

TĂNG CƯỜNG THU HỒI DẦU (EOR) TRONG ĐÁ MÓNG GRANITE NÚT NỀ: CÁC GIẢI PHÁP PHI HÓA HỌC CHO MỎ BẠCH HỔ

Phùng Đình Thực^{1,2}, Phan Ngọc Trung^{1,2}

¹Viện Dầu khí Việt Nam (VPI)

²Hội Dầu khí Việt Nam (VPA)

Email: thucphung125@gmail.com

<https://doi.org/10.47800/PVSI.2025.01-01>

Tóm tắt

Đá móng nứt nẻ chứa dầu, điển hình là đá móng granite tại mỏ Bạch Hổ (bể Cửu Long) có cấu trúc đặc biệt với độ rỗng và độ thấm thấp, nhiệt độ cao, hệ thống khe nứt phức tạp... là thách thức lớn đối với công tác nghiên cứu và lựa chọn công nghệ tăng cường thu hồi dầu (enhanced oil recovery - EOR), do các phương pháp hóa học thường không đạt hiệu quả.

Nghiên cứu này tập trung tổng hợp và phân tích sự khác biệt của thân dầu trong đá móng nứt nẻ, xác định những vấn đề tồn tại và khó khăn trong quá trình khai thác, đánh giá tính khả thi của các giải pháp EOR vật lý - cơ học phù hợp với điều kiện đá móng, từ đó đề xuất áp dụng các giải pháp khả thi, phù hợp nhằm tăng cường thu hồi dầu tại mỏ Bạch Hổ trong giai đoạn hiện nay.

Từ khóa: Tăng cường thu hồi dầu (EOR), đá móng nứt nẻ, mỏ Bạch Hổ.

1. Giới thiệu

Bạch Hổ là mỏ dầu khí có quy mô lớn nhất Việt Nam, sản lượng khai thác chủ yếu từ đối tượng đá móng granite nứt nẻ chứa dầu [1, 2]. Đá móng granite nứt nẻ chứa dầu thuộc nhóm vỉa chứa phi truyền thống, có cấu trúc phức tạp với mức độ bất đồng nhất rất cao - nơi dầu tập trung chủ yếu trong hệ thống khe nứt tự nhiên thay vì lỗ rỗng. Với đặc tính vật lý đa độ rỗng, trong đó phần nhiều dầu tồn tại trong đới vi nứt nẻ có độ rỗng < 5%, độ thấm rất thấp xung quanh 1 mD và nhiệt độ cao (> 150°C), các giải pháp hóa học trở nên không khả thi, đòi hỏi các giải pháp vật lý, cơ học nhằm tăng cường thu hồi dầu từ các đới vi nứt nẻ.

Tăng cường thu hồi dầu (EOR) cho đối tượng đá móng granite nứt nẻ theo bản chất được xác định là tập hợp các phương pháp kỹ thuật nhằm thúc đẩy/kích thích quá trình dịch chuyển dầu từ các vi nứt nẻ và vi lỗ rỗng trong đá móng (có độ thấm rất thấp) về các khe nứt lớn và giếng khai thác, thông qua việc thay đổi cơ chế dịch chuyển chất lưu bằng các tác nhân cơ học, vật lý hoặc năng lượng, trong điều kiện nhiệt độ cao, độ thấm siêu thấp, nơi mà tính tương tác hóa học gần như không đáng kể.

2. Đặc điểm địa chất của thân dầu trong đá móng nứt nẻ và sự khác biệt với thân dầu truyền thống

Thân dầu trong đá móng và thân dầu truyền thống có 3 sự khác biệt lớn: (i) Cơ chế và quá trình hình thành không gian rỗng trong đá móng; (ii) Quá trình dịch chuyển và hình thành thân dầu trong đá móng, và (iii) Đặc trưng thấm chứa, cơ chế dòng chảy trong cấu trúc không gian rỗng của đá móng [1 - 6].

Khác với thân dầu truyền thống, hệ thống không gian rỗng trong đá móng được hình thành và biến đổi qua các quá trình địa chất như sự co giãn thể tích khi magma đông cứng, các hoạt động kiến tạo, các hoạt động thủy nhiệt và quá trình phong hóa.

Sau những quá trình biến đổi địa chất đó đã hình thành hệ thống không gian rỗng, nứt nẻ, hang hốc ở đối tượng đá móng nứt nẻ với đặc trưng bất đồng nhất rất cao về khả năng thấm chứa. Từ cấu trúc phức tạp đó, hệ thống không gian rỗng trong đá móng granite nứt nẻ mỏ dầu Bạch Hổ có thể được phân chia thành 2 nhóm chính [6]:

- Đới nứt nẻ lớn (macrofractures) gồm những khe nứt lớn và hang hốc, có kích thước trên 0,1 mm phổ biến trên 0,5 mm có khi lên đến hàng centimet. Mặc dù giá trị độ rỗng nứt nẻ hang hốc không lớn, được xác định không tới 1,5%, nhưng độ thấm tốt và rất tốt có khi lên đến 20D



Ngày nhận bài: 5/1/2025.

Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa: 5/1 - 7/2/2025.

Ngày bài báo được duyệt đăng: 7/2/2025.

(Darcy). Đới nứt nẻ lớn đóng vai trò là kênh chính dẫn chất lưu trong quá trình khai thác, với khoảng 80% lượng dầu thu hồi được từ không gian rỗng đó. Cơ chế dòng chảy trong không gian rỗng này có thể đạt được dạng “piston” nếu được đẩy bằng chất lưu phù hợp với áp lực và tốc độ phù hợp.

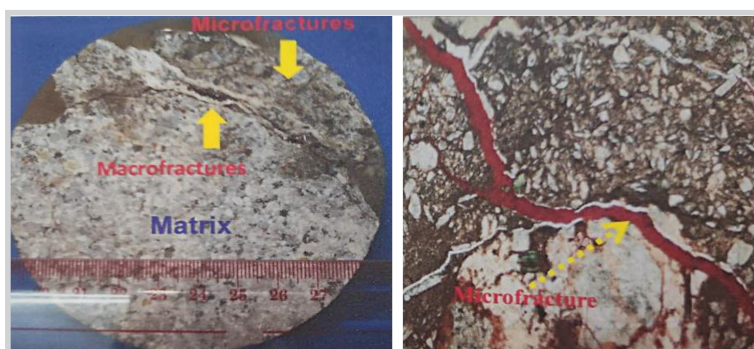
- Đới vi nứt nẻ (microfractures) gồm những khe nứt có kích thước dưới 0,1 mm. Giá trị độ rỗng đá móng ở đới vi nứt nẻ trung bình 4 - 5%, nhưng độ thấm pha chỉ khoảng 1 - 5mD.

Dầu di chuyển từ tầng trầm tích xung quanh/kể sát xâm nhập vào các khe nứt trong tầng móng (theo giả thuyết áp suất bên trong khe nứt lúc mới hình thành rất thấp, thậm chí là chân không). Trước hết dầu di chuyển và lấp đầy các khe nứt lớn, dần dần thấm thấu vào các khe nứt nhỏ và có thể cả trong khối đá chặt sít cho đến khi đạt được cân bằng thủy động lực. Dầu bị lưu giữ/mắc kẹt trong đới vi nứt nẻ chủ yếu do lực hút mao dẫn. Thể tích chứa chất lưu ở đây rất lớn, ước tính lên đến 30 - 70% tổng thể tích chứa dầu của đá chứa, do đó đới vi nứt nẻ có vai trò chứa và là vùng nuôi cung cấp chất lưu cho đới nứt nẻ lớn.

Ngoài ra, còn độ hở cấu trúc (môi trường matrix) trong đá móng, tuy nhiên môi trường này qua thực tế nghiên cứu và theo dõi số liệu, cho thấy không có vai trò và không đóng góp chất lưu vào quá trình khai thác (Hình 1).

Số liệu khảo sát thủy động học và địa vật lý giếng khoan cũng cho thấy mức độ bất đồng nhất ở quy mô của toàn bộ thân dầu móng rất cao kèm theo sự phân bố xen kẽ của các đới nứt nẻ và giữa đới vi nứt nẻ và các đới đặc sít không thấm [1 - 6]. Số liệu FMS/FMI, mật độ khe nứt dọc theo thân giếng giảm dần từ phần nóc xuống tới đáy trong khoảng từ gần 200 - 50 khe nứt/100 m độ sâu với độ mở trung bình của các khe nứt là 950 micromet. Độ thấm biến đổi trong khoảng rộng, từ vài mD cho tới 300 mD và hệ số biến thiên Dykstra-Parson là 0,71.

Một đặc thù của khối đá móng nứt nẻ chứa dầu mỏ Bạch Hổ là cho đến nay hoàn toàn chưa xác định/phát hiện được nước đáy tại độ sâu có dầu -4.850m ở khối trung tâm và tại độ sâu -3.700 m đến -4.450m ở các khối khác. Dầu bắt đầu được khai thác từ đới móng mỏ Bạch Hổ từ năm 1988 ở chế độ giảm áp và từ cuối năm



Hình 1. Hệ thống không gian rỗng, nứt nẻ, hang hốc và matrix trong đới móng nứt nẻ.

1993 nước được bơm ép với mục đích duy trì áp suất vỉa. Trong quá trình đó, nước bơm ép dần dâng lên và dễ dàng xâm nhập chiếm toàn bộ các khe nứt lớn và di chuyển với tốc độ vượt trội, để hướng tới các giếng khai thác, bỏ qua một lượng dầu lớn có trong các đới vi nứt nẻ không thể thoát ra được. Dầu “mắc kẹt” phần lớn trong đới vi nứt nẻ do lực mao dẫn lớn hơn nhiều lực do chênh lệch áp suất tối đa mà nước bơm ép tạo ra.

Rõ ràng có sự khác biệt rất lớn giữa thân dầu trong đá móng và thân dầu truyền thống. Do đó, cần những giải pháp/công nghệ khác nhau để khai thác và tăng cường thu hồi dầu, đặc biệt là đới móng nứt nẻ chứa dầu ở giai đoạn khai thác cuối như tại mỏ Bạch Hổ.

3. Các nghiên cứu và giải pháp công nghệ nâng cao hệ số thu hồi dầu

Từ thực tiễn và kết quả nghiên cứu cho thấy tầng đá móng granite nứt nẻ tại mỏ Bạch Hổ bao gồm đá magma acid (granite, granite porphyry) có độ rỗng thứ sinh từ 2 - 5%. Hệ thống khe nứt quyết định khả năng chứa và di chuyển dầu. Điều kiện nhiệt độ cao (> 150°C), dầu có độ nhớt tương đối thấp, khí hòa tan ít. Vỉa mang đặc tính hệ thống chứa kép (dual porosity), trong đó dầu tồn tại trong vi nứt, di chuyển tới/qua nứt nẻ lớn. Trong điều kiện nhiệt độ cao và vỉa có tính chất silicat, khá “trơ” dưới tác động của hóa chất, nên các giải pháp EOR hóa học (polymer, surfactant, ASP...), đang áp dụng cho thân dầu truyền thống, không mang lại hiệu quả với đới móng đá móng chứa dầu, đòi hỏi các giải pháp EOR khác như vật lý, cơ học.

Đá móng granite nứt nẻ chứa dầu Bạch Hổ có tính dính ướt đối với nước khá mạnh nên vẫn có thể nghiên cứu nước bơm ép để điều khiển xâm nhập theo cơ chế thấm mao dẫn để đẩy dầu chứa trong các đới vi nứt nẻ. Do độ rỗng đới vi nứt nẻ chiếm tỷ phần trọng yếu trong khối đá móng nứt nẻ chứa dầu mỏ Bạch Hổ nên cơ chế đẩy mao dẫn có thể tạo điều kiện để dầu “mắc kẹt” trong vi nứt nẻ “thoát” ra được. Đây là hiện tượng rất đáng lưu ý khi xem xét, lựa chọn để thử nghiệm các giải pháp EOR.

Sau đây là tổng quan các phương pháp EOR vật lý, cơ học có thể xem xét áp dụng cho các đới vi nứt nẻ.

3.1. Bơm CO₂ siêu tới hạn

Ở điều kiện nhiệt độ và áp suất cao, CO₂ chuyển sang trạng thái siêu tới hạn (supercritical), có tính chất trung gian giữa khí và lỏng (mang các đặc tính vừa giống khí vừa giống lỏng). CO₂ siêu tới hạn có thể thâm nhập sâu vào các vi nứt nẻ, hòa tan vào dầu, làm giảm độ nhớt và sức căng bề mặt giữa dầu và đá, làm tăng hệ số giãn nở, giúp cải thiện khả năng di chuyển dầu. Tuy nhiên, giải pháp này cần luôn đảm bảo áp suất đủ lớn để CO₂ duy trì trạng thái siêu tới hạn.

3.2. Bơm khí nitrogen, hydrocarbon nhẹ hoặc trộn lẫn khí - nước

Các khí như N₂ hoặc C1 - C4 có thể đẩy dầu từ vi nứt nẻ tới nơi có nứt nẻ lớn hơn rồi di chuyển về giếng khai thác bằng cơ chế trộn lẫn (giãn nở khí) hoặc tạo chênh lệch áp suất. Khi kết hợp với bọt khí, dòng chảy được kiểm soát hiệu quả hơn, tránh hiện tượng khí đi tắt (bypass). Tuy nhiên, phí thu gom và nén khí có thể cao, và để tăng hiệu quả cần lưu ý kiểm soát dòng chảy tránh khí thoát nhanh ra giếng khai thác.

3.3. Tạo bọt khí (foam EOR)

Bọt được hình thành từ CO₂ hoặc N₂ với chất hoạt động bề mặt chịu nhiệt cao giúp kiểm soát phân bố khí trong đới nứt nẻ, tránh hiện tượng khí thoát quá nhanh qua nứt nẻ lớn mà không tiếp xúc được với dầu trong đới vi nứt nẻ, và làm tăng hiệu quả quét dầu. Cơ chế hoạt động này chính là sự tạo chênh lệch áp suất nhỏ giữa các vi nứt nẻ và nứt nẻ lớn, giúp dầu dịch chuyển tốt hơn. Để đảm bảo thành công cho giải pháp này cần nghiên cứu chất tạo bọt chịu nhiệt tốt và đảm bảo quá trình tạo bọt được kiểm soát chặt chẽ không gây tắc nghẽn kênh dẫn dầu...

3.4. Bơm ép nước theo chu kỳ (cyclic water injection - CWI)

Bơm ép nước theo chu kỳ với cơ chế hoạt động theo chu kỳ bao gồm 3 giai đoạn: bơm nước (đẩy) - ngấm (lắng, tách) - khai thác (hút). Cơ chế hoạt động này giúp tạo chênh lệch áp suất giữa các vi nứt nẻ và nứt nẻ lớn, giảm áp suất mao dẫn trong vi nứt và tăng kết nối giữa các khe nứt, thúc đẩy dầu dịch chuyển về các khu vực có áp suất thấp hơn. Giải pháp này cũng sẽ giúp giảm hiện tượng nước đi tắt qua các nứt nẻ lớn mà không tiếp xúc được với dầu trong các vi nứt nẻ.

Giải pháp bơm ép nước theo chu kỳ có thể áp dụng trong từng giai đoạn, cho từng khu vực cụ thể. Kết hợp bơm ép nước theo chu kỳ tạo ra mất cân bằng tạm thời, liên tục để huy động dầu từ môi trường vi nứt nẻ vào hệ thống nứt nẻ lớn và tiếp tục được nước bơm ép quét đẩy lên phía trên [4 - 7]. Giải pháp này có 3 tác dụng: (i) Tạo mất cân bằng liên tục để không ngừng huy động dầu từ đới vi nứt nẻ; (ii) Hạn chế áp suất liên tục giảm thấp, ảnh hưởng xấu đến lưu lượng giếng; (iii) Tiếp tục quét đẩy dầu (bao gồm cả lượng dầu mới huy động từ đới vi nứt nẻ) ra khỏi nứt nẻ lớn [4 - 7].

Theo nghiên cứu tại mỏ Lagocinco (Venezuela), công nghệ bơm ép nước theo chu kỳ được kỳ vọng sẽ gia tăng thu hồi từ 2 - 7% và giảm đáng kể tỷ lệ nước sản xuất so với việc sử dụng công nghệ bơm ép nước liên tục [8]. Theo nghiên cứu tại mỏ Tiguino (Ecuador), công nghệ bơm ép nước theo chu kỳ đã được thực hiện bằng cách đóng 1 giếng bơm ép trong 5 tháng sau đó khôi phục hoạt động trong 7 tháng, kết quả cho thấy độ ngập nước ổn định trong thời gian dài hơn, gia tăng trữ lượng thu hồi cuối cùng ước tính gần 305 nghìn thùng sau 8 năm, và dự kiến giảm chi phí vận hành trung bình xuống 2,49 USD/thùng trong giai đoạn 2015 - 2022 [9].

3.5. Kích thích cơ học bằng sóng xung kích

Các kỹ thuật xung kích bao gồm: sóng âm, sóng điện từ, nổ xung kích có kiểm soát.

Sử dụng sóng xung kích hoặc rung động tần số thấp hoặc sóng xung áp lực để tạo áp suất biến đổi nhằm mở rộng và kết nối các vi nứt nhỏ, giảm sức căng mao dẫn giữ dầu nhưng không làm phá vỡ cấu trúc vỉa giúp giải phóng dầu từ các vi nứt nẻ dịch chuyển vào đới nứt nẻ lớn. Kỹ thuật này có thể triển khai ngay trong thân giếng khi đang khai thác bằng các thiết bị chuyên dụng và cần nghiên cứu mức độ ảnh hưởng tới hệ thống nứt nẻ tự nhiên.

Các giải pháp trên có cùng bản chất là tạo ra môi trường mất cân bằng tức thời hay nói cách khác là tạo ra chênh lệch áp suất giữa các khe nứt lớn và khe nứt nhỏ trong thân dầu đá móng, tạo điều kiện đủ để dầu "bị kẹt" còn đang tồn đọng trong các đới vi nứt nẻ hoặc nứt nẻ 1 chiều chuyển động ra các nứt nẻ lớn. "Mất cân bằng sinh ra chuyển động" là quy luật phổ biến trong tự nhiên, trong xã hội và trong tư duy. Ở đâu mất cân bằng sẽ sinh ra chuyển động, hoặc muốn có chuyển động phải tạo ra mất cân bằng. Đây là bản chất của nhóm giải pháp này - được ứng dụng để tăng cường thu hồi dầu đang tồn đọng trong các đới vi nứt nẻ hoặc nứt nẻ 1 chiều.

4. Giải pháp công nghệ nâng cao hệ số thu hồi dầu tại mỏ Bạch Hổ giai đoạn cuối

Bạch Hổ là mỏ dầu khí khổng lồ và điển hình tại Việt Nam, nơi dầu phần lớn được khai thác từ móng granite nứt nẻ - loại thân dầu dạng mới chưa có tiền lệ và hiếm gặp trên thế giới. Thân dầu móng granite nứt nẻ mỏ Bạch Hổ được Vietsovpetro phát hiện năm 1986 và đưa vào khai thác từ năm 1988, với lượng dầu tại chỗ ban đầu (tài nguyên dầu khí đã phát hiện theo Thông tư 13/2024/TT-BCT) khoảng 610 triệu m³. Ban đầu thân dầu được khai thác ở chế độ giảm áp, sau đó được duy trì áp suất vừa ở đỉnh cao hơn áp suất bão hòa bằng bơm ép nước vào khu vực cận đáy. Với chế độ khai thác chủ đạo như vậy, thân dầu được khai thác với sản lượng cộng dồn tới nay đạt khoảng 230 triệu m³, tương ứng với hệ số thu hồi dầu 0,38 (38%). Dù đây là mức tương đối cao trong công nghiệp dầu khí thế giới nhưng trong thân dầu vẫn còn lại khoảng 62% dầu tại chỗ ban đầu, tương đương trên 380 triệu m³ hoặc 2,4 tỷ thùng. Vì vậy, việc nghiên cứu các giải pháp công nghệ để tăng cường thu hồi phần dầu khí rất lớn hiện còn lại trong thân dầu này vẫn là vấn đề cấp bách cả khi xu thế dịch chuyển năng lượng đang diễn ra mạnh mẽ trên toàn cầu.

Tầng móng mỏ Bạch Hổ đã trải qua hầu hết các giai đoạn phát triển của đời mỏ và đang trên đà suy giảm, sản lượng khai thác đạt đỉnh 12 triệu tấn/năm vào năm 2002 và hiện nay đang ở mức dưới 2 triệu tấn/năm [4 - 6].

4.1. Vị trí lượng dầu còn lại; tồn tại, khó khăn, phức tạp và nguyên nhân

Để tìm được giải pháp/công nghệ khai thác hiệu quả lượng dầu còn lại, vấn đề rất quan trọng là phải xác định được vị trí/khu vực dầu còn lưu lại. Nghiên cứu quá trình khai thác, theo nghiên cứu của Phùng Đình Thực [4 - 6, 10], tại tầng móng mỏ dầu Bạch Hổ, lượng dầu còn lại đang tồn tại trong 5 khu vực/vị trí với độ thấm chứa rất khác nhau, đó là: (1) Các khe nứt, hang hốc chưa khai thác ở phần nóc của thân dầu; (2) Đới nứt nẻ lớn thuộc phần giữa của thân dầu (dầu dư bão hòa - saturated oil residues) chưa được quét đẩy hết; (3) Toàn bộ đới vi nứt nẻ và nứt nẻ 1 chiều không liên thông mà công nghệ cũ/hiện tại chưa khai thác được; (4) Phần nóc móng nhô cao mà trước đây chưa xác định được và chưa mở vỉa; (5) Những thể tích còn sót do chưa xác định chính xác đới nứt nẻ hoặc quỹ đạo khoan các giếng khai thác/bơm ép chưa đến được (Hình 2) [4 - 6, 10].

Hiện nay, Vietsovpetro đã và đang áp dụng các giải

pháp công nghệ kỹ thuật phù hợp để khai thác lượng dầu còn lại thuộc đới tương móng mỏ Bạch Hổ tại 4 khu vực (1, 2, 4 và 5) [4 - 7]. Vấn đề tồn tại chưa có lời giải là khai thác và nâng cao hệ số thu hồi dầu từ khu vực 3: các đới vi nứt nẻ. Ở khu vực này, phần lớn lượng dầu đang “bị kẹt” trong đới vi nứt nẻ, chưa có điều kiện, công nghệ phù hợp để khai thác và đây cũng chính là khó khăn lớn nhất đối với tầng đá móng granite nứt nẻ mỏ dầu Bạch Hổ.

Nguyên nhân của tình trạng trên là do tính chất bất đồng nhất rất cao của các khối thuộc tầng móng Bạch Hổ. Với mô hình 2 độ rỗng, công nghệ áp dụng là bơm ép nước chưa huy động được dầu từ các vi nứt nẻ. Do độ mở của các nứt nẻ rất nhỏ, chưa tới 0,1 mm và độ thấm pha chỉ 1 - 5mD, nước bơm ép không thể thắng lực mao dẫn trong các vi nứt nẻ. Các thí nghiệm đã chứng minh rằng, giá trị gradient chênh áp tối đa mà dòng nước bơm ép có thể tạo ra (3 at/m) vẫn là rất nhỏ, không đủ để thắng lực mao dẫn và đẩy dầu ra khỏi các không gian rỗng vi nứt nẻ này [4 - 7, 11, 12].

4.2. Đề xuất các giải pháp công nghệ phù hợp khả thi và ưu tiên áp dụng tại mỏ Bạch Hổ giai đoạn cuối

Cho tới nay, phần lớn dầu Bạch Hổ được khai thác từ móng granite nứt nẻ, trong đó đới vi nứt nẻ có độ mở chỉ tới 0,1 mm, giá trị độ thấm 1 - 5mD, các giải pháp EOR hóa học thường không khả thi; các giải pháp vật lý, cơ học đã nêu trên đều có điểm chung là “tạo môi trường mất cân bằng” theo các hình thức và cách thức khác nhau. Tuy nhiên, lựa chọn giải pháp nào cũng cần nghiên cứu tính khả thi với thực trạng của mỏ cũng như thực trạng vận hành.

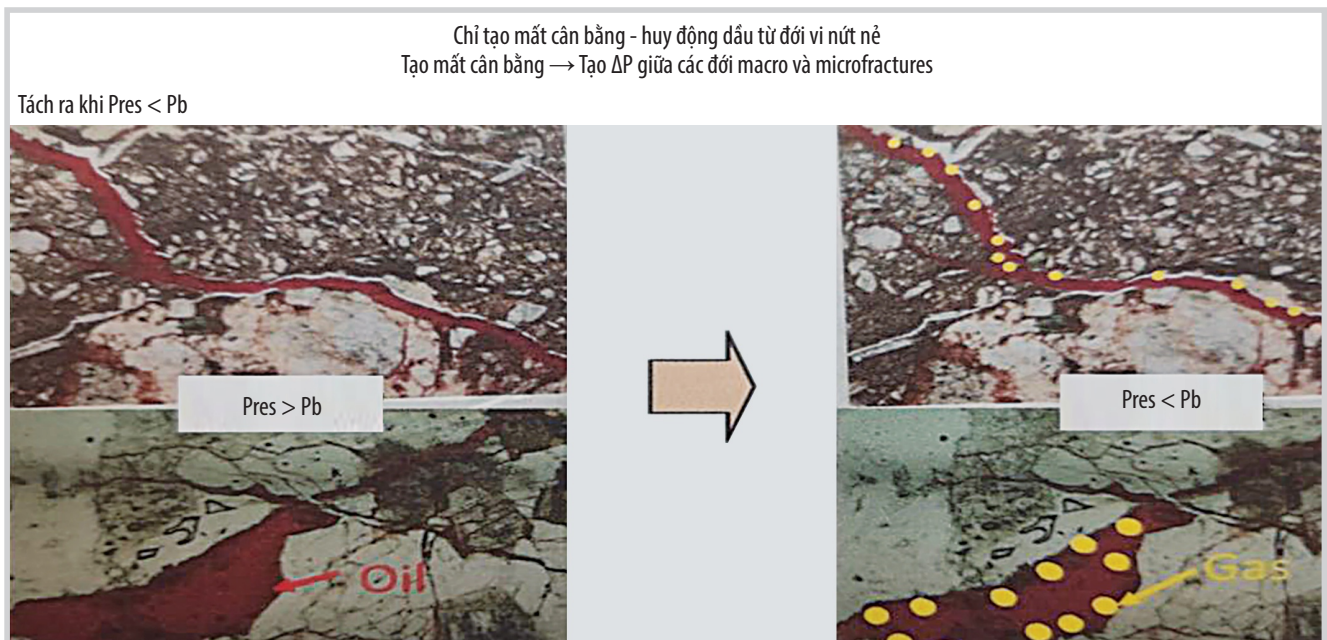
Dựa trên quy luật “mất cân bằng sẽ sinh ra chuyển động” nên phải áp dụng các giải pháp mang tính “tạo ra môi trường mất cân bằng” trong thân dầu đá móng, tạo điều kiện đủ để dầu còn “bị kẹt”, đang tồn đọng trong các đới vi nứt nẻ hoặc nứt nẻ 1 chiều chuyển động ra các nứt nẻ lớn [4 - 7, 10].

Một cách tạo ra mất cân bằng là giảm áp suất. Có thể giảm áp suất trong thân dầu móng nứt nẻ dưới áp suất bão hòa ở giai đoạn cuối. Áp suất giảm vừa tạo mất cân bằng áp suất, vừa tách khí, dầu linh hoạt hơn và dễ dàng dịch chuyển khỏi trạng thái “kẹt”, hướng ra đới nứt nẻ lớn (Hình 3).

Áp dụng quy luật “mất cân bằng sinh ra chuyển động” và nguyên lý “cái gì vào được thì ra được” vào khai thác dầu, đề xuất áp dụng giải pháp mới khai thác dầu tồn đọng trong các đới vi nứt nẻ tầng đá móng mỏ Bạch Hổ



Hình 2. Giảm độ các khu vực/vị trí lưu giữ lượng dầu còn lại.



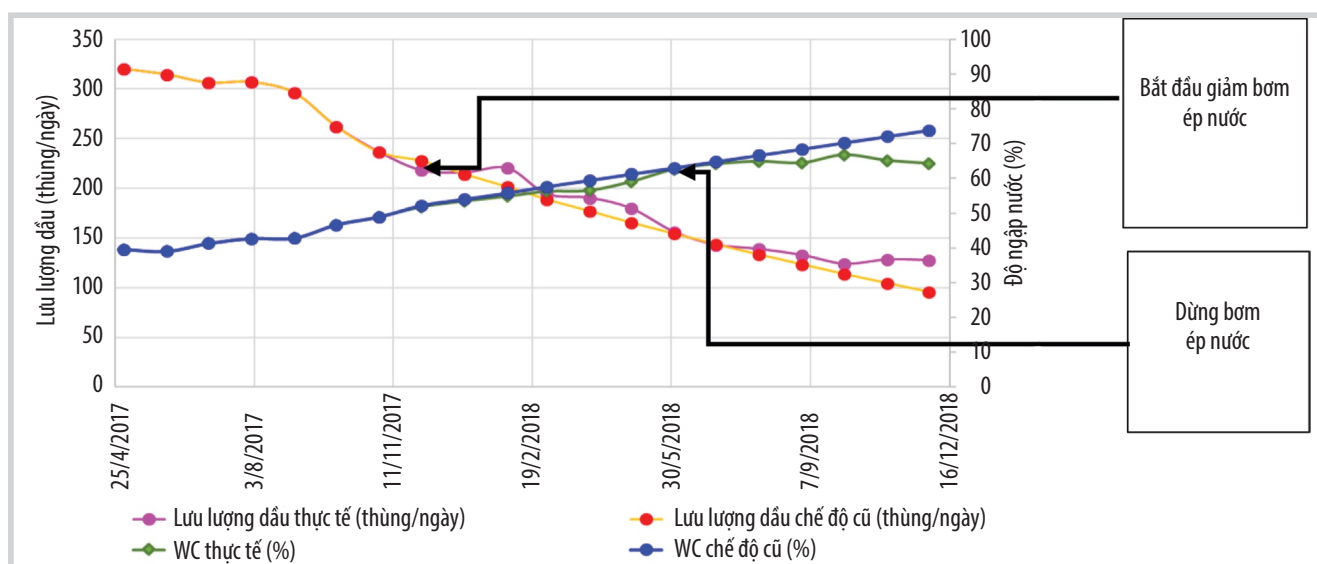
Hình 3. Giảm áp suất để tạo ra môi trường mất cân bằng.

giai đoạn cuối. Giải pháp có bản chất và nội dung chủ yếu như sau: i) Mất cân bằng sinh ra chuyển động. Trong thân dầu đá móng cần tạo mất cân bằng để huy động dầu từ đới vi nứt nẻ, nứt nẻ 1 chiều; ii) Tạo mất cân bằng nhờ giảm bơm ép nước; iii) Tạo mất cân bằng liên tục bằng cách bơm ép theo chu kỳ; tạo mất cân bằng cục bộ bằng phương pháp khai thác đồng thời thổi khí (gaslift) + bơm điện ngầm trong cùng 1 giếng; iv) Dầu không sinh ra từ móng; Dầu từ nơi khác dịch chuyển và thẩm thấu vào móng được thì cũng ra được, cần tạo điều kiện cần và đủ: giảm áp suất vỉa dưới áp suất bão hòa và tạo chênh áp đủ để huy động dầu từ đới vi nứt nẻ; v) Kết hợp bơm ép nước theo chu kỳ, thay đổi trường áp suất từ tối đa đến tối thiểu cho phép và ngược lại → tạo ra mất cân bằng tạm thời, liên tục → huy động dầu từ môi trường vi nứt nẻ vào hệ thống nứt nẻ lớn và tiếp tục được nước bơm ép quét đẩy lên phía trên [4 - 7, 10].

Ưu điểm của giải pháp này là tính khả thi cao, không cần đầu tư thêm thiết bị, có thể áp dụng ngay và dự báo mang lại hiệu quả tốt.

Giải pháp ưu tiên tiếp theo được đề xuất áp dụng là phương pháp khai thác hỗn hợp gaslift + bơm điện chìm trong cùng 1 giếng. Để thí điểm áp dụng phương pháp này, giếng được chọn có hệ số sản phẩm cao, độ ngập nước trên 70%, tại khu vực có tiềm năng thu hồi dầu từ các đới vi nứt nẻ. Giải pháp này hình thành nên khu vực có chênh lệch áp suất lớn, hỗ trợ tạo ra hiện tượng mất cân bằng cục bộ nhằm huy động lượng dầu trong các vi nứt nẻ và nứt nẻ 1 chiều.

Giải pháp "Bơm ép khí - nước luân phiên" có thể nghiên cứu áp dụng theo quy trình sau: Tiến hành nghiên cứu trên mẫu lõi đá móng nứt nẻ về khả năng xâm nhập khí vào đới vi nứt nẻ với sự trợ giúp từ lực đẩy của dòng nước bơm ép luân phiên; cần sử dụng mô hình mô phỏng



Hình 4. Động thái khai thác giữa chế độ điều chỉnh (thực tế) và giữ nguyên chế độ cũ.

viã để dự báo hiệu quả và tối ưu hóa thiết kế trước khi thử nghiệm thực tế. Tiến hành thử nghiệm bơm ép nước - khí luân phiên tại khu vực Nam Trung tâm móng và đánh giá khả năng áp dụng cho toàn bộ thân dầu đá móng.

Các phương pháp EOR vật lý không sử dụng hóa chất khác không khuyến khích áp dụng do tính khả thi thấp ở thời điểm hiện tại và sự phức tạp, hoặc đòi hỏi phải có nguồn CO₂, N₂ tại chỗ, nguồn khí hydrocarbon dồi dào (đối với phương pháp CO₂ siêu tới hạn, tạo bọt khí) hoặc cần đầu tư lớn, đòi hỏi nhiều thời gian nghiên cứu chuẩn bị (đối với phương pháp sóng xung kích, sóng âm, sóng điện từ). Mặt khác, tính khả thi của phương pháp cần nghiên cứu kỹ và thử nghiệm thận trọng do thân dầu móng Bạch Hổ là một hệ thống nứt nẻ phức tạp đa độ rỗng nhưng thống nhất, khó tạo được áp suất đủ lớn để sóng hoặc khí xâm nhập vào đới vi nứt nẻ, vì trước khi xâm nhập vào đới vi nứt nẻ sóng hoặc khí đã phân tán vào hệ thống nứt nẻ lớn.

4.3. Thử nghiệm “Tạo môi trường mất cân bằng” tại khu vực móng Trung tâm mỏ Bạch Hổ

Từ đầu năm 2018, giải pháp “tạo môi trường mất cân bằng” đã được thử nghiệm tại khu vực móng Trung tâm bằng cách điều chỉnh giảm lượng nước bơm ép. Từ tháng 6/2018 tất cả các giếng ở khu vực Trung tâm đã dừng bơm ép, chỉ bơm ép các giếng ở vùng rìa có áp suất bơm thấp (= 0 atm) với hệ số bù khai thác hàng tháng đạt từ 52 - 60%. Một số giếng được lựa chọn để bơm ép theo chu kỳ nhằm ngăn ngừa áp suất vỉa xuống quá thấp, ảnh hưởng đến lưu lượng dầu. Kết quả cho thấy sau năm đầu tiên thử nghiệm tại một khu vực Trung tâm móng mỏ

Bạch Hổ, sản lượng dầu đã gia tăng được 50,4 nghìn tấn dầu (Hình 4) [7, 10].

4.4. Đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo

Áp dụng “Giải pháp tạo môi trường mất cân bằng” trong thân dầu đá móng nứt nẻ như là giải pháp EOR được khẳng định về lý luận với các nghiên cứu đã được thực hiện trong giai đoạn 1 nêu trên và thực tiễn đã chứng minh hiệu quả sau 1 năm áp dụng thử nghiệm tại 1 khu vực mỏ dầu Bạch Hổ. Tuy nhiên, đây là những kết quả nghiên cứu đầu tiên đã đạt được ở mức định tính.

Nghiên cứu tiếp theo là đánh giá về mặt định lượng của giải pháp, đó là: xác định giá trị gradient áp suất cần thiết tối thiểu và tối đa để tạo được môi trường mất cân bằng nhằm đẩy dầu trong đới vi nứt nẻ có thể chuyển động được ra đới nứt nẻ lớn; xác định tốc độ giảm áp suất tối ưu; xác định giá trị áp suất cuối cùng trong vi nứt nẻ; đồng thời đánh giá tác động tiêu cực có thể xuất hiện khi áp dụng giải pháp.

Tất cả những giá trị định lượng đó đòi hỏi phải tiến hành trong các phòng thí nghiệm chuyên sâu, với sự trợ giúp của các phương tiện hiện đại như: PVT, thiết bị đo giá trị thẩm lọc, máy chụp X-quang (X-ray), hoặc máy chụp cắt lớp vi tính (CT scanner)... Tiến hành xây dựng mô hình PVT cho dầu khí tầng/đối tượng đá móng nứt nẻ trong quá trình giảm áp suất dưới (tiệm cận) áp suất bão hòa. Nghiên cứu thí nghiệm sẽ được thực hiện trên các loại mẫu lõi gồm các mẫu lõi thực của đá móng hoặc mẫu lõi vật lý composite, các mẫu lõi số (digital cores), cũng như sử dụng các vi mạch (microchips). Sau đó sẽ sử dụng các thuật toán để xây dựng các mô hình tĩnh và động, tiến hành chạy mô

hình mô phỏng vỉa để dự báo hiệu quả và tối ưu hóa thiết kế trước khi tổ chức triển khai tại hiện trường.

5. Kết luận

Thân dầu móng granite nứt nẻ tại mỏ Bạch Hổ là đối tượng chứa dầu đặc biệt, mang đặc trưng của hệ thống chứa phi truyền thống với cấu trúc khe nứt phức tạp, đa độ rỗng và độ thấm thấp. Quá trình khai thác trong gần 4 thập kỷ qua đã đạt được hệ số thu hồi dầu tương đối cao so với mặt bằng chung, song vẫn còn lại một lượng dầu khí tại chỗ đáng kể - chủ yếu nằm trong các đới vi nứt nẻ - chưa thể huy động bằng các công nghệ truyền thống.

Kết quả tổng hợp và nghiên cứu cho thấy, các giải pháp tăng cường thu hồi dầu (EOR) hóa học không còn phù hợp trong điều kiện địa chất - nhiệt - vật lý đặc thù của tầng móng Bạch Hổ. Ngược lại, các giải pháp EOR vật lý - cơ học, đặc biệt nhóm giải pháp "tạo môi trường mất cân bằng áp suất" (pressure imbalance-driven mobilization) đã chứng minh được tính đúng đắn cả về lý thuyết cũng như bước đầu trong thực tiễn áp dụng thử nghiệm mới đây.

Trong số các giải pháp EOR đã xem xét, 2 hướng nghiên cứu ứng dụng có tính khả thi và ưu tiên cao nhất với thân dầu móng granite nứt nẻ Bạch Hổ là:

- Bơm ép nước theo chu kỳ, nhằm tạo dao động áp suất cục bộ và liên tục, hỗ trợ dầu thoát khỏi vi nứt nẻ;
- Khai thác hỗn hợp bằng gaslift kết hợp bơm điện chìm, tạo điều kiện chênh lệch áp suất trong cùng một giếng để huy động dầu còn mắc kẹt.

Việc dùng bơm ép hoặc điều chỉnh chế độ ép nước tại một số khu vực móng đã mang lại kết quả tích cực, thể hiện qua sự gia tăng sản lượng rõ rệt trong năm đầu tiên thử nghiệm. Kết quả này càng củng cố tính khả thi của giải pháp tiếp cận "tạo môi trường mất cân bằng".

Tuy nhiên, để các giải pháp này có thể triển khai rộng rãi, bền vững và tối ưu hóa hiệu quả, cần tiến hành các bước nghiên cứu tiếp theo ở mức định lượng, bao gồm:

- Xác định gradient áp suất tối ưu để vượt qua lực mao dẫn trong đới vi nứt nẻ;
- Thiết lập các mô hình mô phỏng vỉa chính xác hơn từ dữ liệu thực nghiệm trên mẫu lõi vật lý, lõi số và vi mạch;
- Dự báo ảnh hưởng đến động thái khai thác tổng thể và các rủi ro tiềm ẩn.

Việc kết hợp chặt chẽ giữa nghiên cứu trong phòng thí nghiệm, mô hình mô phỏng và thực nghiệm hiện

trường là hướng đi cần thiết để tiến tới xây dựng một quy trình công nghệ tin cậy, mở ra khả năng nâng cao hệ số thu hồi dầu cho đối tượng móng nứt nẻ mỏ Bạch Hổ nói riêng và các mỏ khác tại Việt Nam nói chung.

Tài liệu tham khảo

[1] Petrovietnam and Vietsovpetro, *Fractured basement reservoir*. Science and Technics Publishing House, 2006.

[2] Petrovietnam, *Fractured basement reservoir*. Science and Technics Publishing House, 2008.

[3] Phạm Anh Tuấn, Lê Đình Lăng, Trương Công Tài, và Nguyễn Đăng Mạn, "Triển vọng các giải pháp nâng cao thu hồi dầu cho thân dầu móng mỏ Bạch Hổ", *Tạp chí Dầu khí*, Số 5, trang 2 - 10 và trang 45, 2003.

[4] Phùng Đình Thực, "Nghiên cứu, đề xuất các giải pháp công nghệ và kỹ thuật nâng cao hệ số thu hồi dầu giai đoạn cuối đối tượng móng mỏ Bạch Hổ - Kỳ I: Đối tượng móng mỏ Bạch Hổ và quá trình khai thác", *Tạp chí Dầu khí*, Số 5, trang 22 - 28, 2018.

[5] Phùng Đình Thực, "Nghiên cứu, đề xuất các giải pháp công nghệ và kỹ thuật nâng cao hệ số thu hồi dầu giai đoạn cuối đối tượng móng mỏ Bạch Hổ - Kỳ II: Đánh giá hiệu quả của giải pháp duy trì áp suất vỉa, thực trạng khai thác của từng khu vực, tồn tại và nguyên nhân", *Tạp chí Dầu khí*, Số 7, trang 18 - 34, 2018.

[6] Phùng Đình Thực, "Nghiên cứu, đề xuất các giải pháp công nghệ và kỹ thuật nâng cao hệ số thu hồi dầu giai đoạn cuối đối tượng móng mỏ Bạch Hổ - Kỳ III: Đề xuất các giải pháp kỹ thuật - công nghệ để khai thác hiệu quả đối tượng móng mỏ Bạch Hổ trong giai đoạn cuối", *Tạp chí Dầu khí*, Số 8, trang 16 - 35, 2018.

[7] Phung Dinh Thuc, "Enhancing oil recovery for Bach Ho basement reservoir at the final production phase - Science basis, methodology and technological solutions", *International Research Workshop "Studying optimal production regimes for fractured basement reservoir, including regime at reservoir pressure below the bubble point"*, Vietsovpetro, 15/9/2022.

[8] M.T. Stirpe, J. Guzman, E. Manrique, and V. Alvarado, "Cyclic water injection simulations for evaluations of its potential in Lagocinco field available to purchase", *SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, Oklahoma, 17 - 21 April 2004*. DOI: 10.2118/89378-MS.

[9] M.T. Stirpe, J. Guzman, E. Manrique, and V. Alvarado, "Cyclic water injection simulations for evaluations of its potential in Lagocinco field available to purchase", *SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, Oklahoma, 17 - 21 April 2004*. DOI: 10.2118/89378-MS.

[10] Phùng Đình Thực, "Khai thác thân dầu trong đá móng mỏ Bạch Hổ: Những vấn đề phức tạp chính và các giải pháp công nghệ - kỹ thuật chủ yếu", *Tuyển tập Báo cáo "Hội nghị Khoa học - Công nghệ chào mừng sự kiện khai thác tấn dầu thứ 250 triệu"*, Vietsovpetro, 2024.

[11] Nguyễn Văn Minh, "Trao đổi về giải pháp gia tăng thu hồi dầu cho thân dầu móng granitoid nứt nẻ mỏ Bạch Hổ", *Tạp chí Dầu khí*, Số 1, trang 10 - 23, 2012.

[12] Trần Lê Đông, Phạm Anh Tuấn, và Lê Đình Lăng, "Đặc điểm quá trình thu hồi dầu trong đá móng granite nứt nẻ và các giải pháp triển vọng để nâng cao thu hồi dầu cho thân dầu móng mỏ Bạch Hổ". *Tuyển tập Hội nghị Khoa học Công nghệ: Ngành Dầu khí Việt Nam trước thềm thế kỷ 21*, Tập I, Nhà xuất bản Thanh Niên, 2000, trang 33 - 40.

ENHANCED OIL RECOVERY (EOR) IN FRACTURED GRANITE BASEMENT RESERVOIRS: NON-CHEMICAL SOLUTIONS FOR THE BACH HO FIELD

Phung Dinh Thuc^{1,2}, Phan Ngoc Trung^{1,2}

¹Vietnam Petroleum Institute (VPI)

²Vietnam Petroleum Association (VPA)

Email: thucphung125@gmail.com

Summary

Fractured basement reservoirs - especially the granitic basement of the Bach Ho field in the Cuu Long basin - exhibit distinct structural features including low permeability and porosity, high temperature, complex fracture system... These conditions pose significant challenges for enhanced oil recovery (EOR) strategies, as chemical EOR methods are typically ineffective.

This study synthesizes and analyzes the characteristics of oil accumulations in fractured basement reservoirs, identifies persistent challenges encountered during production from such reservoirs, and evaluates the feasibility of physical and mechanical EOR methods tailored to basement formations. Based on these analyses, it proposes technically feasible solutions to enhance oil recovery at the Bach Ho field under the current stage.

Key words: Enhanced oil recovery (EOR), fractured basement, Bach Ho field.