

# Điều kiện thành tạo quặng vàng mỏ Xà Lòi, đới Trường Sơn, Việt Nam dựa trên kết quả phân tích bao thể

Ngô Xuân Đắc<sup>1\*</sup>, Trịnh Hải Sơn<sup>1</sup>, Bùi Thế Anh<sup>1</sup>, Nguyễn Thanh Tùng<sup>1</sup>,  
Nguyễn Thị Hồng Hạnh<sup>1</sup>, Nguyễn Đức Thái<sup>1</sup>, Phạm Đắc Sinh<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản

\*Tác giả liên hệ: nxdac@mae.gov.vn

Ngày gửi bài: 10/6/2025

Ngày chấp nhận đăng: 17/9/2025

**Từ khóa:** Bao thể, mỏ Vàng Xà Lòi, vàng tạo núi

**Tóm tắt:** Nghiên cứu bao thể trong khoáng vật thạch anh mỏ vàng Xà Lòi xã Vĩnh Ô, huyện Vĩnh Linh, tỉnh Quảng Trị, thuộc đới Trường Sơn, miền Trung Việt Nam, nhằm làm sáng tỏ điều kiện hóa lý thành tạo nguồn dung dịch nhiệt dịch hình thành trong quá trình thành tạo quặng vàng. Các bao thể khí-lồng được xác định có nhiệt độ đồng nhất dao động từ 180°C đến 370°C, tập trung chủ yếu trong khoảng 240–300°C, phản ánh điều kiện nhiệt dịch trung bình đến cao phù hợp với môi trường biến chất sâu. Độ muối của dung dịch dao động từ 4.97 đến 9.88 wt% NaCl eq. (phổ biến 5–7 wt%), và mật độ tính toán từ 1.28 đến 1.35 g/cm<sup>3</sup> (trung bình 1.31 g/cm<sup>3</sup>), đặc trưng cho các hệ nhiệt dịch nghèo muối đến trung bình, giàu H<sub>2</sub>O, hình thành trong điều kiện nhiệt độ-áp cao. Áp suất hình thành ước tính khoảng 64.2–70.3 MPa, tương ứng độ sâu 4.66–4.95 km, trong khi pH của nguồn dung dịch dao động từ 6.22 đến 6.33 (trung bình 6.27), phản ánh môi trường trung tính yếu, thuận lợi cho sự vận chuyển và kết tủa vàng cùng với các khoáng vật sulfua.

Các đặc điểm trên cho thấy nguồn dung dịch mỏ Xà Lòi mang đặc trưng của kiểu mỏ vàng tạo núi, hình thành trong điều kiện biến chất trung bình, áp suất cao và chịu ảnh hưởng của kiến tạo nén ép mạnh. Kết quả nghiên cứu không chỉ góp phần làm sáng tỏ nguồn gốc và cơ chế tích tụ vàng mỏ Xà Lòi mà còn cung cấp cơ sở khoa học định hướng cho công tác tìm kiếm khoáng sản vàng trong khu vực đới Trường Sơn.

## 1. Giới thiệu

Trong nghiên cứu quá trình hình thành các mỏ khoáng, có thể thấy rằng hai nhóm yếu tố cơ bản chi phối điều kiện thành tạo quặng hóa: (1) yếu tố địa chất bao gồm đặc điểm địa tầng, cấu trúc kiến tạo, các đá magma sinh quặng, mức độ tập trung của các nguyên tố tạo quặng; (2) yếu tố hóa – lý như nhiệt độ, áp suất, pH, Eh, hệ số bay hơi và cơ chế vận chuyển, kết tủa của các nguyên tố kim loại (Pirajno, 2009). Bản chất của quá trình khoáng hóa là sự tương tác qua lại giữa các yếu tố này. Thông qua nghiên cứu các yếu tố trên xác định điều kiện nguồn gốc thành tạo

và làm rõ quy luật hình thành quặng từ phục vụ cho công tác định hướng tìm kiếm và đánh giá tiềm năng khoáng sản.

Những nghiên cứu trước đây chủ yếu dựa vào các phương pháp định tính thì ngày nay đã chuyển sang các nghiên cứu định lượng, với sự hỗ trợ mạnh mẽ từ các ngành khoa học liên ngành như địa chất toán học, địa hóa vi lượng, và mô hình hóa thống kê (Heinrich, 2007). Một trong những câu hỏi quan trọng đặt ra là làm thế nào để xác định được các thông số vật lý-hóa học định lượng, cũng như nguồn gốc, thành phần và tính chất của dung dịch quặng, yếu tố then chốt trong quá trình

hình thành khoáng hóa. Ngoài ra, việc giải thích các quá trình tiến hóa của dung dịch quặng, cơ chế kết tinh khoáng vật, quá trình làm giàu và tích tụ khoáng sản cũng là mục tiêu quan trọng cần nghiên cứu làm sáng tỏ (Ridley & Diamond, 2000).

Tất cả những thông tin trên có thể thu nhận được thông qua nghiên cứu bao thể một trong những hướng nghiên cứu hiện đại và hiệu quả cao. Bao thể được lưu giữ trong khoáng vật ngay trong quá trình hình thành của chúng, do đó chúng là vật lưu giữ những thông tin quan trọng phản ánh chính xác điều kiện vật lý-hóa học của dung dịch quặng tại thời điểm khoáng vật kết tinh. Thông qua phân tích nhiệt độ đồng nhất, độ muối, áp suất, pH và thành phần của bao thể, ta có thể tái dựng một cách định lượng môi trường thành tạo quặng, đảm bảo độ tin cậy hơn các phương pháp nghiên cứu gián tiếp khác. Các nghiên cứu khoáng hóa dựa trên khảo sát thực địa kết hợp với phân tích thạch học – khoáng tương dưới kính hiển vi, cùng các phân tích địa hóa nguyên tố chính, nguyên tố vết và đồng vị bền, chủ yếu cung cấp những thông tin gián tiếp về sản phẩm cuối cùng của quá trình khoáng hóa, nhưng chưa thể làm sáng tỏ bản chất vật lý – hóa học của quá trình hình thành khoáng vật. Vì vậy, các phương pháp đó cần được kết hợp và hỗ trợ bởi những phương pháp nghiên cứu thực nghiệm định lượng trong đó phân tích bao thể là công cụ không thể thiếu để tiếp cận bản chất thực sự của quá trình tạo khoáng (Bodnar, 2003).

Mỏ vàng Xà Lòi tuy đã có một số nghiên cứu sơ bộ về khảo sát địa chất, cũng như các hoạt động tìm kiếm và đánh giá triển vọng ở những mức độ khác nhau, nhưng cho đến nay vẫn chưa có các nghiên cứu chuyên sâu nhằm làm rõ nguồn gốc và điều kiện thành tạo khoáng hóa. Do đó, nghiên cứu phân tích bao thể trong bài báo này được xem như một bước tiên quan trọng trong việc làm sáng tỏ đặc điểm vật lý-hóa học của dung dịch tạo quặng, giúp xác định nhiệt độ, áp suất, độ muối, pH và các đặc tính môi trường diễn hình cho giai đoạn khoáng hóa vàng tại khu vực. Kết quả này không chỉ đóng vai trò nền tảng trong việc xác định kiểu mỏ mà còn góp phần định hướng hiệu quả cho các hoạt động tìm kiếm-thăm dò chi tiết hơn trong tương lai.

## **2. Đặc điểm địa chất và quặng hóa**

### **2.1. Đặc điểm địa chất khu vực**

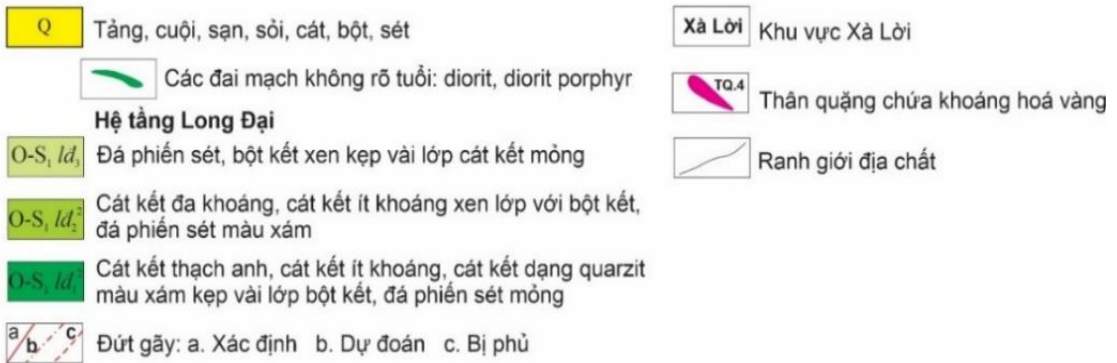
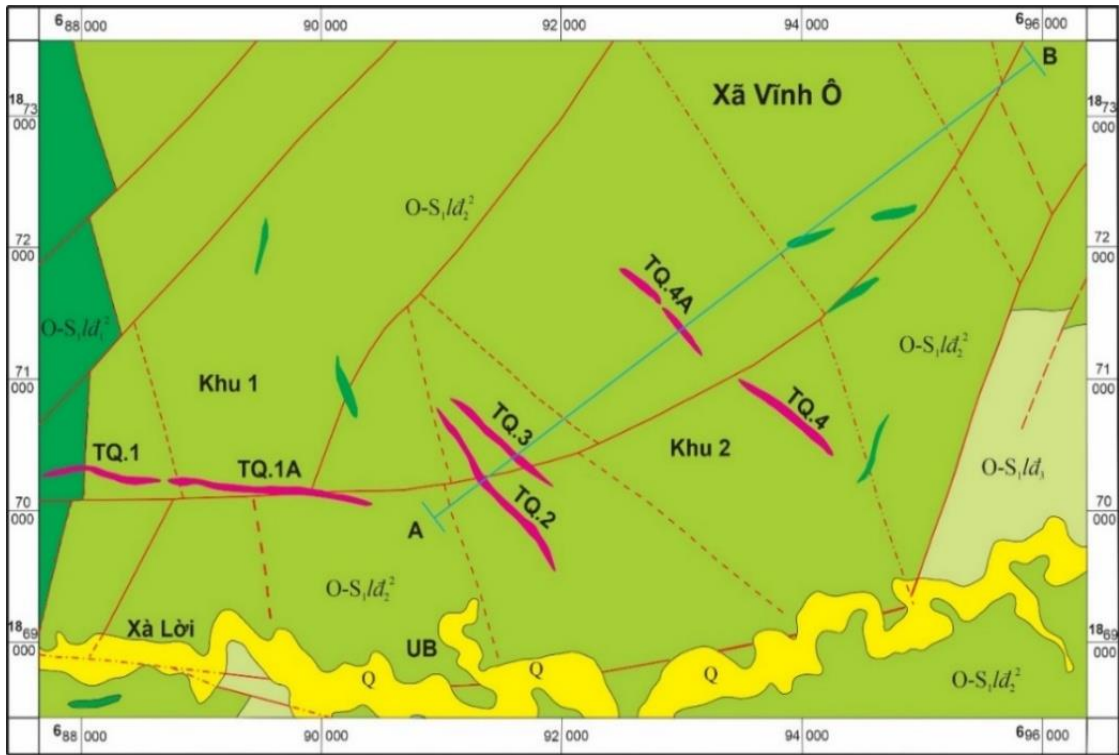
Mỏ vàng Xà Lòi phân bố trong hệ tầng Long Đại có tuổi Ordovic–Silur sớm, gồm các đá trầm tích biến chất tương phiến lục. Thành phần thạch học chủ yếu gồm bột kết, cát kết thạch anh hạt nhỏ đến vừa, cát kết feldspat và một lượng nhỏ phyllit vôi. Các đá này thường có cấu tạo phân lớp, tại một số nơi phát triển dạng phiến mica và có dấu hiệu biến dạng từ trung bình đến mạnh.

Các thể đá này bị chia cắt bởi nhiều đới trượt dẻo–giòn, trong đó quan trọng nhất là đứt gãy nghịch Xà Lòi–Động Chặt có phương Đông Bắc–Tây Nam và cắm dốc về phía Nam. Đây là đới khống chế cấu trúc chính đóng vai trò quan trọng trong quá trình vận chuyển và tích tụ vàng. Các hệ đứt gãy phương Tây Bắc–Đông Nam và Bắc–Nam đóng vai trò là các kênh dẫn thứ cấp, tạo nên hệ thống giao cắt xung yếu là vị trí thuận lợi cho sự tập trung quặng.

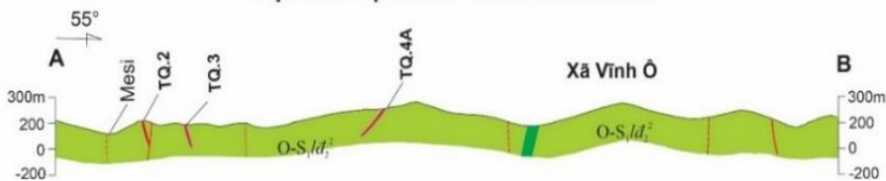
Các đá xâm nhập mafic phân bố trong khu vực, gồm các mạch dolerit hạt mịn màu xanh lục và khối xâm nhập mafic dạng porphyr. Các mạch này xâm nhập vào đá trầm tích biến chất và thường bị biến đổi mạnh. Về đặc điểm thạch học, dolerit porphyr chứa khoảng 40% khoáng vật sắt–magnesi (olivin, pyroxen, biotit, hornblend) và khoảng 60% plagioclas. Quá trình biến đổi nhiệt dịch đã làm thay thế một phần khoáng vật nguyên sinh bằng chlorit, epidot và sericit.

Các mạch mafic và đá trầm tích biến chất vây quanh đều bị xuyên cắt bởi các mạch nhỏ thạch anh–sunfua, đây là các cấu trúc chứa quặng chính. Các mạch này thường chứa pyrit, arsenopyrit, pyrrotit, sphalerit, galen và chalcopyrit, và thường được bao quanh bởi các đới biến đổi sericit, chlorit, epidot.

Ngoài ra, các mạch diorit porphyr có phenocryst plagioclas và nền hạt mịn gồm biotit–hornblend cũng được quan sát thấy dọc các đới đứt gãy chính. Các mạch này bị biến đổi mạnh theo kiểu propylit, gồm chlorit, epidot, albit, thạch anh và sericit. Vàng được phát hiện trong phần rìa bị biến đổi của các khối xâm nhập này, cho thấy chúng có thể đóng vai trò là nguồn cung cấp cho quá trình tạo quặng (Đặng Mỹ Cung và nnk 2012).



**MẶT CẮT ĐỊA CHẤT THEO ĐƯỜNG AB**



**Hình 1.** Sơ đồ địa chất khu mỏ Xà Lòi

## 2.2. Đặc điểm khoáng hóa của mỏ Xà Lòi

### 2.2.1. Đặc điểm phân bố và hình thái thân quặng

Khoáng hóa vàng mỏ Xà Lòi được khống chế bởi các đới cấu trúc dập vỡ, trong khu mỏ được khoan định thành sáu thân quặng riêng biệt, được ký hiệu là TQ.1, TQ.1A, TQ.2, TQ.3, TQ.4 và TQ.4A (Hình 1). Các thân quặng này phát triển dọc theo các đới

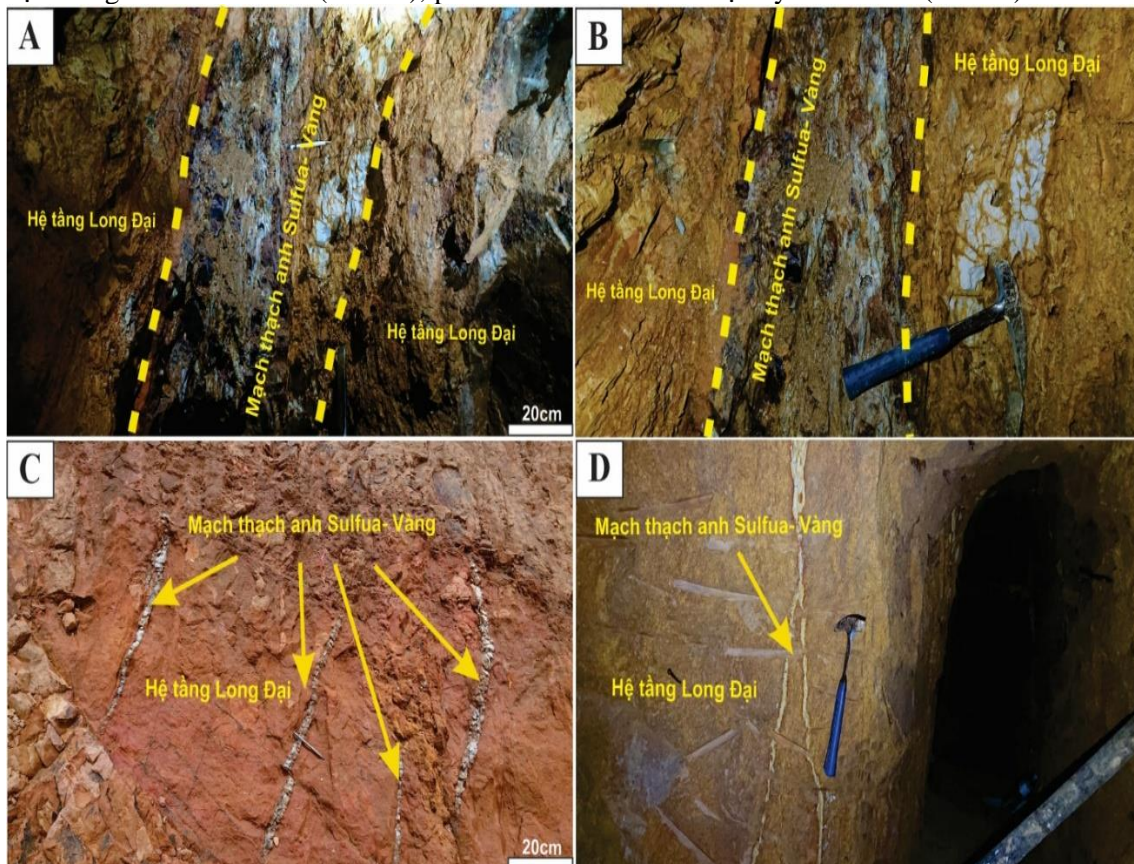
trượt dẻo–giòn có phương Đông Bắc–Tây Nam đến gần Bắc–Nam, trong các đá trầm tích biến chất tương đá phiến lục thuộc hệ tầng Long Đại (O–S<sub>1</sub>ld<sup>2</sup>) có tuổi Ordovic–Silur, gồm chủ yếu phyllit, cát kết thạch anh và bột kết.

Thân quặng TQ.1 là thân quặng có triển vọng nhất, kéo dài khoảng 800–1000 m theo phương nằm ngang, có bề dày thực từ 2 đến 4

m (trung bình ~3,3 m), và độ sâu có thể đạt hơn 40 m. Đới khoáng hóa này nằm trong đá trầm tích biến chất bị biến dạng mạnh và liên quan đến các đới trượt dẻo–giòn phát triển rõ rệt. TQ.1A nằm ở phía dưới về mặt cấu trúc so với TQ.1 và hình thành ở độ phân nông hơn, thân quặng có bề dày khoảng 0,8–1,2 m (Hình 1).

Các thân quặng TQ.2, TQ.3, TQ.4 và TQ.4A nằm gần song song với TQ.1 ở khu vực trung tâm mỏ Xà Lòi (Hình 1), phát triển

đọc theo các hệ thống đứt gãy khu vực và phân bố trong các đá trầm tích biến chất giàu thạch anh. Các thân quặng này có chiều dài theo phương nằm ngang hàng trăm mét, bề dày thay đổi từ dưới 1 m đến vài mét. Tuy nhiên, tính liên tục theo chiều sâu của chúng hiện chưa được xác định rõ do dữ liệu khoan còn hạn chế (Đặng Mỹ Cung và nnk 2012). Các thân quặng thường tồn tại ở dạng các đới mạch, vì mạch thạch anh – sulfua với kích thước và độ dày khác nhau (Hình 2).

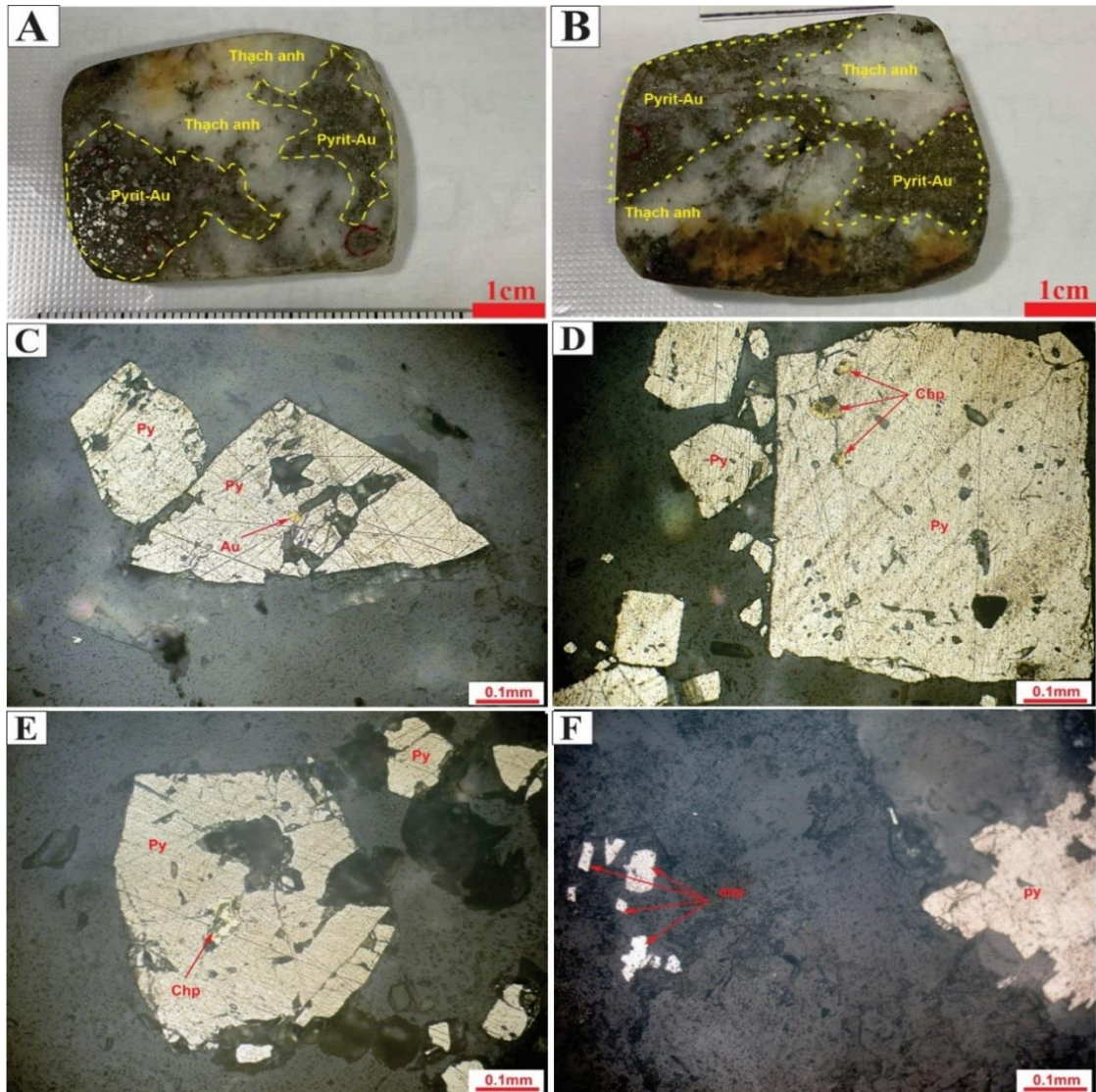


**Hình 2.** Ảnh chụp ngoài thực địa các mạch thạch anh–sulfua–vàng trong các đá trầm tích biến chất của hệ tầng Long Đại: (A, B) Các mạch thạch anh–sulfua–vàng phân bố theo các đới dập vỡ trong hệ tầng Long Đại. (C, D) Các vỉ mạch thạch anh–sulfua phân bố trong hệ tầng Long Đại.

### 2.2.2. Đặc điểm khoáng vật quặng

Kết quả phân tích khoáng tướng cho thấy tổ hợp khoáng vật quặng tại mỏ Xà Lòi chủ yếu gồm pyrit, chalcopyrit, asenopyrit và vàng tự sinh. Pyrit là khoáng vật phổ biến nhất, thường gặp dưới dạng hạt tha hình, nửa tự hình đến tự hình, với kích thước khoảng 0,1–1,0 mm (Hình 3A–D). Trong các mẫu đã bị biến đổi, nhiều hạt pyrit bị oxy hóa một

phần hoặc hoàn toàn, tạo thành limonit và goethit giả hình theo pyrit. Vàng tự sinh chủ yếu xuất hiện dưới dạng bao thể trong pyrit (Hình 3C). Chalcopyrit thường cộng sinh với pyrit, tạo thành tổ hợp khoáng vật cộng sinh điển hình (Hình 3D, E). Asenopyrit thường phân bố thành các tập hợp hạt tha hình trên nền khoáng vật tạo đá, đồng tồn tại với pyrit (Hình 3F).



**Hình 3.** Ảnh A,B mẫu mài bóng dùng để phân tích khoáng tương quặng vàng; Ảnh C, D, E, F chụp dưới kính hiển vi phân xạ thể hiện mối quan hệ giữa các khoáng vật tạo quặng pyrit (Py), vàng tự sinh (Au), chalcopyrit (Chp) và arsenopyrit (Asp): (C) Vàng tự sinh (Au) dạng bao thể phân bố trong hạt pyrit; (D,E) Chalcopyrit ở dạng vi hạt phân bố trên nền khoáng vật pyrit; (F) tổ hợp khoáng vật arsenopyrit, pyrit dạng hạt tha hình phân bố trên nền thạch anh.

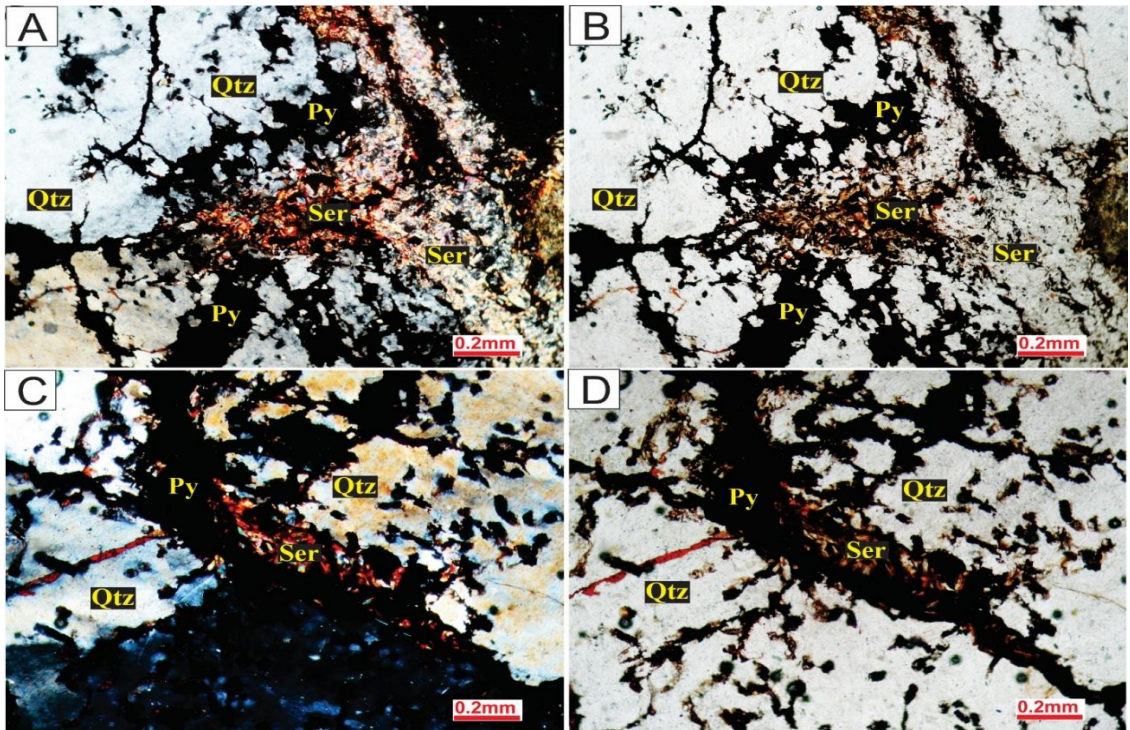
### 3. Thu thập mẫu và phương pháp phân tích

#### 3.1. Thu thập mẫu

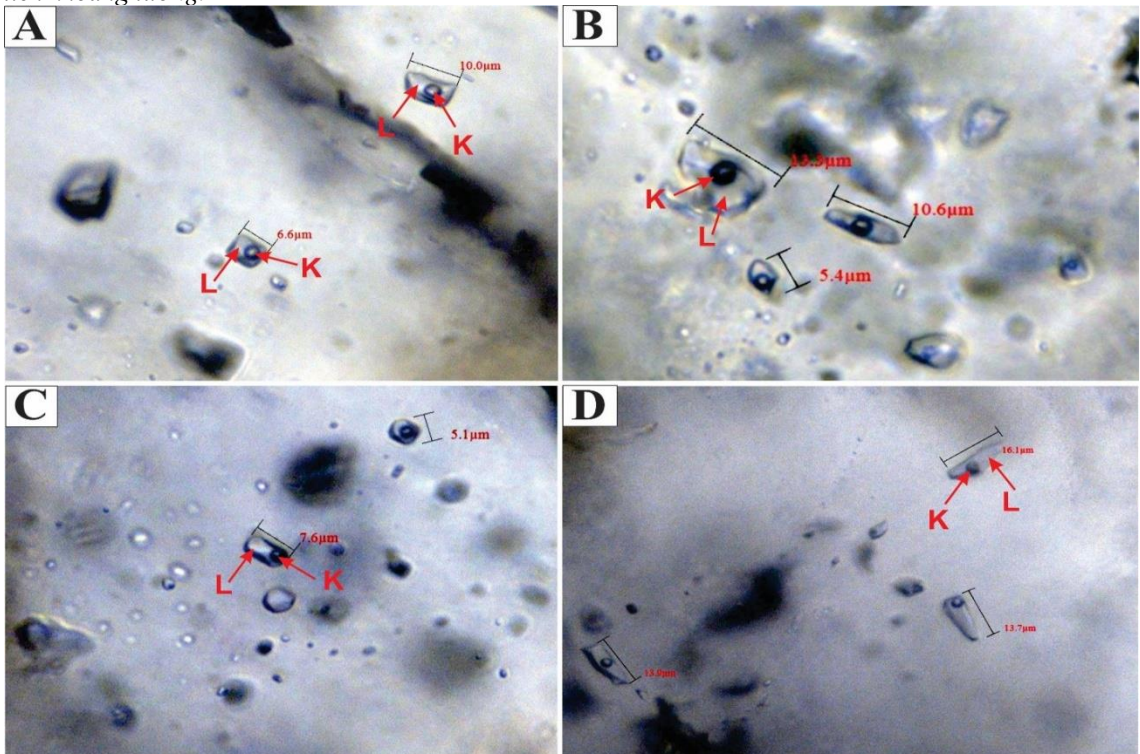
Các mẫu dùng để phân tích bao thể trong khoáng vật thạch anh được thu thập từ các thân quặng dạng mạch thạch anh-sulfua-vàng trong các lò đang khai thác. Trước khi phân tích bao thể, các mẫu được gia công thành lát mỏng và mẫu mài bóng để nghiên cứu thạch học và khoáng tương, nhằm nhận diện các biến đổi nhiệt dịch liên quan đến quặng vàng, xác định tổ hợp khoáng vật cộng sinh quặng và mối quan hệ giữa vàng với các

khoáng vật tạo đá, đặc biệt là thạch anh, khoáng vật được lựa chọn để phân tích bao thể.

Kết quả phân tích thạch học – khoáng tương cho thấy quặng hóa vàng có mối liên hệ chặt chẽ với thạch anh. Vì vậy, thạch anh được sử dụng làm khoáng vật chủ để phân tích bao thể, qua đó gián tiếp xác định các điều kiện nhiệt độ và hóa lý hình thành quặng vàng tại mỏ Xà Lòi. Các mẫu được dùng cho phân tích bao thể cùng hình ảnh các bao thể khí-lông trong thạch anh được thể hiện lần lượt trong các Hình 4A–D và 5A–D.



**Hình 4.** Tổ hợp khoáng vật thạch anh (Qtz) – sericit (Ser) – pyrit (Py) trong mẫu quặng, được quan sát dưới kính hiển vi phân cực. Ảnh A và C chụp dưới ánh sáng phân cực chéo (2 Nicol), trong khi ảnh B và D chụp dưới ánh sáng phân cực song song (1 Nicol). Sự có mặt của pyrit (Py) được xác định bằng phân tích khoáng tương.



**Hình 5.** Ảnh A, B, C, D: Bao thể khí lỏng trong thạch anh; L: thể lỏng và K: thể khí; kích thước các bao thể được chú thích trên mỗi bao thể.

### 3.2. Phương pháp phân tích

Phân tích bao thể xác định các điều kiện hóa-lý của quá trình tạo quặng vàng khu mỏ Xà Lòi được tiến hành tại Phòng thí nghiệm Trọng điểm Quốc gia-Trường Đại học Địa chất Trung Quốc. Các bao thể được lựa chọn phân tích đều là bao thể nguyên sinh, nằm trong khoáng vật thạch anh có quan hệ trực tiếp với khoáng hóa vàng. Dưới kính hiển vi phân cực, chúng thường phân bố riêng lẻ hoặc thành cụm nhỏ trong phần lõi của các hạt thạch anh, không cắt qua ranh giới hạt, có hình dạng đẳng thước, cầu, elip hoặc kéo dài nhẹ, kích thước tương đối đồng đều (khoảng 5–15  $\mu\text{m}$ ) và bảo tồn tốt. Chỉ các bao thể khí-lông nguyên sinh, đa pha, có hình dạng đơn giản, kích thước thích hợp và phân bố trong các hạt thạch anh liên quan trực tiếp đến khoáng hóa vàng mới được lựa chọn để phân tích và tính toán các tham số nhiệt độ đồng nhất ( $T_h$ ), nhiệt độ tan băng ( $T_m(\text{ice})$ ), độ muối, mật độ và áp suất nhằm đảm bảo phản ánh đúng bản chất vật lý-hóa học của dung dịch nhiệt dịch tại đúng thời điểm hình thành quặng vàng, tránh ảnh hưởng của các giai đoạn dung dịch sau tạo quặng xâm nhập sau khi khoáng vật đã kết tinh. Các phương pháp phân tích chính bao gồm:

#### 3.2.1. Xác định nhiệt độ đồng nhất của bao thể chất lưu

Nhiệt độ đồng nhất ( $T_h$ ) được xác định thông qua nghiên cứu các bao thể chất lưu dạng khí-lông (hoặc lỏng-khí) có trong khoáng vật thạch anh. Trong tự nhiên, các bao thể này tồn tại dưới dạng hai pha (khí và lỏng) hoặc ba pha (rắn-lông-khí). Khi nung nóng mẫu, các pha bên trong bao thể sẽ dần chuyển hóa và đồng nhất thành một pha duy nhất ở một nhiệt độ xác định-được gọi là nhiệt độ đồng nhất. Nhiệt độ này được xem là nhiệt độ kết tinh tối thiểu của khoáng vật chủ.

Các bao thể được lựa chọn để đo là bao thể nguyên sinh, có kích thước đủ lớn, hình thái rõ ràng, ranh giới khí-lông dễ quan sát. Trước khi phân tích, bao thể được mô tả, chụp ảnh, vẽ sơ đồ hình thái trong sổ ghi chép. Thí nghiệm được thực hiện bằng cách tăng nhiệt độ từ  $0^\circ\text{C}$  đến khoảng  $500^\circ\text{C}$  với tốc độ ban đầu  $10^\circ\text{C}/\text{phút}$ . Khi phát hiện sự chuyển pha của bọt khí trong bao thể, tốc độ

tăng nhiệt được giảm xuống  $1^\circ\text{C}/\text{phút}$  nhằm xác định chính xác thời điểm đồng nhất hoàn toàn. Nhiệt độ tại thời điểm khí-lông hợp nhất thành một pha lỏng duy nhất được ghi nhận là nhiệt độ đồng nhất của bao thể.

#### 3.2.2. Xác định nhiệt độ điểm đóng băng (phương pháp nghiệm lạnh)

Nhiệt độ đóng băng ( $T_m$ ) của bao thể chất lưu được xác định bằng phương pháp làm lạnh mẫu dưới điểm đóng băng, nhằm quan sát các hiện tượng thay đổi pha như kết tinh eutectic, thăng hoa, đóng băng hoàn toàn hoặc ngưng tụ khí. Các biến đổi này cho phép suy luận về thành phần khí, loại muối hòa tan và ước lượng nồng độ muối trong dung dịch bao thể. Thí nghiệm được thực hiện bằng thiết bị vi nhiệt kế lạnh THMSG-600 (hãng Linkam, Vương quốc Anh). Mẫu được làm lạnh nhanh đến  $-190^\circ\text{C}$  với tốc độ  $30^\circ\text{C}/\text{phút}$ , sau đó tăng nhiệt dần lên  $0^\circ\text{C}$  với tốc độ  $5^\circ\text{C}/\text{phút}$ . Trong quá trình tăng nhiệt, quan sát kỹ sự tan chảy đồng nhất của các pha để xác định nhiệt độ đóng băng cuối cùng-giá trị này được dùng để tính độ muối (wt% NaCl eq.) và mật độ của dung dịch bao thể, theo phương pháp thực nghiệm của Bodnar (1994).

#### 3.2.3. Các thông số hóa-lý được xác định

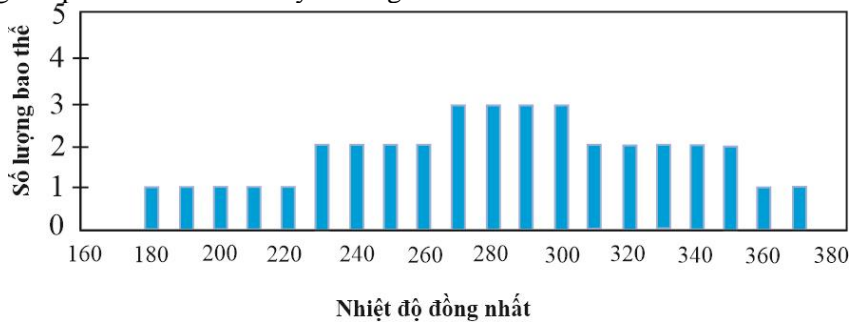
Dựa trên các phân tích bao thể khí-lông, các tham số vật lý-hóa học của dung dịch tạo quặng được xác định bao gồm: nhiệt độ kết tinh ( $T_h$ ,  $^\circ\text{C}$ ), nồng độ muối (wt% NaCl eq.), mật độ dịch thể ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), áp suất tạo quặng (MPa), độ sâu hình thành tương ứng (km) và giá trị pH của dung dịch nhiệt dịch. Các thông số này được tính toán dựa trên mối quan hệ thực nghiệm giữa  $T_h$ - $T_m$ -độ muối-mật độ-áp suất, sử dụng các giản đồ nhiệt độ-mật độ-nồng độ muối (Bodnar, 1994) và công thức tính áp suất của Shao Jieliang (1992). Các bao thể được phân tích nằm trong các lát mỏng thạch anh, quan sát dưới cả ánh sáng truyền qua và phản xạ, chủ yếu là các bao thể nguyên sinh có hình dạng tròn cạnh, elip hoặc kéo dài, kích thước tương đồng và bảo tồn tốt. Các công thức tính độ muối, mật độ, áp suất và độ sâu (Hall, 1988; Bodnar, 1993; Shao, 1992; Sun, 1990) trong nghiên cứu này được xây dựng cho hệ  $\text{H}_2\text{O}$ -NaCl và áp dụng trực tiếp cho các bao thể khí-lông, đảm bảo độ chính xác của các tham số thu được.

#### 4. Kết quả phân tích

##### 4.1 Nhiệt độ đồng nhất và điểm đóng băng

Phân tích bao thể trong thạch anh tại mỏ Xà Lòi cho thấy sự xuất hiện chủ yếu của bao thể khí-lồng hai pha. Các bao thể này thường

có hình dạng elip, tròn cạnh hoặc kéo dài, kích thước phổ biến từ 5–15 μm, gồm hai pha chính: pha lỏng chiếm ưu thế và một bọt khí nhỏ nằm bên trong. Biểu đồ thể hiện số lượng bao thể phân tích và nhiệt độ đồng nhất được thể hiện ở Hình 6.



Hình 6. Biểu đồ thể hiện số lượng bao thể phân tích và nhiệt độ đồng nhất

Kết quả phân tích nhiệt độ đồng nhất dao động trong khoảng 180~370°C, trung bình là 255°C, phạm vi nhiệt độ chủ yếu trong khoảng 240-300°C, giá trị điểm đóng băng dao động từ (-10.3) đến (-1.1), phổ biến dao động trong khoảng (-5.55) đến (-3.05), thuộc loại nhiệt dịch nhiệt độ trung bình đến cao.

##### 4.2. Độ muối và mật độ

###### a. Độ muối

Công thức của Hall et al. (1988) được áp dụng cho hệ H<sub>2</sub>O–NaCl. Trong nghiên cứu này, phần lớn các bao thể quan sát được cho thấy sự hình thành băng khi làm lạnh và tan hoàn toàn ở nhiệt độ tan băng (T<sub>m</sub>(ice)) đặc trưng cho hệ này, do đó độ muối được tính

toán dựa trên mối quan hệ giữa nhiệt độ tan băng T<sub>m</sub>(ice) và hàm lượng muối (wt% NaCl eq.) trong hệ NaCl–H<sub>2</sub>O do Hall và cộng sự (1988) đề xuất, với công thức như sau:

$$W = 1.78T_m - 0.0442T_m^2 + 0.000557T_m^3$$

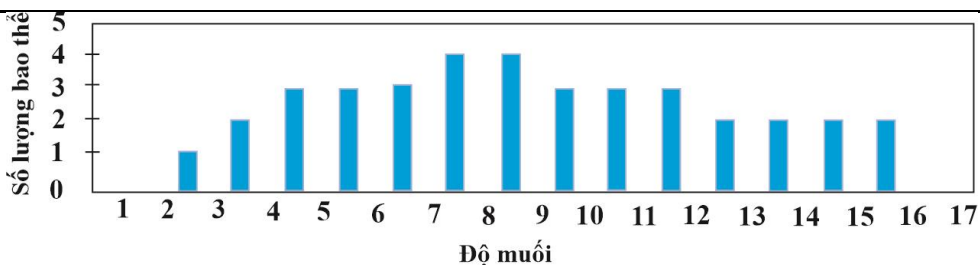
Công thức này áp dụng cho dung dịch thể NaCl–H<sub>2</sub>O có độ muối từ 0 đến 23,3%. Trong đó:

W là độ muối (wt.%), T<sub>m</sub> là nhiệt độ tan chảy cuối cùng của băng trong bao thể, được sử dụng để tính toán độ muối của dung dịch dựa trên độ giảm điểm đóng băng (°C).

Kết quả tính độ muối được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Bảng thống kê độ muối và mật độ của bao thể

Số hiệu mẫu	Độ muối dao động (wt%)	Độ muối trung bình (wt%)	Mật độ dao động (g/cm <sup>3</sup> )	Mật độ trung bình (g/cm <sup>3</sup> )
XL1	1.91~8.68	4.97	1.13~1.55	1.28
XL2	3.03~14.27	6.31	1.17~1.68	1.31
XL3	2.45~14.11	7.42	1.19~1.59	1.33
XL4	4.61~11.51	7.33	1.13~1.52	1.35
XL5	6.71~15.17	9.88	1.18~1.41	1.28



Hình 7. Biểu đồ cột tần suất độ muối của bao thể

Bao thể hai pha khí-lỏng có độ muối dao động trong khoảng 1,91-14,25 wt%, chủ yếu tập trung trong khoảng 4-6 wt%, với giá trị trung bình là 6,62wt%, nhìn chung thể hiện đặc điểm dung dịch có độ muối thấp. Biểu đồ cột tần suất độ muối của bao thể được thể hiện ở Hình 7.

**b. Mật độ**

Mật độ dung dịch được tính toán dựa trên giản đồ ba pha nhiệt độ-độ muối-mật độ do Bodnar (1993) đề xuất. Dựa trên các giá trị đã biết về độ muối và nhiệt độ đồng nhất, các điểm được xác định trên giản đồ, từ đó suy ra phạm vi mật độ xấp xỉ của dung dịch chất lỏng. Kết quả chiếu đồ thu được thể hiện trong Hình 8.

Một phương pháp khác để tính mật độ dung dịch chất lỏng là sử dụng công thức thực

nghiệm do Liu Bin và cộng sự (2004) đề xuất:

$$D=A+B \times T+C \times T^2$$

$$A=0.99351+8.72147 \times 10^{-3} \times W - 2.43975 \times 10^{-5} \times W^2$$

$$B=7.11652 \times 10^{-5} - 5.2208 \times 10^{-5} \times W+1.26656 \times 10^{-6} \times W^2$$

$$C=3.4779 \times 10^{-6}+2.12124 \times 10^{-7} \times W - 4.52318 \times 10^{-9} \times W^2$$

Trong đó:

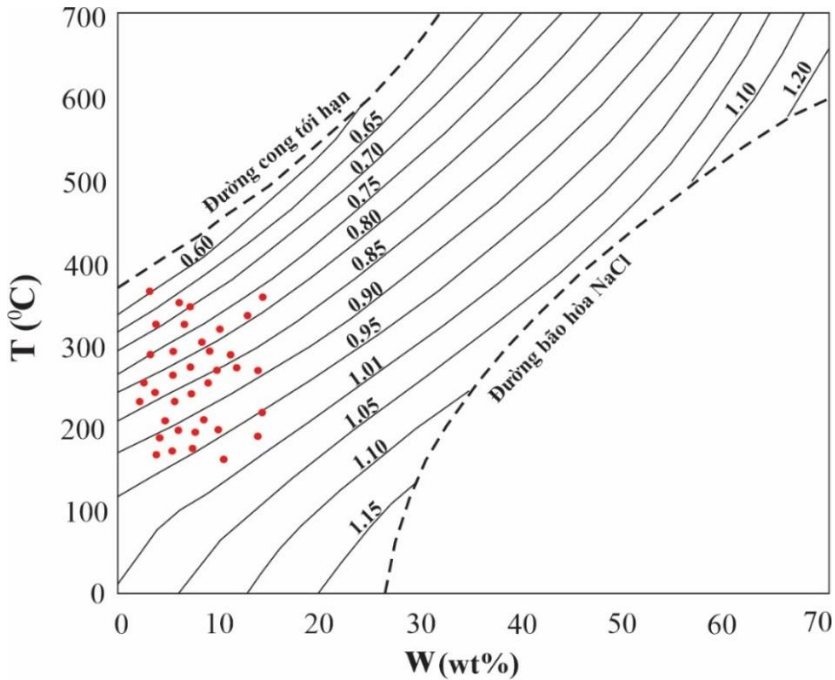
D là mật độ (g/cm<sup>3</sup>),

T là nhiệt độ đồng nhất (°C),

W là độ muối (wt%),

A, B, C là các hệ số phụ thuộc vào W, được tính theo công thức:

Dựa trên công thức trên, mật độ của các bao thể được tính toán thống kê kết quả thể hiện trong Bảng 1.



**Hình 8.** Giản đồ pha nhiệt độ-độ muối-mật độ của hệ NaCl-H<sub>2</sub>O (theo Bodnar)

Kết quả thống kê thu được từ hai phương pháp trên khá tương đồng. Do đó, có thể thấy rằng nguồn dung dịch tạo khoáng khu vực nghiên cứu có mật độ thấp.

**4.3. Áp suất, độ sâu và giá trị pH thành tạo quặng**

**4.3.1. Áp suất**

Áp suất thành tạo khoáng được tính toán theo công thức thực nghiệm của Shao Jielian (1992):

$$P = P_0 \times T_1 / T_0$$

Trong đó:

$$P_0 = 219 + 2620 \times W$$

$$T_0 = 374 + 920 \times W$$

Trong công thức:

T<sub>0</sub> là nhiệt độ ban đầu (°C),

T<sub>1</sub> là nhiệt độ thành tạo khoáng (gần xấp xỉ với nhiệt độ đồng nhất) (°C),

P<sub>0</sub> là giá trị áp suất ban đầu,

P là giá trị áp suất thành tạo khoáng,  
W là độ muối dung dịch (wt%).

### 4.3.2 Độ sâu thành tạo

Thông thường, áp suất tối đa tác động lên chất lỏng là áp suất từ lớp đá phủ bên trên, còn gọi là "áp suất tĩnh của đá". Khi chất lỏng tràn ra bề mặt, áp suất chuyển thành "áp suất tĩnh chất lỏng". Khi sử dụng gradient áp suất để tính độ sâu thành tạo khoáng thì sự khác biệt giữa gradient áp suất tĩnh chất lỏng và gradient áp suất tĩnh của đá là rất lớn (Sun, F.Y., 1990).

Sun cho rằng: Khi độ sâu nhỏ hơn 5km (hoặc áp suất chất lỏng < 40MPa), có thể sử dụng gradient áp suất tĩnh chất lỏng để tính độ sâu; Khi độ sâu lớn hơn 16 km (hoặc áp suất chất lỏng > 370MPa), áp suất chất lỏng gần bằng áp suất tĩnh của đá và có thể dùng gradient áp suất tĩnh của đá để tính độ sâu;

Trong khoảng từ 5-16 km (hoặc áp suất từ 40-370MPa), mối quan hệ giữa áp suất và độ sâu là phi tuyến tính, không thể dùng gradient

tĩnh chất lỏng hay gradient tĩnh của đá để tính, mà cần chia đoạn và áp dụng các phương trình phù hợp để tính độ sâu thành tạo khoáng như sau:

① Nếu áp suất chất lỏng đo được < 40MPa, sử dụng gradient áp suất tĩnh chất lỏng, tức là lấy áp suất chia cho 10MPa/km;

② Nếu áp suất trong khoảng 40-220 MPa, áp dụng công thức:

$$Y = 0.868 / (1/x + 0.00388) + 2;$$

③ Nếu áp suất trong khoảng 220–370 MPa, áp dụng công thức:

$$Y = 11 + e(x - 221.95) / 79.075);$$

④ Nếu áp suất > 370 MPa, áp dụng công thức:

$$Y = 0.0331385x + 4.19898.$$

Trong các công thức trên, x và y lần lượt là áp suất đo được (MPa) và độ sâu thành tạo khoáng (km). Dựa vào đó có thể tính toán được áp suất và độ sâu thành tạo khoáng, kết quả được thể hiện ở Bảng 2.

**Bảng 2.** Bảng thống kê áp suất và độ sâu thành tạo quặng vàng mở Xà Lòi

Số hiệu mẫu	Áp suất (Mpa)		Độ sâu (Km)	
	Phạm vi	Giá trị bình quân	Phạm vi	Giá trị bình quân
XL1	43.91~95.15	66.57	3.45~6.22	4.77
XL2	44.51~99.84	68.44	3.50~6.45	4.86
XL3	47.31~94.49	69.71	3.66~6.19	4.92
XL4	46.07~93.45	70.26	3.38~6.14	4.95
XL5	47.65~77.01	64.19	3.68~5.35	4.66

Qua tính toán và tổng hợp có thể thấy rằng: Áp suất thành tạo khoáng dao động từ 44 đến 100MPa, với giá trị trung bình là 67MPa. Độ sâu thành tạo dao động từ 3,3 đến 6,4 km, với giá trị trung bình là 4,9 km, điều này cho thấy quặng hóa hình thành trong điều kiện môi trường có độ sâu trung bình.

### 4.3. Giá trị pH

Dựa trên đặc điểm dung dịch có độ muối thấp và mật độ thấp, giá trị pH của bao thể mở Xà Lòi được ước tính theo công thức cân bằng ion trong hệ NaCl–H<sub>2</sub>O–HCl do Liu Bin và nnk. (2004) đề xuất, với các hằng số cân bằng lấy từ Ryzhenko et al. (1980). Với dung dịch có độ muối thấp, có thể thay thế

hoạt độ bằng nồng độ để đơn giản hóa tính toán mà không gây sai số lớn.

$$[H^+]^2 = \frac{K_w}{1 + \frac{\sqrt{m_{NaCl} \cdot K_{NaCl}}}{K_{HCl}}}$$

Trong công thức:

[H<sup>+</sup>]: nồng độ ion hydro (mol/L)

K<sub>w</sub>: hằng số tự phân ly của nước

m<sub>NaCl</sub>: nồng độ mol của NaCl

K<sub>NaCl</sub>, K<sub>HCl</sub>: các hằng số cân bằng tương ứng của NaCl và HCl

Sau khi tính được [H<sup>+</sup>], bạn có thể tính pH bằng:

$$pH = -\log[H^+]$$

**Bảng 3.** Hằng số cân bằng  $K_w$  ở các điều kiện nhiệt độ và áp suất khác nhau (trích từ Ryzhenko và cộng sự năm 1980)

Nhiệt độ (°C)	Log $K_w$ (Áp suất: kbar)				
	P*: Áp suất hơi bão hòa	0.5	1.0	2.0	3.0
25	-13.99				
50	-13.28				
100	-12.27	-12.1			
150	-11.64	-11.45	-11.29		
200	-11.29	-11.05	-10.86	-10.57	
250	-11.19	-10.85	-10.60	-10.27	-9.99
300	-11.41	-10.86	-10.50	-9.98	-9.61
350	-12.30	-11.14	-10.54	-9.98	-9.61
400		-11.88	-10.77	-9.98	-9.54
450			-11.19	-10.7	-9.53
500			-11.81	-10.23	-9.57
550				-11.45	-9.66

**Bảng 4.** Các hằng số cân bằng  $K_{NaCl}$  và  $K_{HCl}$  ở các nhiệt độ khác nhau (trích từ Ryzhenko và cộng sự, Lin Bin)

Nhiệt độ	Log $K_{NaCl}$	Log $K_{HCl}$
25	1.59	6.30
50	1.64	4.81
100	1.39	2.77
150	0.97	1.23
200	0.42	0.06
250	-0.15	-0.67
300	-0.82	-1.24
350	-1.4	

Lưu ý rằng do trong quá trình tính toán gần đúng, ảnh hưởng của áp suất có thể bỏ qua, nên không được liệt kê trong bảng.

Áp suất thành tạo khoáng của giai đoạn khoáng hóa vàng dao động từ 13 đến 42 Mpa. Vì vậy, trong tính toán, các hằng số cân bằng được lấy tương ứng với áp suất 0,5 kbar.

Nhiệt độ đồng nhất của khoáng hóa vàng nằm trong khoảng 136–320°C. Do đó, việc phân loại nhiệt độ tính toán được quy định như sau:

Nếu nhiệt độ đồng nhất nằm trong khoảng 125-175°C, tính theo 150°C

Từ 175-225°C, tính theo 200°C

Từ 225-275°C, tính theo 250°C  
Từ 275-325°C, tính theo 300°C

Lớn hơn 325°C, tính theo 350°C

Thông qua tính toán, giá trị pH của dung dịch khoáng hóa vàng dao động từ 5,9 đến 6,7, với giá trị trung bình khoảng 6,2, cho thấy đặc trưng của dung dịch nhiệt dịch trong môi trường trung tính.

## 5. Thảo luận

Phân tích bao thể trong khoáng vật thạch anh là công cụ quan trọng để tái dựng điều kiện hình thành quặng, bởi chúng lưu giữ trực tiếp thông tin về trạng thái vật lý–hóa học của dung dịch tạo khoáng tại thời điểm kết tinh. Các dữ liệu thu được từ bao thể mỏ vàng Xà Lòi cung cấp cơ sở quan trọng để luận giải cơ chế vận chuyển – kết tủa vàng và bối cảnh kiến tạo liên quan đến quá trình khoáng hóa.

Nhiệt độ đồng nhất (Th) của các bao thể khí-lông dao động từ 180°C đến 370°C, tập trung chủ yếu trong khoảng 240–300°C với giá trị trung bình khoảng 255°C. Dải nhiệt độ này đặc trưng cho các hệ thống nhiệt dịch trung bình đến cao, phù hợp với điều kiện biến chất tương phyllit đến amphibolit thấp (Groves et al., 1998; Goldfarb & Groves, 2015). Trong môi trường như vậy, các dung dịch giàu H<sub>2</sub>O thoát ra từ đá biến chất sâu có thể di chuyển dọc theo các đới đứt gãy nén ép, mang theo vàng dưới dạng phức chloride hoặc hydrosulfua, và kết tủa khi gặp điều kiện áp suất–nhiệt độ thay đổi đột ngột.

Giá trị điểm đóng băng dao động từ –10.3°C đến –1.1°C (phổ biến –5.55 đến –3.05°C), tương ứng với độ muối khoảng 4.97–9.88 wt% NaCl eq., phổ biến khoảng 5–7 wt%. Dải độ muối này phản ánh đặc trưng của dung dịch nghèo muối đến trung bình, khác biệt rõ rệt với các hệ thống nhiệt dịch kiểu porphyry thường giàu muối hơn. Đặc điểm này gợi ý nguồn dung dịch chủ yếu liên quan đến quá trình khử nước của đá biến chất sâu, ít chịu ảnh hưởng của dung dịch magma hoặc nước bề mặt. Sự ổn định tương đối của độ muối trong nhiều mẫu cũng phản ánh tính đồng nhất về thành phần của nguồn dung dịch trong suốt quá trình thành tạo khoáng hóa.

Từ dữ liệu nhiệt độ và độ muối, mật độ dung dịch được tính toán trong khoảng 1.28–1.35 g/cm<sup>3</sup> (trung bình ~1.31 g/cm<sup>3</sup>). Các giá trị này đặc trưng cho hệ dung dịch giàu H<sub>2</sub>O hình thành trong điều kiện nhiệt–áp cao, thường gặp trong các đới đứt gãy dịch trượt sâu. Trong điều kiện áp suất cao, khả năng hòa tan và vận chuyển vàng trong dung dịch tăng đáng kể; khi nguồn dung dịch di chuyển lên trên, sự giảm áp đột ngột sẽ gây mất cân bằng và dẫn tới sự kết tủa vàng đồng thời với các khoáng vật sulfua (pyrit, arsenopyrit, galenit...). Cơ chế này phù hợp với mô hình hình thành mỏ vàng kiểu tạo núi, nơi sự biến động đột ngột của áp suất và nhiệt độ dọc các đới đứt gãy đóng vai trò quyết định đối với quá trình khoáng hóa (Robert et al., 1995; Goldfarb & Groves, 2015).

Áp suất hình thành tính toán theo công thức của Shao Jielian dao động trong khoảng 64.2–70.3 MPa (trung bình ~67 MPa), tương

ứng với độ sâu 4.66–4.95 km. Đây là khoảng độ sâu thường xuất hiện trong các đới biến dạng nén ép sâu, nơi tạo điều kiện thuận lợi cho việc tập trung và lưu giữ dung dịch khoáng hóa. Kết quả phân tích cho thấy dung dịch nhiệt dịch được hình thành trong điều kiện nhiệt độ trung bình đến cao, độ muối thấp, mật độ trung bình và áp suất lớn phản ánh đặc điểm của một hệ thống nhiệt dịch kín, giàu năng lượng và hoạt động trong điều kiện địa động lực mạnh mẽ.

Giá trị pH được ước tính dao động từ 6.22–6.33 (trung bình ~6.27), phản ánh môi trường trung tính yếu, là điều kiện thuận lợi cho sự vận chuyển vàng dưới dạng phức Cl<sup>-</sup> hoặc HS<sup>-</sup> và kết tủa khi có biến đổi nhỏ về pH hoặc Eh. pH ổn định giữa các mẫu cho thấy hệ thống dung dịch duy trì điều kiện hóa học tương đối đồng nhất, ít chịu ảnh hưởng của quá trình oxy hóa hoặc pha trộn nước bề mặt. Mặc dù giá trị pH được tính toán dựa trên hệ NaCl–H<sub>2</sub>O–HCl (Liu Bin et al., 2004; Ryzhenko et al., 1980) chỉ mang tính ước lượng gần đúng, song kết quả vẫn phản ánh rõ xu hướng hóa học của hệ thống dung dịch, phù hợp với đặc điểm thường gặp trong các hệ thống vàng kiểu tạo núi.

Tổng hợp các bằng chứng về nhiệt độ, độ muối, mật độ, áp suất, độ sâu và pH cho thấy hệ thống dung dịch tạo khoáng tại mỏ Xà Lòi mang đặc trưng của kiểu vàng tạo núi hình thành trong điều kiện biến chất trung bình, áp suất cao và kiến tạo nén ép mạnh. Đặc điểm này cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho việc hiểu rõ nguồn gốc và cơ chế hình thành quặng vàng tại khu vực nghiên cứu.

### Kết luận

Nghiên cứu bao thể trong khoáng vật thạch anh tại mỏ vàng Xà Lòi cung cấp những bằng chứng quan trọng về đặc điểm vật lý–hóa học của nguồn dung dịch tạo khoáng. Các bao thể khí-lông có nhiệt độ đồng nhất dao động từ 180°C đến 370°C, tập trung chủ yếu trong khoảng 240–300°C, phản ánh điều kiện nhiệt dịch trung bình đến cao phù hợp với môi trường biến chất sâu. Độ muối của dịch thể tương đối thấp, dao động từ 4.97 đến 9.88 wt% NaCl eq. và phổ biến trong khoảng 5–7 wt%, cho thấy nguồn gốc chủ yếu từ quá trình khử nước của đá biến

chất khu vực, ít chịu ảnh hưởng của dung dịch magma hoặc sự pha trộn với nước bề mặt. Từ dữ liệu nhiệt độ và độ muối, mật độ dung dịch thể được tính toán dao động từ 1.28–1.35 g/cm<sup>3</sup>, giá trị này đặc trưng cho các hệ dung dịch giàu H<sub>2</sub>O hình thành trong điều kiện nhiệt-áp cao. Áp suất thành tạo tính toán trong khoảng 64.2–70.3 MPa, tương ứng với độ sâu ước tính 4.66–4.95 km, cho thấy quá trình khoáng hóa diễn ra trong môi trường ép nén sâu dọc theo các đới đứt gãy sâu, phù hợp với bối cảnh kiến tạo nén ép tại đới Trường Sơn. Ngoài ra, giá trị pH của dung dịch dao động từ 6.22 đến 6.33 (trung bình khoảng 6.27), phản ánh môi trường trung tính yếu, là điều kiện thuận lợi cho sự vận chuyển và kết tủa vàng đồng thời với các khoáng vật sulfua.

Những kết quả này không chỉ góp phần làm sáng tỏ điều kiện hình thành khoáng hóa vàng tại mỏ Xà Lồi mà còn cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho việc xây dựng mô hình sinh khoáng và định hướng đánh giá tiềm năng quặng hóa trong khu vực nghiên cứu.

**Lời cảm ơn:** Bài báo là sản phẩm đề tài cấp Bộ: Nghiên cứu mô hình nguồn gốc và điều kiện thành tạo khoáng hóa vàng phía Nam Lệ Thủy; Mã số: TNMT.ĐL.2024.03.

### Tài liệu tham khảo

**Bodnar, R. J. 1993.** Revised equation and table for determining the freezing point depression of NaCl–H<sub>2</sub>O solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3), 683–684.

Bodnar, R. J. (2003). Introduction to fluid inclusions. *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation, Short Course Series Vol. 32, Mineralogical Association of Canada*, 1–8.

**Đặng Mỹ Cung và nnk, 2010.** Đề án thăm dò vàng và các khoáng sản khác đi kèm khu vực Xà Lồi, Me Xi, Động Chất, xã Vĩnh Ô và Vĩnh Hà, huyện Vĩnh Linh, tỉnh Quảng Trị. *Công ty TNHH Axiom Quảng Trị – Công ty CP Khoáng sản Quảng Trị; Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản, Hà Nội. Lưu trữ tại Trung tâm Lưu trữ – Cục Địa chất và Khoáng sản Việt Nam.*

**Goldfarb, R. J., & Groves, D. I. 2015.** Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*, 233, 2–26.

**Groves, D. I., Goldfarb, R. J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S. G., & Robert, F. 1998.** Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, 13(1–5), 7–27.

**Hall, D. L., Sterner, S. M., & Bodnar, R. J. 1988.** Freezing point depression of NaCl–KCl–H<sub>2</sub>O solutions. *Economic Geology*, 83(1), 197–202.

**Heinrich, C. A. 2007.** Fluid–fluid interactions in magmatic–hydrothermal ore formation. *Elements*, 3, 279–285.

**Liu, Bin et al. 2004.** A new empirical equation for calculating fluid density based on homogenization temperature and salinity. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1), 177–182.

**Pirajno, F. 2009.** Hydrothermal Processes and Mineral Systems. *Springer*.

**Ridley, J., & Diamond, L. W. 2000.** Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits... *Reviews in Economic Geology*, 13, 141–162.

**Robert, F., Poulsen, K. H., & Dubé, B. 1995.** Structural analysis and modeling of brittle fault zones in the Canadian Cordillera: Implications for gold mineralization. *Geological Survey of Canada Bulletin*, 421, 1–120.

**Ryzhenko, B. N., et al. 1980.** Thermodynamic constants of aqueous electrolyte systems at high temperatures. *Geochemistry International*, 17, 1–11.

**Shao, Jielian, 1992.** Ore-forming fluid characteristics and prospecting criteria of gold deposits in China. *Beijing: Geological Publishing House*.

**Sun, F. Y. 1990.** Fluid Inclusion Study. Geological Publishing House, Beijing, 256 p. (in Chinese).

Trần Đình Sâm và nnk. (1999). Đo vẽ bản đồ địa chất và tìm kiếm khoáng sản nhóm tở Vít Thu Lu, tỷ lệ 1:50.000. *Lưu trữ tại Trung tâm Lưu trữ – Cục Địa chất và Khoáng sản Việt Nam, Hà Nội.*

**Trần Đình Sâm và nnk. 1999.** Kết quả tìm kiếm chi tiết hóa điểm vàng gốc khu Xà Lồi – Me Xi, xã Vĩnh Ô, huyện Vĩnh Linh, tỉnh Quảng Trị. *Lưu trữ tại Trung tâm Lưu trữ – Cục Địa chất và Khoáng sản Việt Nam, Hà Nội.*

**Zhang, L., Li, Z., Santosh, M., & Wang, X. 2013.** Geochronology and petrogenesis of granitoids in central Vietnam: Implications for the Indosinian orogeny. *Journal of Asian Earth Sciences*, 70–71, 255–275.

## Summary

### Physico-chemical conditions of Au mineralisation at the Xa Loi deposit, the Central Truong Son Belt, Vietnam: Insights from fluid inclusion studies

Ngo Xuan Dac<sup>1\*</sup>, Trinh Hai Son<sup>1</sup>, Bui The Anh<sup>1</sup>, Nguyen Thanh Tung<sup>1</sup>, Nguyen Thi Hong Hanh<sup>1</sup>,  
Nguyen Duc Thai<sup>1</sup>, Pham Dac Sinh<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources*

\**Corresponding author: nxdac@mae.gov.vn*

A fluid inclusion study of quartz from the Xa Loi gold deposit in Vinh Ô commune, Vinh Linh district, Quang Tri province, located in the Truong Son belt of central Vietnam, was conducted to elucidate the physicochemical conditions of the hydrothermal fluids responsible for gold mineralization. The fluid inclusions are dominated by liquid–vapor types, with homogenization temperatures ranging from 180°C to 370°C and clustering mainly between 240°C and 300°C, indicating medium- to high-temperature hydrothermal conditions consistent with deep metamorphic environments. The fluid salinities vary from 4.97 to 9.88 wt% NaCl equivalent (commonly 5–7 wt%), and the calculated fluid densities range from 1.28 to 1.35 g/cm<sup>3</sup> (average 1.31 g/cm<sup>3</sup>), suggesting low- to medium-salinity, H<sub>2</sub> O-rich fluids formed under high-temperature and high-pressure conditions. The trapping pressures are estimated at 64.2–70.3 MPa, corresponding to depths of 4.66–4.95 km, while the pH values range from 6.22 to 6.33 (average 6.27), indicating a slightly neutral environment favorable for the transport and precipitation of gold together with sulfide minerals.

These characteristics indicate that the ore-forming fluids at Xa Loi exhibit typical features of orogenic gold systems, formed under medium-grade metamorphic conditions, high pressures, and intense compressional tectonics. The results not only shed light on the source and mechanisms of gold deposition at the Xa Loi deposit but also provide a scientific basis for guiding exploration for gold mineralization within the Truong Son belt.

**Keywords:** *Fluid inclusion, Xa Loi Gold Deposit, Orogenic gold Deposit*