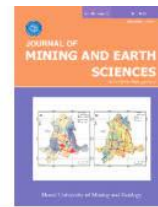




## Journal of Mining and Earth Sciences

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



# Method of porosity estimation from scanning electron microscopy images



Hiep Huu Nguyen\*, Luc The Trinh, Bac Hoang Bui

Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 26<sup>th</sup> Feb. 2025

Revised 12<sup>th</sup> May 2025

Accepted 19<sup>th</sup> May 2025

#### Keywords:

Micropore system,  
Physical properties,  
Porosity,  
Sandstone,  
Scanning electron microscopy.

### ABSTRACT

Scanning electron microscopy can now produce high-resolution surface images, which are powerful tools for analyzing the structure of materials. Many software programs have been used by scientists to interpret scanning electron microscopy images to accurately interpret material structures. The collected images are a rich source of information on factors such as porosity, size, and shape of the grain structure, and these factors are visually interpreted. Additional quantitative data can be accessed through image analysis applications. The research team used backscattered electron (BSE) images, collected from polished cross-sections of five sandstone samples from different areas, including two sandstone samples from Bach Ho field and three samples from sandstone formations along national highways in Lang Son and Bac Giang. Scanned electron images were collected on FEI's Quanta450 device, processed in grids using image analysis software (ImageJ). The results of porosity interpretation were compared with the Helium expansion method on Corelab equipment at the Center for Analysis and High-Tech Experiments – Hanoi University of Mining and Geology, thereby determining the correlation between the two methods and demonstrating the superiority of the SEM image interpretation method in estimating nano porosity compared to other methods.

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

\*Corresponding author

E - mail: [nguyenhuuhiep@humg.edu.vn](mailto:nguyenhuuhiep@humg.edu.vn)

DOI: 10.46326/JMES.2025.66(3).07



## Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

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

# Nghiên cứu ứng dụng phương pháp xác định độ rỗng của vật liệu từ ảnh chụp hiển vi điện tử quét

Nguyễn Hữu Hiệp\*, Trịnh Thế Lực, Bùi Hoàng Bắc

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

### THÔNG TIN BÀI BÁO

### TÓM TẮT

#### Quá trình:

Nhận bài 26/02/2025

Sửa xong 12/5/2025

Chấp nhận đăng 19/5/2025

#### Từ khóa:

Ảnh hiển vi điện tử quét,

Cát kết,

Độ rỗng,

Hệ vi lỗ rỗng,

Thạch vật lý.

Kính hiển vi điện tử quét hiện có thể tạo ra ảnh bề mặt với độ phân giải cao là công cụ hữu hiệu trong việc phân tích cấu trúc của vật liệu. Nhiều phần mềm đã được các nhà khoa học sử dụng để phân tích ảnh hiển vi điện tử quét cho ra các kết quả về cấu trúc đáng tin cậy. Hình ảnh được thu thập là nguồn thông tin phong phú về các yếu tố như độ rỗng (tính xốp) kích thước, hình dạng cấu trúc hạt được diễn giải trực quan. Có thể truy cập dữ liệu định lượng bổ sung thông qua ứng dụng phân tích hình ảnh. Nhóm nghiên cứu sử dụng hình ảnh điện tử tán xạ ngược (BSE), thu thập từ mặt cắt ngang được đánh bóng của năm mẫu cát kết tại nhiều khu vực khác nhau trong đó 2 mẫu cát kết của mỏ Bạch Hổ và 3 mẫu từ các thành hệ cát kết ven quốc lộ thuộc Lạng Sơn, Bắc Giang. Ảnh điện tử quét được thu thập trên thiết bị Quanta450 của hãng FEI, được xử lý theo lưới bằng phần mềm phân tích hình ảnh (ImageJ). Kết quả minh giải độ rỗng được so sánh với phương pháp giãn khí Helium trên thiết bị của hãng Corelab tại Trung tâm Phân tích, Thí nghiệm Công nghệ cao – Trường Đại học Mỏ - Địa chất từ đó xác định được tương quan giữa hai phương pháp và thể hiện được khả năng vượt trội của phương pháp minh giải ảnh SEM với ước lượng độ rỗng ở cấp độ nano so với các phương pháp khác.

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

\*Tác giả liên hệ

E - mail: [nguyenhuuhip@humg.edu.vn](mailto:nguyenhuuhip@humg.edu.vn)

DOI: 10.46326/JMES.2025.66(3).07

## 1. Mở đầu

Độ rỗng là một trong các tính chất thạch vật lý của đất đá cũng như của vật liệu. Kích thước lỗ rỗng là thông số đặc trưng cho đường kính hoặc kích thước đặc trưng của các khoảng trống giữa các vật liệu rắn và có thể được xác định theo nhiều phương pháp khác nhau (Paul Glover, 2021) bao gồm: phép đo độ rỗng thủy ngân xâm nhập, giãn khí Helium, phân tích hình ảnh và chụp cắt lớp vi tính,... mỗi phương pháp đều cung cấp thông tin chi tiết về kích thước, sự phân bố và khả năng kết nối của lỗ rỗng. Nếu phân chia theo phương thức đo đạc thì có thể chia các phương pháp xác định độ rỗng theo 3 loại: xác định trực tiếp (thủy ngân xâm nhập, giãn khí Helium,...); phân tích hình ảnh (CT scan, kính hiển vi, SEM, TEM,...); đo địa vật lý giếng khoan.

Đối với mỗi ngành khoa học khác nhau lại sử dụng một phương pháp phù hợp với mục tiêu nghiên cứu của nhánh nghiên cứu đó. Như các nhà địa chất dầu khí sử dụng đặc tính rỗng thấm để đánh giá khả năng chứa, chắn khả năng sinh và khai thác dầu khí của các tập trầm tích trong hệ thống dầu khí do đó phương pháp tối ưu để đo độ thấm là giãn khí Helium (Yangfan và nnk., 2015; Man và nnk., 2021). Đối với chuyên ngành y sinh phương pháp CT scan được sử dụng để đánh giá mật độ xương và các khuyết tật nếu có (Palacio-Mancheno và nnk., 2014). Với chuyên ngành nghiên cứu vật liệu độ rỗng được xác định qua phân tích hình ảnh hiển vi hoặc hiển vi phân cực (SEM) (Marin, 2017).

Phương pháp minh giải hình ảnh điện tử quét SEM (TEM) (Echlin, 2005) tạo ra một bước đột phá trong việc nghiên cứu vi cấu trúc cũng như vi lỗ rỗng của vật liệu mà các phương pháp khác không thể xác định được. Với những phương pháp xác định trực tiếp như thủy ngân xâm nhập, giãn khí Helium chỉ xác định được các lỗ rỗng liên thông, các bao thể hay lỗ rỗng không liên thông không được xác định. Với những phương pháp vật lý (CT scan, Nơ tron,...) lại hạn chế về dải đo từ mm – micron.

## 2. Phương pháp phân tích và mẫu

### 2.1. Mẫu

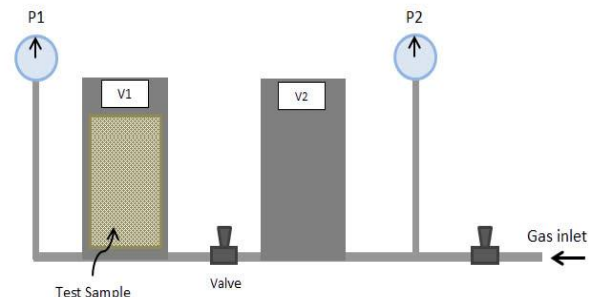
05 mẫu cát kết và cát pha sét tại nhiều khu vực khác nhau trong đó 2 mẫu cát kết của mỏ Bạch Hổ và 3 mẫu từ các thành hệ ven quốc lộ thuộc Lạng Sơn, Bắc Giang được gia công khoan rút lõi với lưới khoan 1 inch tạo thành mẫu lõi hình trụ với đường

kính 1 inch để phân tích độ rỗng theo phương pháp giãn khí Helium. Mẫu sau đó được cắt một miếng nhỏ làm mẫu mặt cắt. Mẫu này được gia công đánh bóng bề mặt, sấy khô, phủ carbon bề mặt để phân tích hiển vi điện tử quét SEM tại Trung tâm Phân tích, Thí nghiệm Công nghệ cao – Trường Đại học Mỏ - Địa chất.

### 2.2. Phương pháp phân tích

Hai phương pháp đo độ rỗng: phương pháp giãn khí Helium và phương pháp minh giải ảnh hiển vi điện tử quét SEM được sử dụng để xác định độ rỗng của 5 mẫu cát kết tại các vùng khác nhau các thành hệ địa chất khác nhau trong đó có 1 mẫu cát pha sét để có thể so sánh được sự khác biệt giữa các phương pháp. Cả hai phương pháp đều được nhóm tác giả thực hiện tại Trung tâm Phân tích, Thí nghiệm Công nghệ cao - Trường Đại học Mỏ - Địa chất.

Phương pháp giãn khí Helium (Paul Glover, 2021): dựa trên định luật khí lý tưởng, hay đúng hơn là định luật Boyle. Mẫu lõi hình trụ được niêm phong trong một cốc mẫu có thể tích đã biết  $V_1$  ở áp suất khí quyển  $P_1$  (Hình 1).



(A)



(B)

Hình 1. A: Sơ đồ cấu tạo; B: thiết bị xác định độ rỗng Pore 200 – Corelab.

Cốc mẫu này được nối bằng một van với một cốc thực nghiệm có thể tích đã biết,  $V_2$  (tạo thành 1 hệ kín), chứa khí ở áp suất đã biết,  $P_2$ . Khi van nối hai thể tích được mở từ từ để hệ thống duy trì đẳng nhiệt, áp suất khí trong hai thể tích bằng với  $P_3$ . Giá trị của áp suất cân bằng có thể được sử dụng để tính thể tích hạt (thể tích chặt xít) trong đá  $V_s$ . Định luật Boyle nêu rằng áp suất nhân với thể tích đối với một hệ kín là hằng số. Do đó, chúng ta có thể viết PV cho hệ thống trước khi van được mở (bên trái của công thức (1) và đặt nó bằng PV đối với hệ thống cân bằng (bên phải của công thức (1)):

$$P_1(V_1 - V_s) + P_2V_2 = P_3(V_1 + V_2 - V_s) \quad (1)$$

Xác định thể tích hạt  $V_s$

$$V_s = \frac{P_1V_1 + P_2V_2 - P_3(V_1 - V_2)}{(P_1 - P_2)} \quad (2)$$

Phương pháp phân tích ảnh hiển vi điện tử quét. Ảnh hiển vi điện tử quét SEM được chụp với nhiều độ phóng đại khác nhau bằng thiết bị Quanta450 của hãng Fei (Hình 2). Ảnh hiển vi điện tử quét được thu thập trên cùng một điều kiện áp suất chân không cao với độ phóng đại lần lượt 30 – 50 – 120 – 1.000 – 5.000 lần; Mức năng lượng sử dụng: 20.0 Kv; Đầu dò: CBS. Ảnh hiển vi điện tử quét SEM được xử lý trên phần mềm ImageJ chuyển đổi các điểm ảnh theo thang độ xám 8 bit,



(A)

(B)

Hình 2. A: Kính hiển vi điện tử quét Quanta450.  
B: Phần mềm minh giải ảnh.

thang độ xám có giá trị nguyên từ 0 đến 255. Nhận diện vùng tối vùng trắng trên ảnh cũng như những vùng phản xạ mạnh độ sáng cao. Đặt giá trị ngưỡng độ xám cho độ rỗng theo hình ảnh trực quan trên phần mềm. Độ rỗng được lấy từ các điểm ảnh tối theo ngưỡng này. Sau đó, hình ảnh được quét để tìm các điểm ảnh tối. Khi tìm thấy một điểm ảnh, tất cả các điểm ảnh tối liền kề được đánh dấu là lỗ rỗng. Lỗ rỗng có thể có bất kỳ hình dạng nào và không chỉ giới hạn ở một lỗ tròn. Diện tích lỗ rỗng được xác định bằng cách đếm số điểm ảnh trong một vùng. Kích thước lỗ rỗng được xác định là diện tích pixel được quét.

Đánh giá độ chính xác của phương pháp phân tích ảnh hiển vi điện tử quét

Để đánh giá độ chính xác của phương pháp nhóm đã xác định độ rỗng của mẫu BH18 với 6 ảnh điện tử quét khác nhau với cùng điều kiện đo được trình bày trên. Kết quả được trình bày trên Hình 3 và Bảng 1.

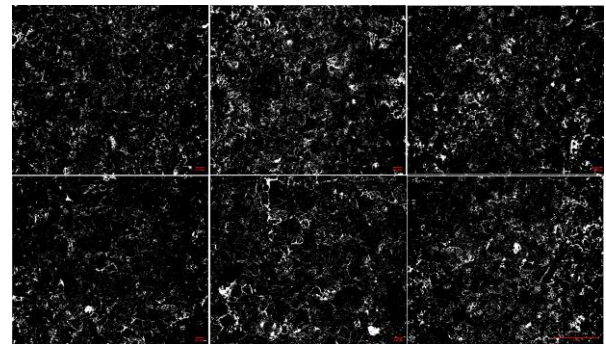
Đánh giá độ chính xác của phương pháp phân tích ảnh SEM

Giá trị trung bình:

$$\text{Mean} (\mu) = \frac{\sum_{i=0}^n x_i}{n} = 8,615$$

Khoảng giá trị (range):

$$\text{Range} = \text{Max} - \text{Min} = 1,79$$



Hình 3. Kết quả phân tích độ rỗng của mẫu BH18 với 6 ảnh khác nhau (I, II, III, IV, V, IV).

Bảng 1. Kết quả phân tích độ rỗng ảnh SEM của mẫu BH18.

| TT | Sample ID | Độ rỗng (%) |
|----|-----------|-------------|
| 1  | I         | 9.64        |
| 2  | II        | 7.85        |
| 3  | III       | 8.41        |
| 4  | IV        | 8.51        |
| 5  | V         | 8.81        |
| 6  | VI        | 8.47        |



Phương sai (variance):

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}$$

$$\sigma^2 = 0,2913$$

Độ lệch chuẩn:

$$SD = \sqrt{\sigma^2} = 0,54$$

Hệ số biến thiên:

$$CV = \left( \frac{SD}{Mean} \right) * 100\% = 6,27$$

Có thể thấy rằng với hệ số biến thiên 6,27 cho thấy mức độ dao động tương đối thấp so với giá trị trung bình. Phản ánh độ ổn định của phương pháp cao. Với giá trị  $SD = 0,54$  cho thấy độ chụm rất cao. Khoảng giá trị hẹp so với giá trị trung bình thể hiện dữ liệu tập trung của phương pháp đo. Từ các đánh

giá trên có thể nhận thấy phương pháp phân tích ảnh hiển vi điện tử quét phù hợp để minh giải độ rỗng của cát kết với mẫu tương đối đồng nhất.

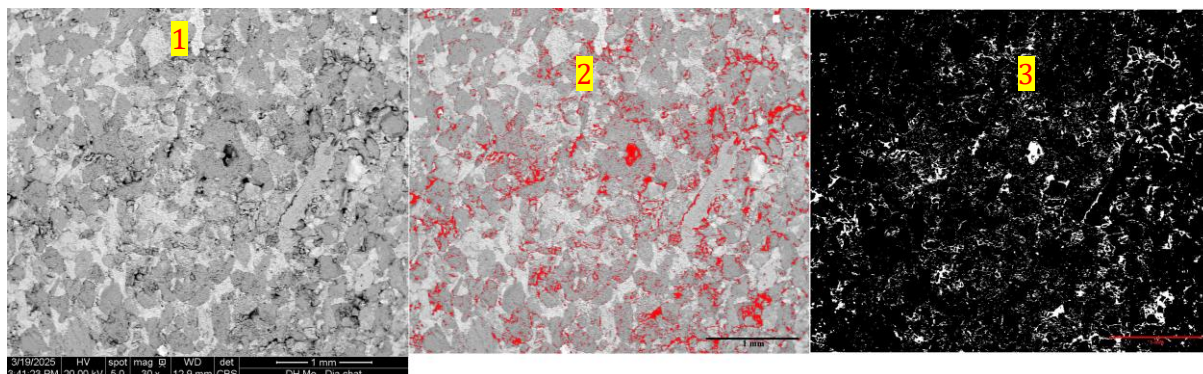
### 3. Kết quả

#### 3.1. Độ rỗng theo phương pháp minh giải ảnh hiển vi điện tử quét

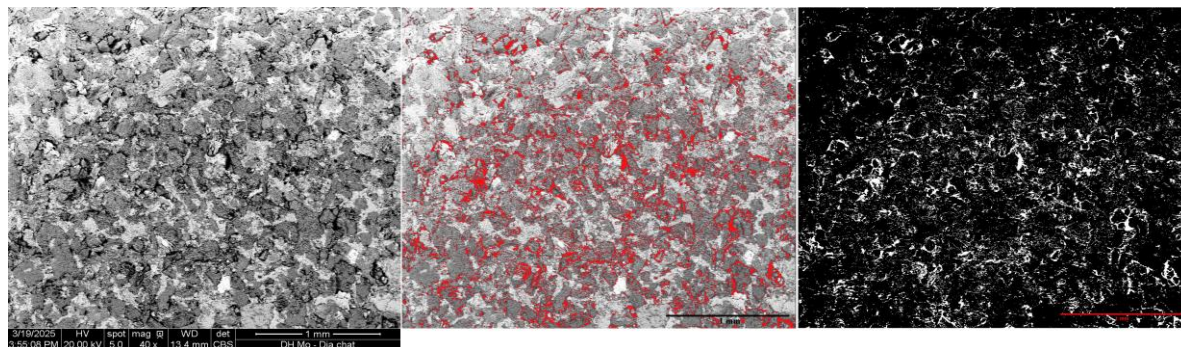
Mẫu được mài bóng sau đó được phủ carbon bề mặt để phân tích ảnh hiển vi điện tử quét SEM. Độ rỗng được xác định từ việc minh giải ảnh hiển vi điện tử quét bằng phần mềm ImageJ.

Kết quả phân tích độ rỗng của 5 mẫu cát kết được trình bày trên Hình 4.

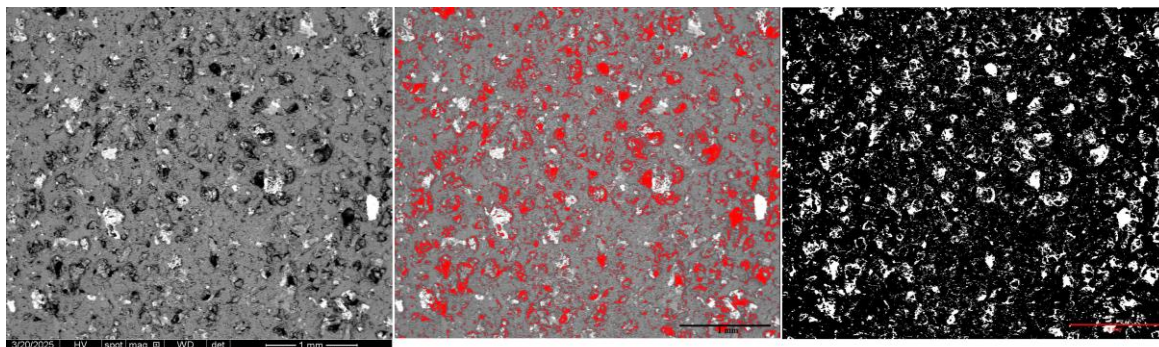
Mẫu BH18: 8,47%



Mẫu BH40: 11,77%

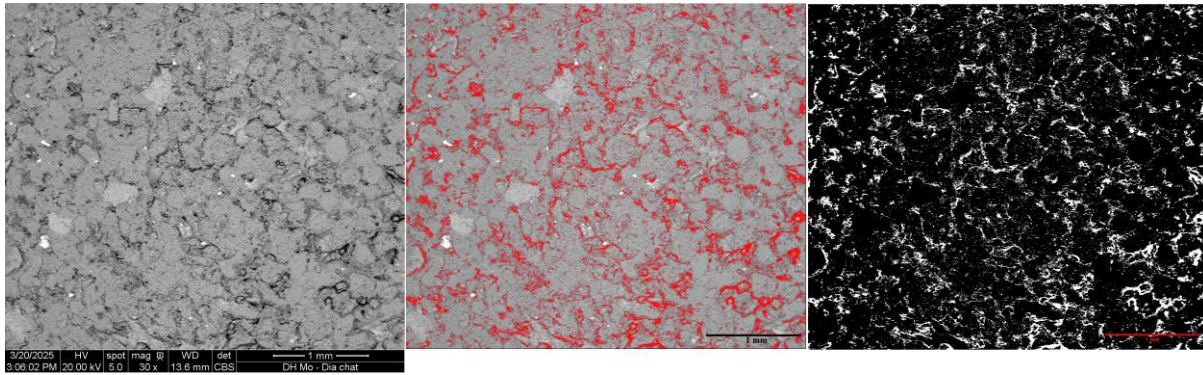


Mẫu DLR-055.233: 14,58%

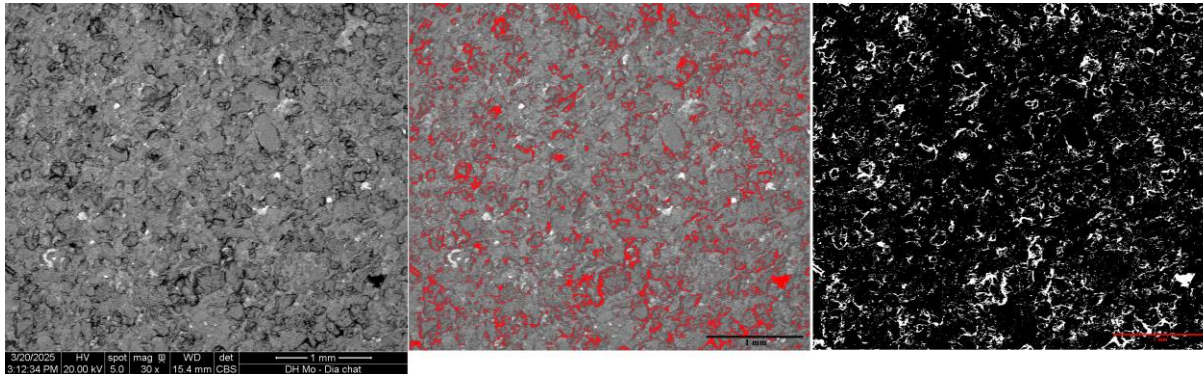




Mẫu BG.303: 11,87%



Mẫu DT.D5.LS.002: 10,22%



Hình 4. Minh giải độ rỗng trên ảnh SEM: 1: ảnh gốc; 2: nhận diện lỗ rỗng; 3: Kết quả minh giải.

### 3.2. Độ rỗng theo phương pháp giãn khí Helium

Mẫu lõi hình trụ được sấy khô trong 3 ngày tại nhiệt độ  $56 \pm 60^\circ\text{C}$  sau đó đo độ rỗng theo phương pháp giãn khí Helium trên thiết bị Pore - 200. Kết quả phân tích độ rỗng được tính toán xác định và thể hiện trên Hình 5.

### 3.3. So sánh kết quả phân tích độ rỗng

Từ kết quả so sánh độ rỗng mẫu của 2 phương pháp trên Bảng 2 và Hình 6 cho thấy độ rỗng từ phương pháp minh giải ảnh hiển vi điện tử quét

SEM có xu hướng cao hơn sơ với đo độ rỗng bằng phương pháp giãn khí Helium.

Có thể xác định hàm tương quan giữa độ rỗng theo phương pháp giãn khí Helium và phương pháp minh giải ảnh hiển vi điện tử quét theo công thức sau:

$$y = 0,9337x + 0,0636$$

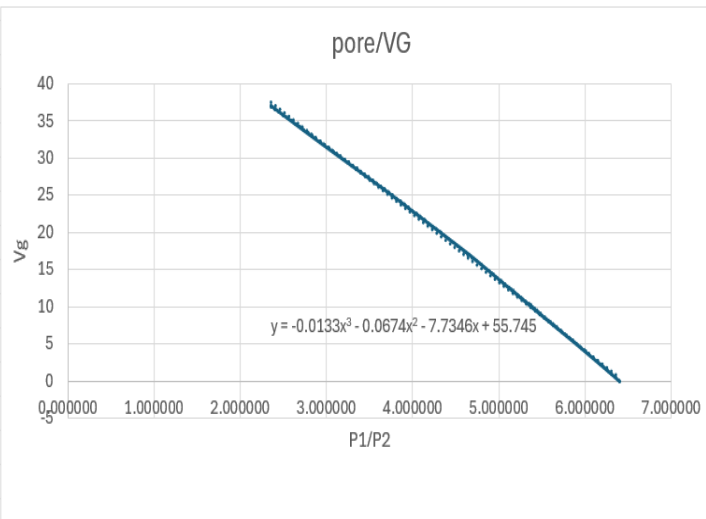
## 4. Thảo luận

### 4.1. Ứng dụng của hai phương pháp xác định độ rỗng

Bảng 2. So sánh kết quả phân tích độ rỗng của hai phương pháp.

| TT | Mẫu          | Độ rỗng theo PP phân tích ảnh SEM (%) | Độ rỗng theo PP giãn khí Helium (%) |
|----|--------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 1  | DLR-055.233  | 14.58                                 | 14.241                              |
| 2  | DT-D5.LS.002 | 10.22                                 | 9.649                               |
| 3  | BG.303       | 11.87                                 | 9.812                               |
| 4  | BH40         | 11.75                                 | 11.351                              |
| 5  | BH18         | 8.439                                 | 8.357                               |

| Calibration Table |        |                    |                   |          |
|-------------------|--------|--------------------|-------------------|----------|
| Disc              | Volume | Reference Pressure | Expanded Pressure | P1/P2    |
| No.               | cc     | psig (P1)          | psig (P2)         |          |
| empty             | 0      | 101.8              | 15.9              | 6.402516 |
| 1                 | 1.599  | 101.8              | 16.3              | 6.245399 |
| 2                 | 4.821  | 101.8              | 17.2              | 5.918605 |
| 3                 | 6.426  | 101.8              | 17.7              | 5.751412 |
| 4                 | 9.658  | 101.8              | 18.8              | 5.414894 |
| 5                 | 16.083 | 101.8              | 21.4              | 4.757009 |
| 5+1               | 17.682 | 101.8              | 22.2              | 4.585586 |
| 5+3               | 22.509 | 101.8              | 25.2              | 4.039683 |
| 5+4               | 25.741 | 101.8              | 27.7              | 3.675090 |
| 5+4+3             | 32.167 | 101.8              | 34.9              | 2.916905 |
| 5+4+3+2           | 36.987 | 101.8              | 43.1              | 2.361949 |



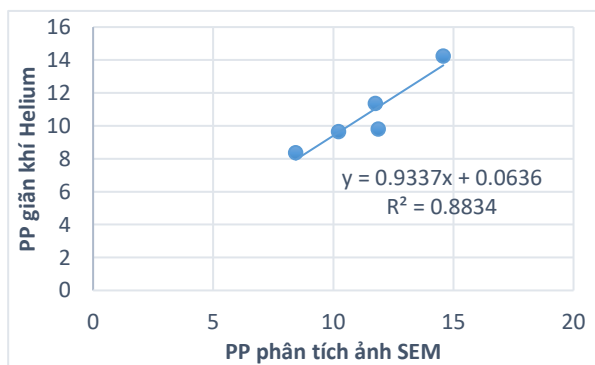
| Sample ID    | D     | r      | L     | P1    | P2   | Vb          | P1/P2 | Vg     | V.g.sample | Vr    | Phi    |
|--------------|-------|--------|-------|-------|------|-------------|-------|--------|------------|-------|--------|
| DT-05.BG.404 | 23.8  | 11.9   | 13.72 | 103.8 | 43.1 | 6.100672088 | 2.408 | 35.932 | 5.370      | 0.730 | 11.973 |
| DLR-055.233  | 24.82 | 12.41  | 18.98 | 103.7 | 41.6 | 9.178451537 | 2.493 | 35.211 | 7.871      | 1.307 | 14.241 |
| DT-D5.LS.002 | 23.87 | 11.935 | 23.05 | 103.7 | 41.3 | 10.30968567 | 2.511 | 35.056 | 9.315      | 0.995 | 9.649  |
| BG.303       | 23.6  | 11.8   | 23.24 | 103.7 | 44.3 | 10.16084406 | 2.341 | 36.504 | 9.164      | 0.997 | 9.812  |
| BH40         | 22.71 | 11.355 | 34.77 | 101.8 | 36.5 | 14.07695155 | 2.789 | 33.383 | 12.479     | 1.598 | 11.351 |
| BH18         | 22.73 | 11.365 | 35.72 | 101.8 | 33.1 | 14.48705065 | 3.076 | 30.958 | 13.276     | 1.211 | 8.357  |

Hình 5. Kết quả phân tích độ rỗng giãn khí Helium với thiết bị Pore-200 (A: Bảng thông số hiệu chuẩn thiết bị; B: biểu đồ hiệu chuẩn; C: Kết quả đo).

Từ kết quả phân tích độ rỗng của hai phương pháp cho thấy độ rỗng được tính theo phương pháp minh giải ảnh hiển vi điện tử quét thường lớn hơn so với độ rỗng theo phương pháp giãn khí Helium. Để giải thích cho sự khác biệt trên theo tập thể tác giả đó là sự khác biệt của loại độ rỗng đo cho mỗi phương pháp. Với phương pháp giãn khí

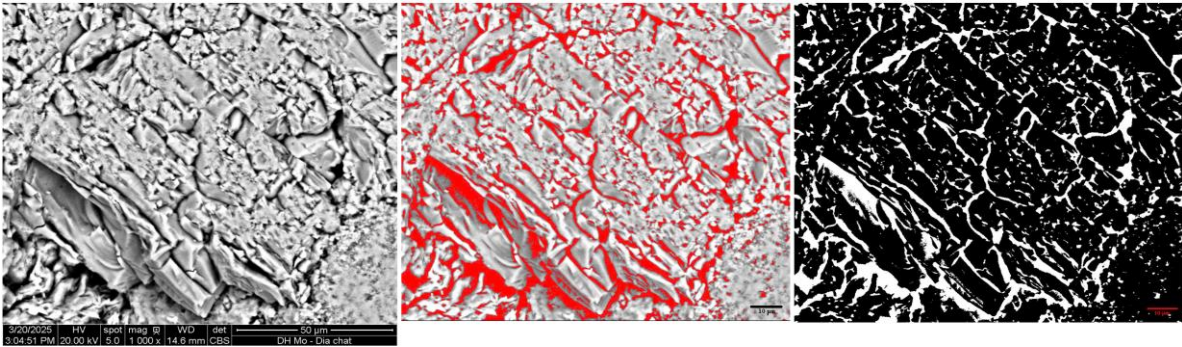
Helium độ rỗng được xác định là độ rỗng hiệu dụng tức toàn bộ hệ lỗ rỗng liên thông của mẫu. Trong khi phương pháp minh giải ảnh điện tử quét SEM xác định độ rỗng tổng: hệ lỗ rỗng liên thông và hệ lỗ rỗng không liên thông. Lỗ rỗng không liên thông có thể là các bao thể kín, độ rỗng trong hạt... các lỗ rỗng này không kết nối với mạng lỗ rỗng chính có thể thấy trên Hình 7.

Phương pháp minh giải ảnh hiển vi điện tử quét (SEM,TEM) là giải pháp hiệu quả để nghiên cứu vi cấu trúc và lỗ rỗng ở cấp độ nano đến micron đặc biệt tối ưu cho các nghiên cứu vật liệu xây dựng, địa chất, và vật liệu hấp phụ - hấp thụ - kích thước có thể vài nanomet như nghiên cứu của Curtis (2010). Đặc biệt trong giai đoạn hiện nay các mô dầu khí truyền thống trong cát kết đang cạn kiệt thì trữ lượng tài nguyên Dầu và Khí lưu trữ trong các hệ lỗ rỗng trong đá phiến được đặc biệt quan tâm (Zhang, 2019; Lu và nnk., 2024). Trên Hình 8 có thể thấy diện tích vi rỗng kích thước từ 500 nm đến 1.5 micron trong phần sét của mẫu sét pha cát là rất lớn chứng tỏ tiềm năng của đá phiến và đá phiến sét đối với dầu và khí vô cùng tốt.

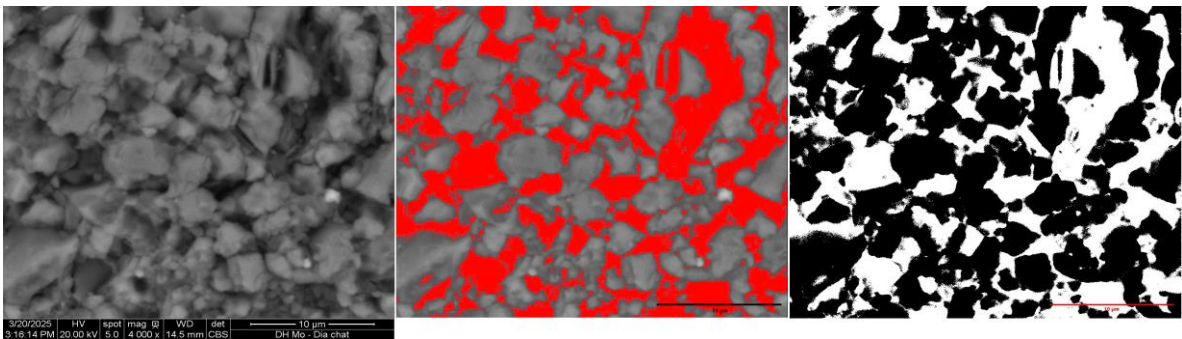


Hình 6. Biểu đồ tương quan độ rỗng cát kết theo 2 phương pháp: Trục hoành (x): Độ rỗng theo PP phân tích ảnh SEM; Trục tung (y): Độ rỗng theo PP giãn khí Helium.

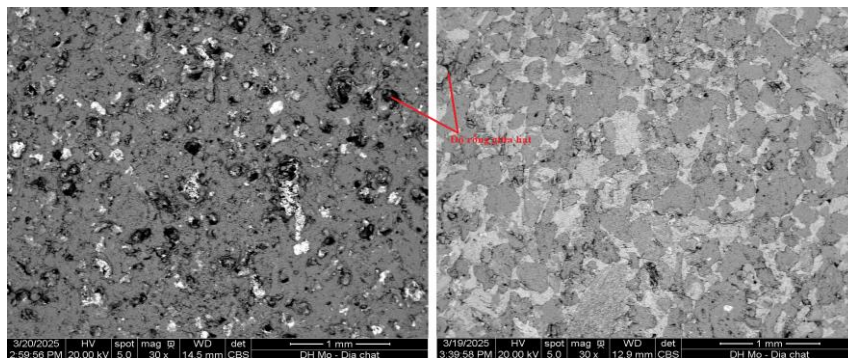




Hình 7. Độ rỗng trong hạt của 1 hạt thạch anh bị đập vỡ mẫu DLR-055.233.



Hình 8. Minh giải độ rỗng giữa hạt của phần sét trên mẫu cát pha sét DT-D5.LS.002: độ rỗng 40%.



Hình 9. Ảnh hiển vi điện tử quét cấu trúc mẫu a: DLR-055.233; b: BH18.

Với phương pháp minh giải ảnh hiển vi điện tử quét phù hợp với nghiên cứu vật liệu đặc biệt với vật liệu nano như trong nghiên cứu hệ vi lỗ rỗng (Echlin, 2015; Kant và nnk., 2014; Roslin và nnk., 2020).

Phương pháp gần gũi nhất với phương pháp minh giải ảnh hiển vi điện tử quét là phương pháp minh giải ảnh CT. Ở Việt Nam đã được ứng dụng tại Viện Dầu khí do Nguyen và nnk. (2015). Để so sánh 2 phương pháp này có thể thấy phương pháp minh giải ảnh điện tử quét tối ưu hơn do có thể nhận biết trực quan về hệ lỗ rỗng và có độ phân dải cực cao (vài nanomet) còn ảnh chụp CT chỉ được đến kích thước micron.

Trong nghiên cứu về độ rỗng bằng phương pháp minh giải ảnh CT của Nguyen và nnk. (2015); nhóm tác giả cũng quy đổi độ rỗng từ minh giải ảnh CT độ phân dải cao về độ rỗng từ pp giãn khí Helium. Có thể thấy rằng phương pháp xác định độ rỗng bằng PP giãn khí Helium là phương pháp tiêu chuẩn trong nghiên cứu hệ thống dầu khí khi đối tượng quan tâm là khả năng chứa của đất đá (đặc tính thạch vật lý) đặc biệt với cát kết.

#### 4.1. Nhận biết yếu tố tác động đến độ rỗng của các mẫu cát kết



Mức độ nén ép (độ trưởng thành): từ ảnh cấu trúc hiển vi điện tử quét có thể thấy mẫu cát kết có độ rỗng lớn nhất là mẫu MDD-055.233: 14.58%. Với mức độ nén ép thấp vẫn tồn tại các khoảng lỗ rỗng giữa hạt lớn. Ngược lại với mẫu BH18: 8.47% tương đối chặt xít với độ rỗng giữa hạt nhỏ (Hình 9).

Mức độ xi măng hóa: trên Hình 8 cũng có thể nhận thấy độ hạt của mẫu BH18 lớn hơn rất nhiều so với mẫu MDD-055.233 nhưng độ rỗng lại nhỏ hơn. Vậy yếu tố ảnh hưởng trực tiếp ở đây là mức độ xi măng hóa. Điều này thể hiện rõ ràng hơn khi so sánh mẫu BH18 với mẫu BH40 2 tập cát kết khác nhau trên cùng 1 lỗ khoan (Hình 10). Với độ hạt của BH18 vẫn lớn hơn nhưng mức độ xi măng hóa cao.

## 5. Kết luận

Nghiên cứu đã xác định được mối tương quan tuyến tính rõ rệt giữa kết quả đo độ rỗng theo phương pháp giãn khí Helium và phương pháp minh giải ảnh hiển vi điện tử quét (SEM), với phương trình hồi quy:  $y = 0,9337x + 0,0636$  với hệ số  $r = 0,8834$  cho thấy hai phương pháp có sự thống nhất cao về xu hướng dữ liệu.

Phương pháp phân tích ảnh hiển vi điện tử quét (SEM, TEM) cho phép đánh giá trực tiếp hình thái, mật độ và phân bố không gian của lỗ rỗng trong đá ở cấp độ vi mô đến nano. Giúp phân tích độ rỗng một cách nhanh chóng. Tối ưu với việc xác định độ rỗng tổng (bulk porosity). Ngược lại việc xác định độ rỗng hiệu dụng từ ảnh SEM lại khá khó khăn khi việc phân biệt hệ lỗ rỗng liên thông và hệ lỗ rỗng kín cần có mô phỏng 3D mặt cắt của toàn bộ

mẫu vì vậy với độ rỗng hiệu dụng (effective pore size) thường được xác định bằng phương pháp giãn khí Helium.

Bên cạnh đó phân tích ảnh hiển vi điện tử quét còn giúp nhận diện đặc điểm của hệ thống lỗ rỗng trong mẫu cát kết, từ đó chỉ ra được các yếu tố ảnh hưởng tới độ rỗng như mức độ xi măng hóa, cấu trúc - kiến trúc hạt khoáng vật và mức độ biến đổi thứ sinh. Những yếu tố này đóng vai trò then chốt trong việc quyết định đặc tính rỗng và chất lượng tầng chứa của tập trầm tích ở đây là cát kết.

## Lời cảm ơn

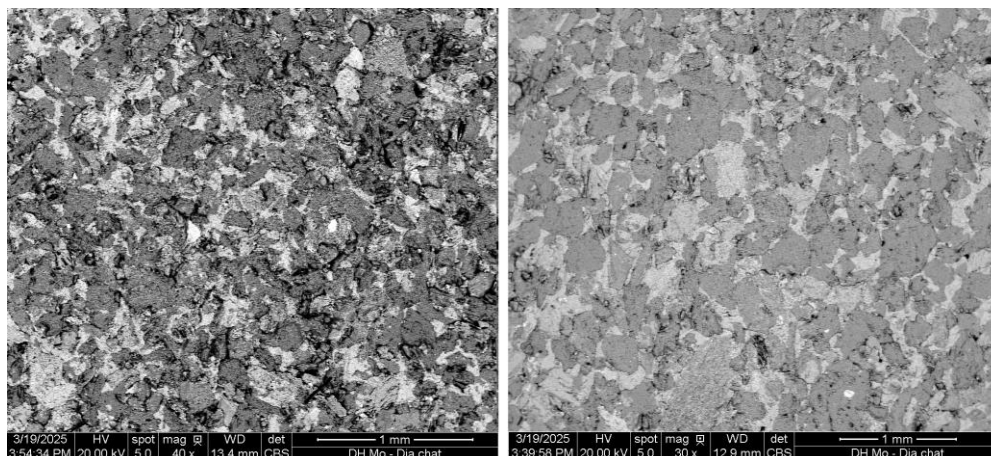
Nhóm tác giả xin cảm ơn đề tài T25-43 đã tài trợ kinh phí hoàn thiện bài báo. Đồng cảm ơn Trung tâm Phân tích, Thí nghiệm Công nghệ cao – Trường Đại học Mỏ - Địa chất đã tạo điều kiện phân tích xử lý số liệu.

## Đóng góp của tác giả

Nguyễn Hữu Hiệp - phương pháp luận, viết bản thảo bài báo, kiểm chứng; Trịnh Thế Lực - gia công phân tích mẫu, xử lý số liệu; Bùi Hoàng Bắc - đánh giá và chỉnh sửa.

## Tài liệu tham khảo

- Curtis, M. E. (2010). Structural characterization of gas shales on the micro-and nano-scales. In *SPE Canada Unconventional Resources Conference?* (pp. SPE-137693). SPE.
- Echlin, P. (2005). The Process of Interpreting Images Obtained by Scanning Electron



Hình 10. Ảnh hiển vi điện tử quét cấu trúc mẫu a: BH40; b: BH18.

- Microscopy. *Microscopy and Microanalysis*, 11(S02), 1320-1321.
- Kant, K., Priest, C., Shapter, J. G., & Losic, D. (2014). The influence of nanopore dimensions on the electrochemical properties of nanopore arrays studied by impedance spectroscopy. *Sensors*, 14(11), 21316-21328.
- Lu, C., Wang, X., Ma, S., Li, S., Xue, T., & Li, Q. (2024). The Classification and Evaluation of an Interlayer Shale Oil Reservoir Based on the Fractal Characteristics of Pore Systems: A Case Study in the HSN Area, China. *Fractal and Fractional*, 8(3), 167.
- Man, H. Q., Hien, D. H., Thong, K. D., Dung, B. V., Hoa, N. M., Hoa, T. K., ... & Ngoc, P. Q. (2021). Hydraulic flow unit classification and prediction using machine learning techniques: A case study from the Nam Con Son basin, offshore Vietnam. *Energies*, 14(22), 7714.
- Marin, M., Potecaşu, F., Potecaşu, O., & Marin, F. B. (2017). Image analysis software for porosity measurements in some powder metallurgy alloys. *Advanced Materials Research*, 1143, 103-107.
- Nguyen, H. M., Nguyen, L. Q. C., Ngo, T. V., & Nguyen, V. H. (2015). Nghiên cứu phương pháp xác định độ rỗng của mẫu lõi từ ảnh chụp cắt lớp có độ phân giải cao. *Petrovietnam Journal*, 8, 27-31.
- Palacio-Mancheno, P. E., Larriera, A. I., Doty, S. B., Cardoso, L., & Fritton, S. P. (2014). 3D assessment of cortical bone porosity and tissue mineral density using high-resolution  $\mu$ CT: effects of resolution and threshold method. *Journal of bone and mineral research*, 29(1), 142-150.
- Paul Glover (2021). *Formation Evaluation MSc Course Notes*. University of Aberdeen, Page 136.
- Roslin, A., Pokrajac, D., Wu, K., & Zhou, Y. (2020). 3D pore system reconstruction using nano-scale 2D SEM images and pore size distribution analysis for intermediate rank coal matrix. *Fuel*, 275, 117934.
- Yangfan, L., Hua, C., & Chao, C. (2015). Reservoir Classification and Evaluation Methods Based on R35 Pore Throat Radius. In *AASRI International Conference on Industrial Electronics and Applications (IEA 2015)* (pp. 175-179). Atlantis Press.
- Zhang, Y., Ghanbarnezhad Moghanloo, R., & Davudov, D. (2019). Pore structure characterization of a shale sample using SEM images. In *SPE Western Regional Meeting* (p. D032S002R004). SPE.