng đọng (paraffin, asphalten, cát).

Kinh nghiệm của Deng và nnk. (2017) về pigging phân đoạn cho thấy, việc đánh giá trước độ dài tuyến và phân bố áp suất là thiết yếu, trong khi kinh nghiệm tại Brazil (Lima và Alves, 1995) cho thấy, Foam Pig phù hợp hơn cả ở các tuyến ngắn-trung bình, áp suất thấp. Các tuyến ngắn (dưới 5 km), đường kính trung bình (6÷12 inch), áp suất vận hành thấp (3÷20 bar), và có lắng đọng paraffin sẽ được xếp vào nhóm “rất phù hợp” cho Foam Pig. Ngược lại, các tuyến dài hơn 20 km, nhiều co gấp khúc nhỏ, hoặc có áp suất vượt quá 50 bar sẽ cần thận trọng khi áp dụng.

Quy trình chuẩn đề xuất cho Việt Nam bao gồm: khảo sát ban đầu (lấy mẫu paraffin, đo Δp), mô phỏng CFD để xác định vận tốc tối ưu (Versteeg và Malalasekera, 2007), thiết kế lịch vận hành (bao gồm pigging phân đoạn nếu cần, tham chiếu của Deng và nnk. (2017)), giám sát hiện trường và đánh giá hậu kiểm. Cách tiếp cận này vừa giảm thiểu rủi ro, vừa tạo cơ sở dữ liệu thực nghiệm cho các nghiên cứu tiếp theo.

Như vậy, ở Việt Nam, nhóm tuyến ống vận chuyển dài dưới 5 km, áp suất thấp (<20 bar) và chứa lắng đọng paraffin là tuyến ống lý tưởng cho Foam Pig.

Bảng 2 tổng hợp đặc điểm một số tuyến ống vận chuyển dầu khí tại bể Cửu Long có thể áp dụng làm sạch bằng foam pig. Trong đó, các mức đánh giá khả năng áp dụng được xác định dựa trên các tiêu chí:

+ Độ cong tuyến (R/D): cao = $R/D \geq 3$; trung bình = $2 \leq R/D < 3$.

+ Áp suất vận hành: cao = 10÷20 bar; trung bình = 5÷10 bar.

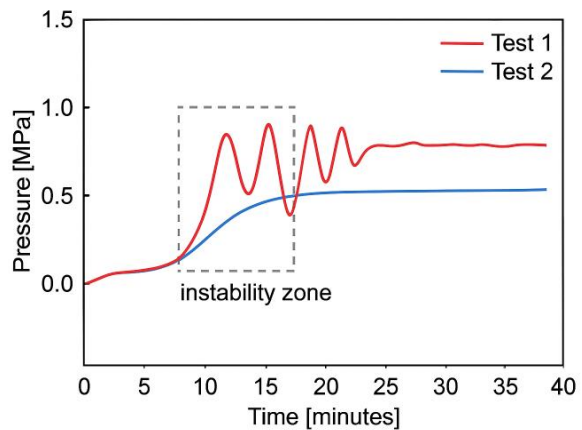
+ Độ dày paraffin: cao = >8 mm; trung bình = 3÷8 mm.

+ Khả năng lắp đặt hệ thống xử lý Pig: cao = ít cải hoán; trung bình = cần cải hoán nhỏ.

3.2. Kết quả thử nghiệm tại tuyến ống MSP-A đến MSP-B mỏ Bạch Hổ và bài học kinh nghiệm

Tuyến ống MSP-A → MSP-B có chiều dài khoảng 3,8 km, đường kính trong 8 inch, gồm nhiều khúc cong $R \approx 300$ mm và không có hệ thống phóng/thu nhận pig. Áp suất vận hành trung bình 0÷5 atm, nhiệt độ môi trường 25÷28°C.

Mô hình CFD cho tuyến MSP-A → MSP-B được chạy lặp lại với cùng điều kiện biên, tính chất lưu biến của Foam Pig và cấu hình hình học. Sai số số học của nghiệm áp suất được kiểm soát thông qua tiêu chí hội tụ và kiểm tra độ nhạy lưới, với độ lệch ΔP giữa các lần chạy mô phỏng nằm trong khoảng ±(3÷5)%. Kết quả cho thấy xu hướng phân bố áp suất và mức giảm ΔP sau làm sạch (Hình 3).



Hình 3. Sự thay đổi áp suất bơm đẩy Foam Pig theo thời gian trong hai lần thử nghiệm tại tuyến MSP-A → MSP-B.

Bảng 2. Các tuyến ống nội mỏ tiềm năng áp dụng Foam Pig tại Việt Nam.

STT	Tuyến ống	Ø (inch)	Chiều dài (km)	Đặc điểm	Rủi ro chính	Khả năng áp dụng
1	MSP-5 → MSP-2	8	4,3	Nhiều đoạn cong, wax dày	Δp cao	Cao
2	BK-9 → MSP-9	6	5,1	Đáy biển phức tạp	Kẹt tại S-curve	Cao
3	MSP-8 → MSP-6	6	3,0	R/D nhỏ	Vỡ Pig	Trung bình
4	STT-A → STT-B	6	3,0	Wax nhẹ	Ít rủi ro	Cao
5	WHP-TU → WHP-DH-1	6	2,2	Khúc cong hình chữ S	Trượt khí	Cao

Kết quả qua 2 lần thử nghiệm: Lần 1 sử dụng công thức gel PHPA $1,5 \div 3,5 \text{ kg/m}^3$, ứng suất chảy thấp ($\approx 1.000 \div 1.500 \text{ Pa}$). Pig bị vỡ tại zone đầu, áp suất cực đại $1,5 \text{ MPa}$; Lần 2 tăng nồng độ PHPA $6 \div 10 \text{ kg/m}^3$, ứng suất chảy $1.500 \div 2.100 \text{ Pa}$, điều chỉnh profile Δp , kết quả Foam Pig di chuyển liên tục và thu hồi nguyên vẹn tại MSP-5, hiệu quả làm sạch đạt trên 90%.

Hỗn hợp gel, paraffin và chất lỏng thu hồi sau làm sạch được dẫn về các thiết bị tách hiện hữu tại MSP-5 (slug catcher/bình tách). Gel sử dụng polymer tan trong nước có khả năng suy giảm cấu trúc sau vận hành, cho phép xử lý trong hệ thống nước khai thác; paraffin được quản lý như chất thải rắn nhiễm dầu theo quy định môi trường hiện hành của Việt Nam.

Bảng 3 trình bày kết quả thử nghiệm làm sạch tuyến ống vận chuyển MSP-A đến MSP-B tại mỏ Bạch Hổ. Mức độ hiệu quả được đánh giá qua:

- + Lượng cặn được làm sạch (volume wax removed): %.
- + Mức độ nguyên vẹn của Pig (integrity index).
- + Độ ổn định áp suất (fluctuation amplitude) <15%.

4. Thảo luận

Có thể thấy Foam Pig mang lại giải pháp kinh tế và khả thi cho các tuyến ống không được trang bị hệ thống phóng/thu nhận pig ở Việt Nam. Tuy nhiên, kinh nghiệm quốc tế cũng cho thấy hiệu quả chỉ đạt tối ưu khi công thức gel và điều kiện vận hành được thiết kế đồng bộ (Li và nnk., 2020). Điểm mấu chốt nằm ở khả năng cân bằng giữa độ kín chu vi và nguy cơ kẹt/biến dạng, điều mà Gao và nnk. (2021) đã nhấn mạnh trong các thử nghiệm bóc tách gel.

Mặt khác, việc chuẩn hóa công thức gel theo điều kiện nhiệt độ và áp suất đặc thù của Việt Nam hiện vẫn còn thiếu, tạo ra một khoảng trống

Bảng 3. Kết quả thực nghiệm áp dụng làm sạch đường ống vận chuyển dầu khí từ MSP-A đến MSP-B tại mỏ Bạch Hổ.

Thông số	Đơn vị	Lần 1	Lần 2
Nồng độ PHPA	kg/m^3	1,5÷3,5	6÷10
Áp suất cực đại	MPa	1,5	1,2
Hiệu quả làm sạch	%	<50	>90
Tình trạng Pig	-	Vỡ	Nguyên vẹn

nghiên cứu cần được cộng đồng học thuật và doanh nghiệp quan tâm. Ngoài ra, mô hình hóa số bằng CFD ngày càng được coi là công cụ không thể thiếu để giảm chi phí thử nghiệm (Versteeg và Malalasekera, 2007), song các phương pháp kết hợp FSI (Fluid-Structure Interaction) để mô phỏng chính xác biến dạng đàn hồi-nhớt của khối Pig vẫn còn ít được nghiên cứu.

Từ góc độ kinh tế - môi trường, Foam Pig có ưu thế rõ rệt khi không cần cải hoán lớn cho hệ thống (Lima và Alves, 1995), đồng thời giảm thời gian shutdown, từ đó hạn chế phát thải CO_2 và chi phí vận hành. Tuy nhiên, vấn đề xử lý chất thải gel và nước lẫn paraffin sau khi làm sạch cũng cần được cân nhắc kỹ lưỡng để đáp ứng yêu cầu môi trường.

Việc chuẩn hóa thông số lưu biến và quy trình vận hành là điều kiện tiên quyết để nhân rộng ứng dụng. Các thông số cần nghiên cứu thêm gồm: τ_y - η theo nhiệt độ, mối tương quan giữa profile chênh áp Δp và độ cong ống, cùng các chỉ tiêu môi trường của foam pig sau khi thu hồi.

5. Kết luận

Công nghệ làm sạch đường ống vận chuyển dầu bằng Foam Pig cho thấy khá hiệu quả đối với các tuyến ống nội mỏ Bạch Hổ, có chiều dài khoảng <8 km, đường kính $6 \div 10 \text{ inch}$, có nhiều đoạn cong với $R/D = 1,5 \div 3$, áp suất vận hành $20 \div 40 \text{ bar}$. Đặc biệt là tuyến ống không thể trang bị hệ thống thu-phóng Pig (bộ phận bắt buộc phải có khi làm sạch tuyến ống bằng pig cơ học truyền thống). Hiệu quả làm sạch bằng Foam Pig đạt được khi kiểm soát áp suất bơm <50 bar, vận tốc pig $0,5 \div 1,0 \text{ m/s}$ và sử dụng gel polymer tan trong nước; phương pháp kém phù hợp cho tuyến >10 km hoặc áp suất cao.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn Liên doanh Việt - Nga Vietsovpetro và Công ty PVChem đã hỗ trợ dữ liệu thử nghiệm, cũng như Trường Đại học Mỏ - Địa chất đã tạo điều kiện thuận lợi trong quá trình nghiên cứu. Bài báo là sản phẩm của đề tài nghiên cứu cấp cơ sở, mã số T25-12.

Đóng góp của tác giả

Nguyễn Văn Thành - phương pháp luận, viết bản thảo bài báo; Lê Quang Duyên, Nguyễn Khắc Long, Tô Hữu Toàn - phân tích dữ liệu, mô phỏng

đề xuất; Nguyễn Quốc Dũng, Vũ Việt Thanh - cung cấp số liệu thực địa, hỗ trợ kỹ thuật hiện trường.

Tài liệu tham khảo

- Cho, H. J. (1988). *Foam Pig with Textured Surface* (European Patent No. EP0286320A2). European Patent Office. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/009177620/publication/EP0286320A2>
- Chhabra, R. P., & Richardson, J. F. (2008). *Non-Newtonian flow and applied rheology* (2nd ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8532-0.X5001-8>
- Deng Tao, Jun Zhou, Yu Zhang, Yuanyuan Chen, Gong Jing. (2017). The Technique of Segmental Pigging Process for Long Distance Pipeline of Oil and Gas in China. *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, 139(1), 061701. <https://doi.org/10.1115/1.4034284>.
- Gao Xuedong, Qiyu Huang, Xun Zhang, Yu Zhang, Xiangrui Zhu, Jinxu Shan. (2021). Experimental study on wax removal by foam pig. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 205, 108881. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108881>
- Li, W., Huang, Q., & Gao, X. (2020). Advances and challenges of foam pigging in crude oil pipelines. *Energy Technology*, 8(5), 1901477. <https://doi.org/10.1002/ente.201901477>
- Lima, P. C. R., & Alves, S. J. (1995). Application of low density foam pigs offshore Brazil. *OTC 7864. Offshore Technology Conference*. <https://doi.org/10.4043/7864-MS>
- Mackay, E. J. (2013). Sand erosion in pipeline bends during pigging. *SPE Journal*, 18(4), 678-686.
- Nguyễn V.T., Triệu H.T, Vũ T.T. (2024). Nghiên cứu hạ tầng và hệ thống thiết bị của các mỏ dầu khí ở Việt Nam nhằm phục vụ cho kết nối các mỏ cận biên. *Hội nghị khoa học toàn quốc - Thiết bị và Công trình dầu khí với xu hướng chuyển dịch nguồn năng lượng*. Nhà xuất bản Giao thông Vận tải.
- Papanastasiou, T. C. (1987). Flows of materials with yield. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 24(12), 2231-2247. <https://doi.org/10.1002/nme.1620241203>
- Singh, P., Venkatesan, R., Fogler, H. S., & Nagarajan, N. R. (2000). Paraffin deposition in subsea pipelines: Prevention/remediation. *Energy & Fuels*, 14(3), 561-575. <https://doi.org/10.1021/ef990222q>
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to CFD: The Finite Volume Method*. Pearson. <https://www.pearson.com/en-gb/subject-catalog/p/introduction-to-computational-fluid-dynamics/P200000007245/9780131274983>.