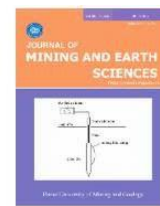




Journal of Mining and Earth Sciences

Website: <https://jmes.humg.edu.vn>



Determination of thick walled cylinder strength in sand control for production wells in Block 46, Malay - Tho Chu Basin



Quan Anh Tran ^{1,*}, Vinh The Nguyen ²

¹ PetroVietnam Production and Exploration (PVEP), Hanoi, Vietnam

² Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:

Received 29th June 2025

Revised 09th Sept. 2025

Accepted 19th Sept. 2025

Keywords:

Empirical correlation,
Malay - Tho Chu basin,
Sanding prediction,
Strength of the formation.

ABSTRACT

Sand production is one of the major challenges in oil and gas production within sandstone formations, particularly in the Malay-Tho Chu Basin. Accurate prediction of sand production potential plays a crucial role in the design and operation of wells and facilities, ensuring both safety and economic efficiency. One of the key geomechanics parameters used to assess the risk of sand production is the Thick-Walled Cylinder (TWC) strength, which reflects the strength of the formation around the wellbore.

Determining the wellbore TWC strength is a critical step in wellbore stability analysis and sand production risk assessment. Typically, TWC is measured through thick-walled cylinder tests, where the stress conditions around the wellbore or perforated zones are directly simulated by applying increasing confining pressure to a cylindrical rock sample until structural failure occurs. However, such tests are often costly and depend heavily on the availability of high-quality core samples from production wells. Therefore, developing an empirical formula to estimate TWC from simple parameters which easily measured, such as porosity, is both practical and necessary.

This paper presents a methodology for developing an empirical correlation between porosity and TWC strength using core data from Block 46 and compares the resulting model with existing models. The results are intended to determine the formation strength around the wellbore and further improve sand production prediction models for the Malay - Tho Chu Basin.

Copyright © 2025 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

E - mail: quanta@pvep.com.vn

DOI: 10.46326/JMES.2025.66(5).10



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

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

Xác định độ bền hình trụ thành dày khi dự báo khả năng sinh cát cho các giếng khai thác dầu khí khu vực lô 46, bể Malay - Thổ Chu

Trần Anh Quân ^{1,*}, Nguyễn Thế Vinh ²

¹ Tổng công ty thăm dò khai thác dầu khí (PVEP), Hà Nội, Việt Nam.

² Trường Đại học Mỏ - Địa Chất, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:
Nhận bài 29/6/2025
Sửa xong 09/9/2025
Chấp nhận đăng 19/9/2025

Từ khóa:

Công thức thực nghiệm,
Dự báo sinh cát,
Độ bền hình trụ thành dày,
Malay-Thổ Chu.

TÓM TẮT

Hiện tượng sinh cát là một trong những vấn đề phức tạp trong khai thác dầu khí tại các mỏ cát kết, đặc biệt tại khu vực bể trầm tích Malay - Thổ Chu. Việc dự báo khả năng sinh cát đóng vai trò quan trọng trong thiết kế và vận hành giếng khoan nhằm đảm bảo an toàn và hiệu quả kinh tế. Một trong các tham số cơ học then chốt để đánh giá nguy cơ sinh cát là độ bền hình trụ thành dày (TWC-Thick Wall Cylinder Strength) cho giếng khai thác.

Việc xác định độ bền hình trụ thành dày quanh giếng khai thác là một bước quan trọng trong phân tích ổn định thành hệ và dự báo nguy cơ sinh cát. Thông thường, TWC được xác định thông qua thí nghiệm mẫu trụ thành dày. Trong thí nghiệm này, trạng thái ứng suất xung quanh thân giếng hoặc vùng bắn mở vỉa được mô phỏng trực tiếp thông qua việc tăng áp suất buồng lên mẫu hình trụ, cho đến khi mẫu bị phá hủy. Việc thực hiện các thí nghiệm xác định giá trị mẫu trụ thành dày thường tốn kém và phụ thuộc vào tính sẵn có của việc thu thập mẫu từ các giếng khoan khai thác. Do đó, việc xây dựng một công thức thực nghiệm nhằm xác định TWC từ các thông số dễ đo như độ rỗng là cần thiết. Kết quả đưa ra sẽ được sử dụng để hoàn thiện mô hình dự báo sinh cát cho khu vực bể Malay - Thổ Chu.

Bài báo này trình bày phương pháp xây dựng công thức thực nghiệm giữa độ rỗng và TWC từ dữ liệu mẫu lõi khu vực lô 46 đồng thời tiến hành so sánh với các mô hình lý thuyết hiện có. Từ đó, xác định giá trị TWC cho các giếng khai thác dầu khí khu vực lô 46.

© 2025 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

*Tác giả liên hệ

E - mail: quanta@pvep.com.vn

DOI: 10.46326/JMES.2025.66(5).10

1. Mở đầu

Hiện tại, ở Việt Nam nói chung, khu vực thềm lục địa Tây Nam Việt Nam nói riêng, cát xâm nhập vào giếng khai thác đang là mối quan tâm lớn của các nhà điều hành dầu khí. Các giếng dầu trong lô 46-13, khu vực mỏ Đông Kewa trong lô 46-CN và các mỏ lân cận trong khu vực vùng chồng lấn khai thác chung PM3 - CAA, trong một vài năm gần đây cũng đã xuất hiện cát xâm nhập vào các giếng khai thác dầu làm ảnh hưởng tới các thiết bị khai thác và xử lý dầu khí. Ngoài ra, hiện nay đang có nhiều hoạt động tìm kiếm, thăm dò và phát triển các mỏ dầu khí mới khu vực bể Malay - Thổ Chu và công tác nghiên cứu về dự báo sinh cát và kiểm soát cát được đẩy mạnh xem xét và nghiên cứu. Trong bối cảnh đó việc xây dựng một mô hình dự báo sinh cát mang tính đặc trưng cho đất đá trong khu vực là cấp bách và cần thiết. Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện có còn khá hạn chế, và nhiều mô hình phổ biến trên thế giới áp dụng cho khu vực chưa được kiểm chứng đầy đủ về độ phù hợp tại khu vực này. Đối với các mô hình dự báo sinh cát, độ bền thành hệ là một thông số quan trọng và mang tính đặc trưng của đất đá khu vực để áp dụng vào mô hình này và đại diện bởi giá trị *Độ bền hình trụ thành dày - Thick Wall Cylinder Strength (TWC)*, do đó xây dựng được mô hình *Độ bền hình trụ thành dày* theo đặc trưng của khu vực trong giai đoạn hiện nay là cần thiết.

Việc xác định độ bền hình trụ thành dày là một thông số đặc trưng và đóng vai trò quan trọng trong quá trình xây dựng các mô hình dự báo sinh cát. Giá trị TWC được xác định dựa trên nhiều phương pháp bao gồm cả trực tiếp và gián tiếp thông qua nội suy từ các giá trị đo log hay các giá trị UCS nội suy, phương pháp này có độ chính xác phụ thuộc vào các mối quan hệ trung gian, không phản ánh đúng điều kiện ứng suất quanh vùng giếng khai thác nên có thể không chính xác. Việc xác định giá trị TWC cũng có thể bằng phương pháp mô phỏng hiện trường. Nghiên cứu của Morita và nnk. (1990) đã chỉ ra phương pháp này rất khó thực hiện và có chi phí cao, thường áp dụng cho các khảo sát đặc biệt chỉ mang tính chất cục bộ, đại diện với số lượng mẫu không nhiều, giá thành cao, đôi khi khó triển khai do việc lấy mẫu gặp khó khăn.

Thông số TWC ảnh hưởng bởi đặc tính ma sát do đó phụ thuộc vào sự phân bố kích thước hạt, độ

rỗng và mức độ tròn cạnh của hạt. Những yếu tố này đặc biệt là độ rỗng, đối với từng khu vực cụ thể, sẽ liên quan đến môi trường trầm tích, do đó mang tính chất đặc trưng của từng vùng riêng lẻ khác nhau. Với các đánh giá trên, nhóm tác giả đã nghiên cứu và đưa ra mối quan hệ giữa độ rỗng và TWC dựa trên kết quả phân tích mẫu lõi của đất đá trong khu vực lô 46 và có so sánh, đánh giá với các công thức thực nghiệm trước đây. Bài báo này đưa ra mối quan hệ giữa TWC và độ rỗng trong lô 46 trên cơ sở các thí nghiệm.

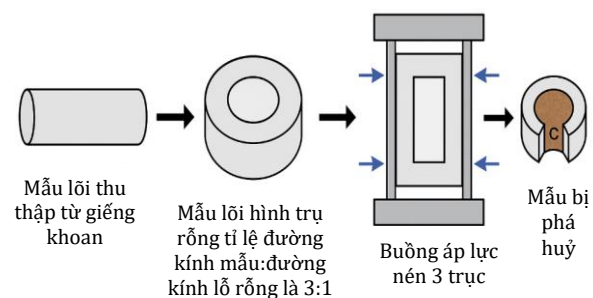
2. Tổng quan các phương pháp xác định TWC

2.1. Các phương pháp xác định TWC truyền thống

Độ bền hình trụ thành dày (Thick Wall Cylinder Strength - TWC) là một trong những tham số quan trọng trong địa cơ học, đặc biệt phục vụ tính toán áp suất sinh cát tới hạn (CDP - Critical Drawdown Pressure) và thiết kế lưu lượng khai thác an toàn cho tầng chứa cát kết yếu. Trong thực tế, có 3 nhóm phương pháp chính được sử dụng để xác định TWC.

2.1.1. Phương pháp thí nghiệm trên mẫu lõi

Nhiều nghiên cứu đã sử dụng thiết bị nén ba trục (triaxial cell) với mẫu trụ rỗng (hollow cylinder) để mô phỏng ứng suất xung quanh thành giếng. Khi tăng áp suất bao (áp suất nén hông) đến mức mẫu bị phá vỡ, giá trị áp suất này được ghi nhận là TWC (Willson và nnk., 2002; Ahad và nnk., 2020). Phương pháp này phản ánh trực tiếp hành vi phá hủy đá và có độ tin cậy cao nhưng chi phí và yêu cầu kỹ thuật tương đối lớn. Quá trình tiến hành thí nghiệm mẫu lõi đo giá trị TWC này được miêu tả tóm tắt tại Hình 1.



Hình 1. Quá trình sử dụng mẫu lõi để xác định giá trị TWC trong phòng thí nghiệm.

2.1.2. Phương pháp nội suy từ log địa vật lý

Các nghiên cứu như Vernik (1993), Khaksar và nnk. (2009), Asadi và nnk. (2017) đã xây dựng quan hệ thống kê giữa TWC với các thông số đo từ giếng như độ rỗng (ϕ), vận tốc âm (V_p , V_s), mật độ hoặc module đàn hồi, từ đó suy luận và dự báo giá trị TWC. Cách tiếp cận này phù hợp với trường hợp không có mẫu lõi, nhưng kết quả thường mang tính tổng quát và phụ thuộc nhiều vào điều kiện địa chất khu vực. Theo Chang và nnk. (2006), khi không có mẫu lõi, có thể ước lượng TWC từ dữ liệu log sonic và density bằng cách kết hợp các mô hình đàn hồi và mối quan hệ thực nghiệm giữa vận tốc P, S, độ rỗng và UCS. Phần mềm mô phỏng địa cơ học (ví dụ: FLAC3D, Abaqus) cũng có thể mô phỏng điều kiện tải thành dày để tính TWC gián tiếp từ dữ liệu log. Theo Khaksar và nnk (2019), việc xác định TWC thông qua kết hợp giữa mẫu lõi và log giếng cho phép đánh giá giới hạn biến dạng tới hạn, từ đó hỗ trợ ra quyết định kiểm soát cát phù hợp hơn.

2.1.3. Phân tích ứng suất mô phỏng hoặc thực địa

Một số tác giả như Morita và nnk. (1990), Santarelli và nnk (1997) sử dụng dữ liệu thực tế giếng khoan (thời điểm sụt lún) để hiệu chỉnh TWC bằng cách so sánh ứng suất với áp suất lỗ rỗng. Mặc dù sát thực tế, cách tiếp cận này chỉ phù hợp sau khi giếng đã được khoan và gặp sự cố.

Công thức hồi quy sử dụng được dựa trên công thức do Khaksar và nnk. (2009) đề xuất có dạng:

$$TWC = a \times \phi^b \quad (1)$$

Trong đó: TWC - độ bền hình trụ thành dày (psi); ϕ - độ rỗng (%); a, b - hệ số thực nghiệm cần xác định.

2.2. Xác định giá trị TWC theo độ rỗng

Một hướng tiếp cận đáng chú ý là sử dụng độ rỗng (ϕ) làm biến độc lập để dự đoán TWC - đặc biệt hữu ích khi dữ liệu địa chất bị giới hạn. Khaksar và nnk. (2009) đã xây dựng công thức thực nghiệm nội suy TWC từ độ rỗng ϕ dạng hàm mũ dựa trên cơ sở dữ liệu cát kết yếu ở nhiều bề trầm tích:

$$TWC = a \times \phi^b$$

Trong đó hệ số a và b được xác định từ dữ liệu mẫu đá. Tương tự, nghiên cứu của Willson và nnk.

(2002) sử dụng TWC như một đầu vào chính cho mô hình dự báo tốc độ sinh cát. Hoang và nnk. (2017) hay Asadi và nnk. (2017) cũng triển khai mô hình dự báo sinh cát và xây dựng mối quan hệ giữa độ rỗng và TWC cho tầng chứa Miocen áp dụng tại bồn trũng Nam Côn Sơn, tuy nhiên việc dự báo hệ số TWC bị ảnh hưởng bởi tính chất địa tầng riêng biệt.

Nghiên cứu tổng quan bởi Ahad và nnk. (2020) cho thấy rằng mô hình dạng hàm mũ TWC- ϕ đặc biệt phù hợp với cát kết xi măng yếu, nơi mối quan hệ phi tuyến này phản ánh chính xác hơn mức độ dễ phá hủy của đá theo độ rỗng.

2.3. Mục tiêu nghiên cứu

Hiện chưa có công bố chính thức nào xây dựng mô hình thực nghiệm TWC- ϕ riêng cho khu vực lô 46 - bể Malay Thổ Chu, nơi có địa tầng cát kết Miocen yếu và điều kiện khai thác tương đồng với các mỏ có rủi ro sinh cát cao. Do đó, việc xây dựng một mô hình TWC- ϕ mang tính đặc thù khu vực, dựa trên dữ liệu mẫu lõi thực nghiệm là cần thiết và có ý nghĩa thiết thực trong việc tối ưu hóa thiết kế sản xuất và quản lý rủi ro địa cơ học.

3. Phương pháp nghiên cứu và dữ liệu

3.1. Thu thập mẫu và điều kiện thí nghiệm

Các mẫu lõi trụ được lựa chọn từ khu vực lô 46, tại các tập cát kết tuổi Miocen giữa và muộn có độ rỗng trong khoảng 15÷30% và xi măng hóa trung bình. Tổng cộng 4 mẫu được gia công thành trụ rỗng với đường kính ngoài 1 inch và lỗ trong 0,33 inch (tỷ lệ 3:1), theo thiết kế tương tự như trong nghiên cứu Willson và nnk. (2002) và tiến hành đo giá trị như miêu tả tại Hình 1.

Mẫu được bọc kín bằng cao su, đặt trong buồng nén ba trục với nắp thép không gỉ hai đầu. Áp suất nén hông (confining pressure) được tăng dần với tốc độ không đổi. Khi ứng suất tập trung quanh lỗ vượt quá khả năng chịu lực của đá, thành mẫu sẽ sụp đổ hướng tâm, được nhận biết qua giảm áp suất hoặc tăng nhanh biến dạng chu vi. Áp suất ghi nhận tại thời điểm sụp lỗ là TWC thực nghiệm.

Các mẫu được bão hòa bằng dung dịch muối 15,060 ppm để mô phỏng điều kiện giếng thực tế (Willson, 2002). Kết quả thu được gồm áp suất phá hủy trong (do dịch thoát ra) và áp suất phá

hủy ngoài (từ cảm biến biến dạng) với sai số trung bình ~7% như báo cáo của Ahad và nnk. (2020).

3.2. Thiết lập mô hình TWC- ϕ

Mô hình thực nghiệm được đề xuất bởi Khaksar và nnk. (2009) đưa ra phương trình có dạng như tại phương trình (1) với hệ số $a = 20,62$; $b = -3,54$, cụ thể: $TWC = 20,62 \times \phi^{-3,54}$

Sử dụng phần mềm MATLAB kết hợp Excel, thuật toán Levenberg-Marquardt được triển khai để tối thiểu hóa sai số bình phương. Dữ liệu TWC từ 4 mẫu được hiệu chỉnh thành 1 công thức duy nhất có hệ số phù hợp với kết quả thí nghiệm. Mô hình này sau đó được so sánh với công thức của Khaksar để đánh giá mức độ tương thích.

Giá trị độ bền mẫu trụ thành dày tại các độ sâu được tính toán như Bảng 1.

Bảng 1. Độ bền mẫu trụ thành dày (TWC) đo được và giá trị TWC tính toán theo hệ số xác định cho lô 46.

Độ rỗng (%)	TWC đo trong phòng thí nghiệm (psi)	TWC theo công thức Khaksar (psi)
23,1	2610	3691
22,9	2702	3806
24,1	2227	3176
26,3	1505	2332

Đồ thị biểu thị các giá trị TWC đo được trong phòng thí nghiệm và độ rỗng được thể hiện theo Hình 2.

Kết quả hồi quy từ 4 mẫu thực nghiệm thu được công thức:

$$TWC = 5,315 \times \phi^{-4,232} \quad (2)$$

Cặp hệ số thực nghiệm được xác định là:

-a = 5,315

-b = -4,232

Giá trị R^2 đạt 0,998.

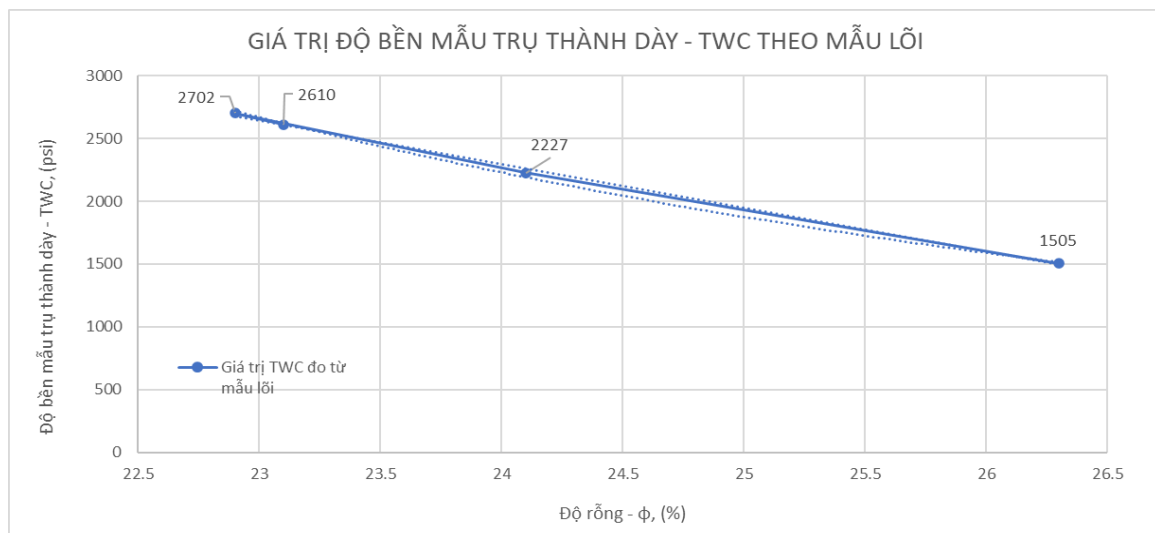
3.3. Đánh giá độ phù hợp của mô hình

Mô hình được kiểm tra bằng các chỉ số:

- R^2 : phản ánh mức độ phù hợp
- RMSE: sai số trung bình
- % sai lệch trung bình: giữa thực nghiệm và dự đoán

Giá trị $R^2 = 0,098$ cho thấy mô hình có độ khớp rất cao với dữ liệu thực nghiệm. Điều này khẳng định độ rỗng là tham số quyết định chính đến khả năng sụp đổ mẫu đá trong điều kiện ứng suất nén. Kết quả chỉ ra rằng mô hình TWC- ϕ phù hợp tốt với dữ liệu thực nghiệm lô 46. So với mô hình Khaksar, hệ số thực nghiệm của khu vực lô 46 có độ dốc lớn hơn, phản ánh rõ sự khác biệt về điều kiện kiến tạo và thành phần khoáng vật.

Mặc dù tập dữ liệu được sử dụng trong nghiên cứu này chỉ gồm 4 mẫu lõi có kết quả thí nghiệm TWC đầy đủ, phương pháp hồi quy phi tuyến Levenberg-Marquardt vẫn được lựa chọn nhờ vào tính ổn định và khả năng hội tụ nhanh khi tối ưu hàm mục tiêu phi tuyến. Motulsky & Christopoulos (2004) cho rằng sử dụng hồi quy phi tuyến với số lượng điểm dữ liệu nhỏ (<10),



Hình 2. Đồ thị giá trị TWC theo ϕ đo được trong phòng thí nghiệm.

cần có bước kiểm tra lại độ nhạy của mô hình với sai số đo đạc và phân tích độ tin cậy của hệ số thông qua khoảng tin cậy (confidence interval). Nhằm đảm bảo hiệu lực của mô hình, khoảng tin cậy của mô hình cũng sẽ được xem xét, phân tích đánh giá tại phần thảo luận.

3.4. Kết quả và phân tích

Trên cơ sở kết quả hệ số được tính toán, Bảng 2 dưới đây đưa ra kết quả so sánh giữa giá trị đo được và giá trị tính toán theo mô hình. Ngoài ra, các giá trị tính toán theo công thức của Khaksar cũng được xem xét và so sánh.

Bảng 2. Giá trị TWC theo công thức đề xuất bởi Khaksar, mô hình lô 46 và giá trị thực tế đo được trong phòng thí nghiệm.

Độ rỗng (%)	TWC theo công thức Khaksar (psi)	TWC theo mô hình lô 46 (psi)	TWC theo thí nghiệm (psi)
23,1	3691	2622	2610
22,9	3806	2721	2702
24,1	3176	2192	2227
26,3	2332	1514	1505

Mô hình này đặc trưng cho đá cát kết ở bể Malay- Thổ Chu, nơi độ rỗng thường khá cao (khoảng 16÷28%).

Cả hai công thức trên đều cho thấy TWC giảm mạnh khi độ rỗng tăng - phù hợp với hiểu biết rằng đá có độ rỗng lớn thì sức bền giảm do mức độ gắn kết hạt kém hơn. Tuy nhiên, các thông số hệ

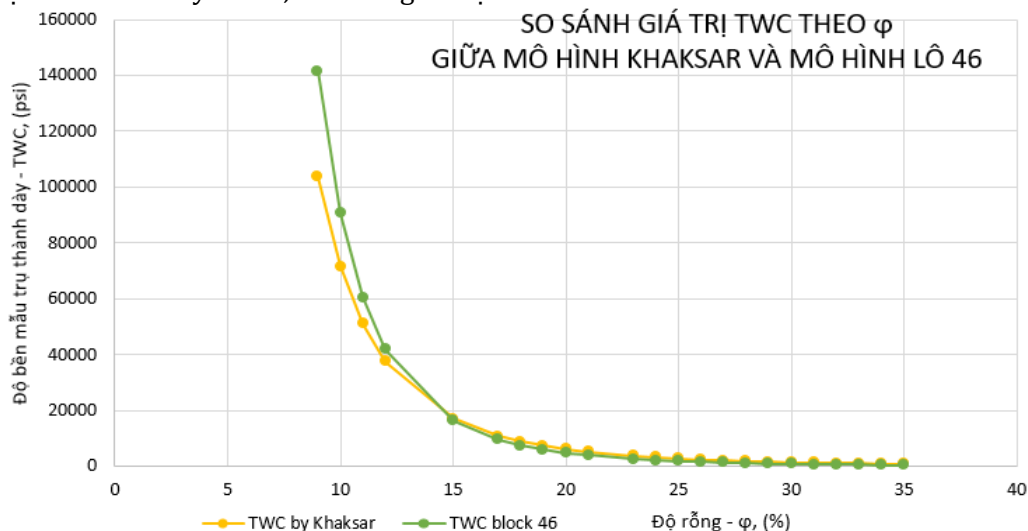
số a (5,315 và 20,62) và số mũ b (-4,232 và -3,54) khác nhau đáng kể, phản ánh sự khác biệt về đặc tính địa chất và phạm vi dữ liệu dùng để xây dựng mỗi mô hình. Hình 3 cho thấy xu hướng của giá trị TWC theo ϕ với các giá trị khác nhau được tính toán theo công thức do Khaksar đề xuất và công thức thực nghiệm của lô 46.

Dưới đây, sự khác biệt về hệ số, xu hướng quan hệ, phạm vi áp dụng và sai số giữa hai mô hình sẽ được phân tích chi tiết, đồng thời đánh giá hiệu lực của hệ số được đưa ra với các mẫu đất đá cát kết trong lô 46 và đánh giá với các thông số trong các mô hình khác (đặc biệt về tính thực tiễn khi áp dụng cho cát kết ở bể Malay - Thổ Chu). Cuối cùng, các ưu điểm và hạn chế của mô hình địa phương so với mô hình tổng quát của Khaksar sẽ được làm rõ.

Hệ số và số mũ

Hệ số quan hệ của cát kết trong lô 46 có hệ số a = 5,315 nhỏ hơn nhiều so với a = 20,62 theo đề xuất của Khaksar và nnk. (2009), nhưng ngược lại số mũ tuyệt đối lớn hơn (4,232 so với 3,54). Điều này có nghĩa là tương quan của TWC và độ rỗng trong lô 46 dốc hơn, tức TWC giảm nhanh hơn khi ϕ tăng so với hệ số do Khaksar và nnk. (2009) đưa ra. Theo xu hướng của 2 đồ thị tại các giá trị về độ rỗng khác nhau có thể đánh giá so sánh định lượng:

- $\phi = 20\%$: công thức thực nghiệm lô 46 dự báo TWC ≈ 4825 psi, thấp hơn so với ≈ 6147 psi từ công thức Khaksar và nnk. (2009).



Hình 3. So sánh đường cong quan hệ TWC - ϕ giữa mô hình lô 46 (xanh) và mô hình Khaksar.

- $\phi = 25\%$: chênh lệch rõ hơn: giá trị của TWC cho khoảng 1.877 psi, chỉ bằng $\sim 67\%$ so với 2.790 psi của phương trình do Khaksar và nnk. (2009) đề xuất.

Tuy nhiên, ở độ rỗng thấp hơn ($\sim 15\%$) thì chiều ngược lại - mô hình tương quan của lô 46 dự báo TWC cao hơn Khaksar (~ 16.300 psi vs 17.000 psi ở 15% là gần bằng).

Trục tung là TWC dự đoán (PSI), trục hoành là độ rỗng ϕ (%). Có thể thấy đường cong lô 46 dốc hơn: tại vùng rỗng cao ($> 15 \div 20\%$), mô hình lô 46 cho giá trị TWC thấp hơn đáng kể so với đường cong được xây dựng bởi phương trình do Khaksar và nnk. (2009) đề xuất, còn ở vùng rỗng thấp ($< \sim 14\%$), mô hình lô 46 lại cho TWC lớn hơn.

Xu hướng quan hệ

Cả hai mô hình đều biểu diễn một quan hệ hàm lũy thừa âm (TWC giảm phi tuyến khi ϕ tăng). Sự khác biệt chính là độ nhạy đối với thay đổi ϕ : mô hình lô 46 có độ nhạy cao hơn - chỉ cần tăng ϕ một lượng nhỏ, TWC giảm mạnh hơn so với dự báo của Khaksar. Ví dụ, tăng độ rỗng từ 20% lên 25% (tăng 5%): lô 46 giảm TWC từ $\sim 4825 \div 1877$ psi (giảm $\sim 60\%$), trong khi Khaksar giảm từ $\sim 6147 \div 2790$ psi (giảm $\sim 55\%$). Độ chênh lệch này tuy không quá lớn ở khoảng ϕ trung bình, nhưng càng về hai đầu dải ϕ thì sai khác càng rõ:

Ở ϕ rất cao ($\sim 30\%$): Đá cát kết gần như vỡ rời, hệ số thực nghiệm của lô 46 cho TWC ~ 870 psi - cực thấp, trong khi Khaksar vẫn dự báo ~ 1463 psi. Như vậy mô hình lô 46 dự đoán xu hướng kém bền hơn cho đá rất rỗng, thể hiện đặc tính địa phương là kết cấu hạt rất yếu khi độ rỗng vượt $25 \div 30\%$ (ví dụ đá cát kết tuổi trẻ chưa được ximăng hóa nhiều).

Ở ϕ rất thấp ($\sim 10\%$): Ngoài khoảng dữ liệu thực tế của Miocen (vì đá Miocen hiếm khi có độ rỗng $10 \div 12\%$ do chưa đủ nén ép sâu), mô hình lô 46 về xu thế TWC tăng vọt (theo hàm $\phi^{-4,232}$, $TWC \rightarrow \infty$ khi $\phi \rightarrow 0$). Khaksar cũng tăng nhanh nhưng chậm hơn. Tại 10% , hệ số thực nghiệm của lô 46 dự báo ~ 141.625 psi so với ~ 103.800 psi như công thức của Khaksar. Đây là hệ quả ngoại suy do dạng hàm lũy thừa; trên thực tế các đá cát kết rất chặt thường có sức bền giới hạn bởi cấu trúc xi măng hóa (khó đạt đến hàng trăm nghìn psi trừ phi đá biến chất). Khaksar với số mũ nhỏ hơn đã giảm thiểu sự ngoại suy phi thực tế này.

Tóm lại, xu hướng cả hai mô hình đều hợp lý trong khoảng $15 \div 30\%$ độ rỗng (đặc trưng cho cát kết trẻ) - TWC giảm nhanh khi ϕ tăng. Hệ số lô 46 thể hiện độ dốc quan hệ cao hơn, phản ánh đá cát kết ở lô 46 rất nhạy cảm với độ rỗng (cứ tăng rỗng thì sức bền giảm mạnh hơn trung bình). Ngược lại, mô hình Khaksar mang tính tổng quát cho "cát kết kém bền" nói chung nên ít dốc hơn, phản ánh xu hướng trung bình cho nhiều đá cát kết trẻ ở các bể khác nhau.

4. Thảo luận

4.1. Hiệu lực và phạm vi áp dụng của mô hình thực nghiệm lô

Mô hình $TWC = 5,315 \times \phi^{-4,232}$ được xây dựng từ dữ liệu thực nghiệm đặc trưng cho tầng chứa cát kết Miocene ở bể Malay - Thổ Chu, thể hiện rõ ảnh hưởng mạnh của độ rỗng tới độ bền sập lở. Với hệ số lũy thừa cao ($b = -4,232$), mô hình này cho thấy đá trong khu vực có cấu trúc rời, xi măng yếu - đặc trưng bởi sự phụ thuộc phi tuyến mạnh của cường độ vào độ rỗng.

Tuy nhiên, như mọi mô hình thực nghiệm, hiệu lực của công thức này chỉ đảm bảo trong phạm vi dữ liệu hiệu chỉnh - cụ thể là độ rỗng từ $17 \div 28\%$. Ngoài khoảng này, nhất là ở vùng $\phi < 12\%$ hoặc $> 30\%$, mô hình có thể dự báo sai lệch lớn, do bản chất hàm mũ khiến giá trị TWC tăng/giảm rất nhanh.

So sánh với mô hình tổng quát do Khaksar đề xuất ($TWC = 20,62 \times \phi^{-3,54}$), có thể thấy mô hình lô 46 cho độ dốc (độ nhạy) cao hơn, phản ánh đặc điểm cổ kết yếu và nhạy cảm độ rỗng của đá Miocene tại khu vực nghiên cứu. Điều này phản ánh đặc điểm địa chất đặc thù của đất đá và môi trường trầm tích đặc thù trong lô 46. Theo Hoàng và nnk. (2019), các đặc điểm địa chất của cát kết lô 46 - bao gồm thành phần khoáng vật chủ yếu là thạch anh ($> 90\%$), xi măng canxi cacbonat yếu, và cấu trúc rỗng liên hạt - cho thấy loại đá này có mức độ cổ kết thấp và nhạy cảm với thay đổi độ rỗng. Xi măng chủ yếu là canxi cacbonat vi tinh thể (micrite) với hàm lượng thấp ($\sim < 5\%$) và phân bố không liên tục. Điều này cho thấy liên kết giữa các hạt cát chủ yếu là tiếp xúc hạt-hạt (grain-contact) thay vì liên kết hóa học. Do đó, việc hệ số mũ trong công thức TWC đạt tới $-4,232$ khiến dạng đồ thị có dạng dốc hơn so với phương trình tổng quát là hợp lý và phản ánh đúng bản chất cơ học của tầng

chứa theo Ajdukiewicz & Lander (2010). Trong khi mô hình Khaksar phù hợp cho phạm vi rỗng cao hơn ($20 \div 35\%$) và các đá có mức xi măng tốt hơn hoặc có tính trầm tích đa dạng hơn, mô hình lô 46 phù hợp hơn cho tầng chứa địa phương, cho sai số nội bộ thấp và phản ánh đúng đặc điểm vi địa chất.

4.2. So sánh với các mô hình thực nghiệm đã công bố

Hiệu lực (validity): Trong bối cảnh các mô hình địa cơ khác, công thức $TWC = 5,315 \times \phi - 4,232$ tỏ ra phù hợp với đặc thù địa chất khu vực Malay - Thổ Chu. Bể Malay - Thổ Chu có lịch sử chôn vùi phức tạp, nhưng các tầng cát kết thường có độ rỗng và độ thấm cao do mức độ nén ép vừa phải, xi măng chủ yếu là canxi cacbonat yếu và một phần thạch anh (như minh chứng: $\phi \sim 19 \div 32\%$, độ thấm ~ vài trăm mD. Công thức thực nghiệm từ lô 46 tương thích xu hướng của các nghiên cứu quốc tế. McNally (1987), Vernik (1993), và Khaksar và nnk. (2010, 2018) đều chỉ ra mối quan hệ nghịch biến giữa độ rỗng và cường độ, đa phần dưới dạng hàm mũ. Điểm khác biệt là hệ số và số mũ được điều chỉnh để phù hợp với từng điều kiện địa chất cụ thể.

So sánh với mô hình của Asadi và nnk. (2017) - được áp dụng cho đá carbonate có độ rỗng cao ở bể Nam Côn Sơn với công thức $TWC = 31022 \times \phi^{0,972}$ - ta thấy xu hướng ngược: TWC tăng theo độ rỗng. Điều này cho thấy không thể sử dụng cùng một công thức cho các lithology khác nhau, và khẳng định vai trò cần thiết của mô hình hóa riêng cho từng khu vực.

Về định lượng, mô hình lô 46 kiểm chứng tốt tính hiệu lực khi so sánh với các mô hình khác: ví dụ, Vernik (1993) từng đưa công thức $UCS = 254 \cdot (1 - 2,7\phi)^2$ cho cát kết sạch, xi măng tốt $\phi < 0,3$. Nếu chuyển đổi tương đương (thành dạng TWC hoặc UCS), mô hình Vernik (1993) sẽ cho sức bền rất cao ở ϕ thấp - phù hợp đá rần.

Ngược lại, Chang và nnk. (2006) đưa công thức $UCS = 277 \times e^{(-10\phi)}$ cho cát kết $0 < \phi < 0,33$ đủ mọi độ bền, hàm ý mối quan hệ trung bình. Trong phổ đó, mô hình hệ số áp dụng cho lô 46 có thiên hướng nhạy đối với độ rỗng cao như mô hình Chang, và có xu hướng tiệm cận như mô hình của Vernik (1993) với độ rỗng cực thấp. Sự liên tục này củng cố rằng mô hình lô 46 không mâu thuẫn với xu hướng chung đã công bố, mà chỉ tinh

chỉnh cho phù hợp phạm vi hẹp: đá cát kết Miocene cổ kết vừa tới yếu. Mặt khác, Khaksar sử dụng công thức $\phi - 3,54$ chính là một trong các mô hình mà Chang và nnk. (2006) liệt kê cho cát kết yếu (mức độ tương tự hàm $e^{(-10\phi)}$) nói trên). Trong một nghiên cứu khác tương tự, Asadi và nnk. (2017) cũng sử dụng mô hình $TWC = 31022 \times \phi^{0,972}$ nhưng cần phải được kết hợp với các thông số khác và có độ chính xác chưa cao, ngoài ra đây là hệ số áp dụng cho khu vực bể Nam Côn Sơn. Do vậy, mô hình lô 46 có thể được xem là phiên bản điều chỉnh chính xác hơn của mô hình Khaksar, dành riêng cho lô 46.

4.3 Ưu điểm, hạn chế của công thức thực nghiệm lô 46

4.3.1. Ưu điểm của mô hình lô 46

Độ chính xác cao trong phạm vi hẹp: Mô hình khớp đúng dữ liệu địa phương nên phản ánh sát thực tế của tầng chứa lô 46, cho kết quả tin cậy hơn mô hình tổng quát khi áp cho cùng khu vực đó (sai số nhỏ hơn, dự báo có ít sai số hơn).

Độ nhạy với đặc trưng địa chất: Hệ số và số mũ được hiệu chỉnh cho thấy đặc điểm riêng (như xi măng kém, hạt rời) của đá cát kết lô 46. Điều này giúp phân biệt tầng này với các tầng khác - ví dụ cho thấy lô 46 yếu hơn đáng kể so với cát kết chung khi độ rỗng tăng cao. Đây là thông tin quý giá cho thiết kế khai thác (dự báo sinh cát, xây dựng đường cong ổn định thành giếng).

Tính ứng dụng thực tiễn tại chỗ: Mô hình đơn giản (hàm mũ của độ rỗng) dễ tích hợp vào mô hình địa cơ của mỏ, phục vụ tính toán áp suất giới hạn sinh cát, lựa chọn tỉ trọng dung dịch khoan phù hợp,... tại lô 46. Vì là mô hình được xây dựng cho mỏ và đặc trưng khu vực bể Malay - Thổ Chu nên ít phải hiệu chỉnh thêm, tiết kiệm thời gian khi xây dựng và đánh giá mô hình.

4.3.2. Hạn chế của mô hình khu vực

Thiếu tính tổng quát: Như đã nhận xét ở trên, mô hình lô 46 chỉ đảm bảo cho đá lô 46 và rộng hơn là bể Malay - Thổ Chu.

5. Kết luận

Công thức thực nghiệm $TWC = 5,315 \times \phi - 4,232$ cho thấy độ tương thích cao dữ liệu thực nghiệm từ khu vực lô 46. Việc sử dụng công thức này giúp nhanh chóng ước lượng TWC từ dữ liệu log giếng,

phục vụ đánh giá nguy cơ sinh cát hiệu quả hơn mà không cần phụ thuộc hoàn toàn vào thí nghiệm vật lý.

Mô hình lô 46 với dạng $TWC = 5,315 \times \phi^{-4,232}$ có hệ số và số mũ riêng phù hợp với đá cát kết Miocen tại chỗ, do đó cho độ chính xác cao và phản ánh đúng xu hướng địa phương (TWC giảm rất mạnh khi ϕ tăng). Tuy nhiên, nó kém tổng quát và cần thận trọng khi áp dụng ngoài phạm vi thiết kế (dễ sai lệch lớn nếu ngoại suy).

Trong bối cảnh các tầng cát kết Miocen bể Malay - Thổ Chu, mô hình lô 46 được đánh giá hiệu lực tốt và đáng tin cậy nếu sử dụng đúng cho loại đá mà nó mô tả. Nó giúp hiểu rõ hơn đặc tính cơ học riêng của tầng chứa (ràng đá rất yếu khi rỗng tăng cao) - điều mà mô hình tổng quát sẽ thể hiện không chính xác.

Tóm lại, mô hình khu vực và mô hình tổng quát có vai trò bổ trợ nhau. Mô hình khu vực (như lô 46) vượt trội về chi tiết và độ chính xác trong phạm vi hẹp.

Vì lý do hạn chế trong khối lượng mẫu, nghiên cứu này được định hướng như một nghiên cứu tiền đề - xây dựng mô hình đặc trưng cho lô 46, dựa trên dữ liệu hiện có. Trong các nghiên cứu tiếp theo, các mẫu lõi của các giếng trong khu vực sẽ được thu thập thêm để đánh giá phân tích cũng như mô hình cũng sẽ được kiểm nghiệm với các phương pháp hồi quy khác như hồi quy robust hoặc Bayesian regression nhằm kiểm tra độ nhạy và đánh giá lại các hệ số thực nghiệm với độ tin cậy thống kê cao hơn

Đóng góp của các tác giả

Trần Anh Quân - khảo sát, thu thập, phương pháp luận, phân tích dữ liệu, viết bản thảo bài báo; Nguyễn Thế Vinh - kiểm chứng, phân tích dữ liệu, đánh giá và chỉnh sửa.

Tài liệu tham khảo

- Ahad, N. A., Abu Bakar, M. Z., & Zakaria, M. (2020). *Experimental investigation and prediction of sanding potential in high porosity sandstone reservoirs*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 187, 106805. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106805>.
- Ajdukiewicz, J. M., & Lander, R. H. (2010). *Sandstone reservoir quality prediction: The state of the art*. AAPG Bulletin, 94(8), 1083-

1094. <https://doi.org/10.1306/04211009178>.

- Asadi, M. S., Khaksar, A., Nguyen, H. Q., & Manapov, T. F. (2017, October). *Solids production prediction and management in a high porosity carbonate reservoir-A case study from offshore Vietnam*. SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia. <https://doi.org/10.2118/186273-MS>.
- Chang, C., Zoback, M. D., & Khaksar, A. (2006). *Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 51(3-4), 223-237. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2006.01.003>.
- Hoàng A. T., Trịnh X. C., Nguyễn T. H. (2019). *Đặc điểm thạch học và thành phần vật chất hữu cơ trong đá móng nứt nẻ vùng Đông Bắc bể Malay-Thổ Chu*. Tạp chí Dầu khí, (4), 25-36.
- Hoang, S. K., Trinh, V. X., Tran, T. V., & Dang, T. A. (2017, October). *Comprehensive sanding study from laboratory experiments, modeling, field implementation, to real-time monitoring, a case study for Hai Thạch and Moc Tinh fields, offshore Vietnam*. In SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition (p. D011S031R003). SPE.
- Khaksar, A., Griffiths, C. M., & Rafiee, M. (2018). *A Comprehensive Review of Sanding Prediction Models and Field Applications*. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 52, 379-400.
- Khaksar, A., Griffiths, C. M., & Zhang, Y. (2010). *Rock strength from core and logs: where we stand and ways to go*. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. <https://doi.org/10.2118/130984-MS>.
- Khaksar, A., Gui, F., Younessi, A., & Asadi, S. (2019). *Thick-wall cylinder strength and critical strain limit from core tests and well logs: Implications for sand control decisions*. Presented at the SPWLA 60th Annual Logging Symposium, The Woodlands, TX. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
- Khaksar, A., Taylor, P. G., Fang, Z., Kayes, T. J., Salazar, A., & Rahman, K. (2009). *Rock strength from core and logs: Where we stand and ways to*

- go. Paper SPE-121972-MS presented at the SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands.
- McNally, G. H. (1987). Estimation of coal measures rock strength using sonic and neutron-neutron logs. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 24(6), 417-426. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(87\)90008-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(87)90008-1).
- Morita, N., Black, A. D., & Fuh, G. F. (1990). *Borehole stability analysis considering linear and nonlinear rock behavior*. SPE Drilling Engineering, 5(04), 303-310. <https://doi.org/10.2118/16664-PA>.
- Motulsky, H & Christopoulos H. (2004) *Fitting Models to Biological Data Using Linear and Nonlinear Regression: A practical guide to curve fitting*. Oxford University Press.
- Santarelli, F. J., Giacca, D., & Brignoli, M. (1997, June). *Sand production: From prediction to management* (SPE-38185-MS). SPE European Formation Damage Conference, The Hague, Netherlands. <https://doi.org/10.2118/38185-MS>.
- Vernik, L. (1993). *Predicting sandstone porosity from acoustic velocities*. Geophysics, 58(8), 1164-1170. <https://doi.org/10.1190/1.1443512>.
- Willson, S. M., Moschovidis, Z. A., Cameron, J. R., & Palmer, I. D. (2002, October). New model for predicting the rate of sand production. In *SPE/ISRM rock mechanics conference* (pp. SPE-78168). SPE.