DầuKhí
KHOA HỌC, CÔNG NGHỆ VÀ ĐỔI MỚI SÁNG TẠO PETROVIETNAM

LƯU TRỮ CO_2 TRONG CÁC THÀNH TẠO ĐỊA CHẤT VÀ ĐÁNH GIÁ TIỀM NĂNG LƯU TRỮ CO_2 Ở VIỆT NAM

Nguyễn Quang Tuấn, Bùi Huy Hoàng, Đỗ Mạnh Toàn, Nguyễn Hoàng Anh
Viện Dầu khí Việt Nam
Email: tuannq@vpi.pvn.vn
https://doi.org/10.47800/PVSI.2023.01-01

Tóm tắt

Trong số các biện pháp giảm phát thải, việc lưu trữ CO_2 trong các thành tạo địa chất (CCS) đã và đang trở thành phương pháp được quan tâm. CCS bao gồm 4 giai đoạn: thu giữ, vận chuyển, lưu trữ và theo dõi CO_2 dưới lòng đất để đảm bảo lưu trữ an toàn và lâu dài. Các cơ chế để lưu trữ CO_2 trong các địa tầng dưới sâu bao gồm cơ chế vật lý và hóa học/địa hóa. Đối tượng lưu trữ CO_2 phù hợp là các mỏ dầu khí cạn kiệt, các tầng chứa nước mặn, tầng đá basalt hoặc vỉa than không thể khai thác bằng phương pháp thông thường. Bài báo cập nhật hiện trạng nghiên cứu và triển khai CCS trên thế giới, khu vực Đông Nam Á và ở Việt Nam, đồng thời giới thiệu kết quả nghiên cứu về tiềm năng lưu trữ CO_2 ở Việt Nam.

Từ khóa: Lưu trữ CO_2, thành tạo địa chất.

1. Giới thiệu

Biến đổi khí hậu đang là vấn đề thu hút sự quan tâm của các quốc gia trên thế giới, trong đó có Việt Nam. Hậu quả của biến đổi khí hậu là tình trạng nóng lên toàn cầu, băng tan ở 2 cực khiến nước biển dâng với tốc độ ngày càng cao, thiên tai ngày càng gia tăng cả về tần suất lẫn cường độ... Theo Ủy ban Liên chính phủ về Biến đổi Khí hậu (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC), CO_2 chiếm tới 60% nguyên nhân của sự nóng lên toàn cầu. Nồng độ CO_2 trong khí quyển đã tăng 28%, từ 288 ppm lên 366 ppm trong giai đoạn 1850 – 1998, và hiện nay nồng độ CO_2 tăng khoảng 10% trong chu kỳ 20 năm [1]. Vì thế, giảm thiểu và loại bỏ CO_2 đã trở thành mục tiêu chính nhằm giảm phát thải khí nhà kính, dưới các hình thức như: giảm phát thải CO_2, hoặc thu giữ và chuyển hóa CO_2 thành các hợp chất hữu ích (CCU), hoặc thu giữ và lưu trữ CO_2 (trong các tầng địa chất sâu dưới lòng đất an toàn và lâu dài). CCU bao gồm việc thu giữ CO_2 và chuyển đổi thành các dạng vật chất như bê tông, vật liệu tổng hợp, nhiên liệu, polymer, hóa học thực phẩm... [2]. Mặc dù đã có tiến bộ trong CCU, nhưng các lộ trình sử dụng đều tốn nhiều năng lượng, giá thành cao hoặc thị trường quy mô nhỏ. Cho đến nay, việc triển khai CCU trên quy mô lớn vẫn cần nghiên cứu và phát triển đáng kể vì các công nghệ chủ yếu vẫn đang trong giai đoạn thử nghiệm [3].

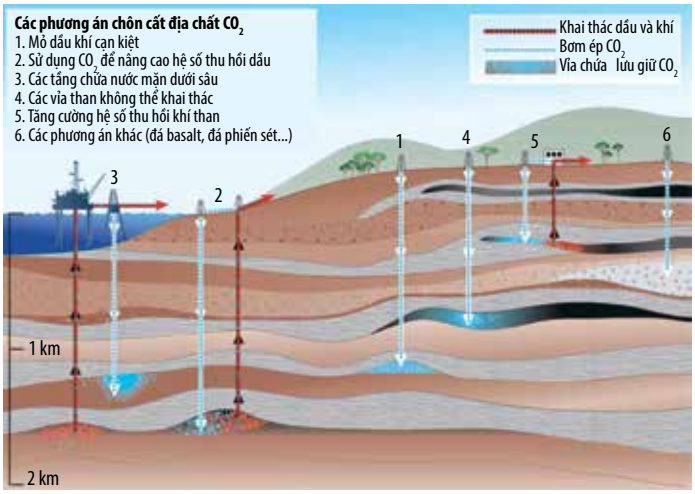
Ngày nhận bài: 29/12/2022. Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa: 29/12/2022 - 14/2/2023. Ngày bài báo được duyệt đăng: 28/11/2023.

Ngược lại, với công nghệ hiện tại, việc phân tách CO_2 từ các nguồn phát thải khác nhau có khả năng thực hiện ở quy mô lớn, việc lưu trữ CO_2 trong các thành tạo địa chất được cho là an toàn và đã được áp dụng ở nhiều nơi trên thế giới. Do vậy, đây là phương pháp có triển vọng cho việc giảm thiểu lượng khí thải CO_2. Một số nhà nghiên cứu sử dụng thuật ngữ CCUS để bao gồm cả CCU và CCS [2].

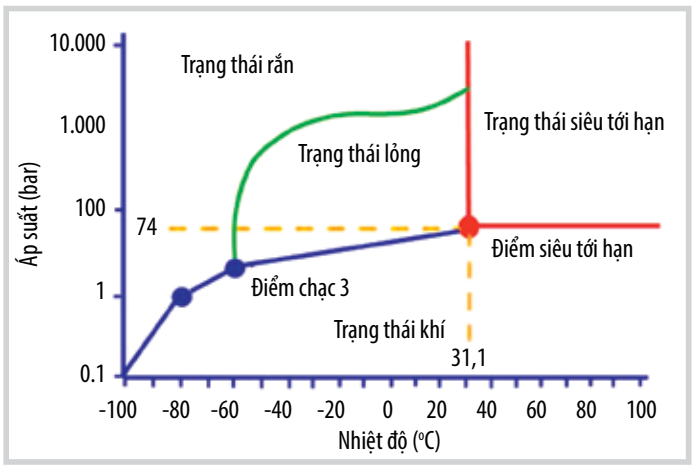
Quá trình CCS bao gồm 4 giai đoạn chính [4]: (i) Giai đoạn thu giữ: thu giữ CO_2 từ các nguồn khác nhau, khử nước, lọc tạp chất và nén CO_2; (ii) Giai đoạn vận chuyển: vận chuyển CO_2 bằng xe bồn, đường ống hoặc tàu biển đến địa điểm lưu trữ phù hợp; (iii) Giai đoạn lưu trữ: bơm ép CO_2 vào tầng chứa dưới lòng đất để lưu trữ an toàn và lâu dài; (iv) Giai đoạn đo lường, giám sát và theo dõi để đảm bảo việc lưu trữ được an toàn và lâu dài dưới lòng đất (hàng nghìn đến hàng triệu năm). Địa điểm lưu trữ CO_2 phù hợp là các thành tạo/cấu trúc địa chất dưới sâu như: các mỏ dầu, mỏ khí cạn kiệt, các vỉa than sâu không thể khai thác, các vỉa sét giàu vật chất hữu cơ, các tầng nước mặn sâu, các tầng đá basalt… [5] (Hình 1). Các đối tượng này đã và đang được chú trọng đầu tư nghiên cứu và triển khai nhiều dự án trên khắp thế giới, cho phép con người tiếp tục sử dụng nguyên liệu hóa thạch (dầu, khí, than) trong lúc tìm kiếm nguồn năng lượng sạch

có khả năng tái tạo thay thế cũng như cải thiện hiệu quả sử dụng năng lượng [6].

Cơ quan Năng lượng Quốc tế (IEA) ước tính đến năm 2050, để giảm phát thải ròng CO_2 về 0, cần thu giữ khoảng 7,6 tỷ tấn CO_2 mỗi năm, trong đó 95% tổng lượng CO_2 thu được vào năm 2050 cần được lưu trữ địa chất vĩnh viễn, 5% sẽ được sử dụng để tạo ra các nguyên liệu tổng hợp hoặc tạo ra các sản phẩm khác. Hiện tại, khối lượng CO_2 lưu trữ trên toàn thế giới chỉ đạt khoảng 43 triệu tấn/năm [7]. Ở Việt Nam, Chính phủ đã phê duyệt Thỏa thuận Paris về biến đổi khí hậu ngày 31/10/2016. Đồng thời với việc phê duyệt Thỏa thuận, Việt Nam đã ban hành Kế hoạch thực hiện Thỏa thuận Paris và là 1 trong những nước đang phát triển đầu tiên thực hiện được việc này. Tại Hội nghị COP26, Thủ tướng Chính phủ Việt Nam đã cùng 148 quốc gia cam kết đưa phát thải ròng về "0" vào năm 2050. Để thực hiện các cam kết tại COP26, theo ước tính sơ bộ, Việt Nam cần phải thu giữ khoảng 300 triệu tấn CO_2 mỗi năm vào 2050 [8], trong đó lưu trữ CO_2 trong các thành tạo địa chất sẽ có đóng góp quan trọng để đạt được mục tiêu này. Bài báo tập trung vào cơ chế lưu giữ CO_2 trong các thành tạo địa chất, các quá trình vật lý và hóa học liên quan, hiện trạng nghiên cứu và triển khai các dự án lưu trữ CO_2 trên thế giới và Việt Nam.



Hình 1. *Các phương án khác nhau để lưu trữ lâu dài CO_2 trong các thành tạo địa chất.*



Hình 2. *Giản đồ pha của CO_2 phụ thuộc nhiệt độ và áp suất.*

2. Các cơ chế lưu trữ dài hạn CO_2 trong các thành tạo địa chất

Tại điều kiện khí quyển bình thường, khí CO_2 rất bền về mặt nhiệt động học và nặng hơn không khí. Tại nhiệt độ (T) lớn hơn 31,18°C và áp suất (P) lớn hơn 73,8 bar (hay 1.057 psi) CO_2 đạt tới trạng thái "siêu tới hạn" [9] (Hình 2). Ở trạng thái này, mật độ CO_2 như chất lỏng, có thể lấp đầy các thể tích rỗng, nhưng có độ nhớt như chất khí. Ưu điểm khi ở trạng thái này là thể tích cần lưu trữ nhỏ hơn rất nhiều so với lưu trữ CO_2 ở điều kiện áp suất tiêu chuẩn. Dưới lòng đất, điều kiện nhiệt độ và áp suất đủ để CO_2 có thể tồn tại ở trạng thái siêu tới hạn là từ độ sâu tương đương khoảng 800 m trở lên. Ở độ sâu này mật độ CO_2 có thể dao động trong khoảng 320 - 700 kg/m^3 tùy thuộc vào gradient địa nhiệt, áp suất thủy tĩnh và độ mặn của nước. CO_2 siêu tới hạn có mật độ thấp hơn nước thành hệ khoảng 30 - 40% trong cùng điều kiện, do vậy CO_2 sẽ có xu hướng di chuyển lên trên bằng lực nổi (buoyancy) cho đến khi bị giữ lại bằng các cơ chế bẫy khác nhau [9]. Như vậy, yêu cầu đầu tiên để lưu trữ hiệu quả là CO_2 phải ở trạng thái "siêu tới hạn", và độ sâu để đạt trạng thái này ít nhất là từ 800 m trở lên tùy thuộc vào các điều kiện địa chất khác nhau.

Các đối tượng dưới sâu có tiềm năng chứa CO_2 được xem xét đầu tiên là đá trầm tích. Đá trầm tích được tạo bởi sự tích tụ và gắn kết của các mảnh vụn đá, khoáng vật kết tinh và vật chất hữu cơ trong quá trình trầm tích và thành đá. Trong đá đã gắn kết tồn tại các khoảng trống (lỗ rỗng) giữa các hạt vụn (trong trường hợp đá trầm tích vụn), lỗ rỗng trong hạt và hang hốc (trường hợp đá carbonate), hoặc khe nứt do kiến tạo, dập vỡ. Các khoảng trống này thường được chiếm giữ bởi chất lưu (chủ yếu là nước và đôi khi là dầu và khí) [10]. Khi được bơm vào các lỗ rỗng hay khe nứt của một thành tạo địa chất có độ thấm, CO_2 có thể thay thế chất lưu có từ trước, hoặc hòa tan, trộn lẫn với chất lưu, hoặc phản ứng hóa học với các khoáng vật trong đá vây quanh, hoặc kết hợp tất cả các quá trình này. Có thể chia thành 2 cơ chế lưu trữ CO_2 là vật lý và hóa học/địa hóa (Hình 3) [5].

2.1. Cơ chế bẫy vật lý

2.1.1. Bẫy cấu trúc và bẫy địa tầng

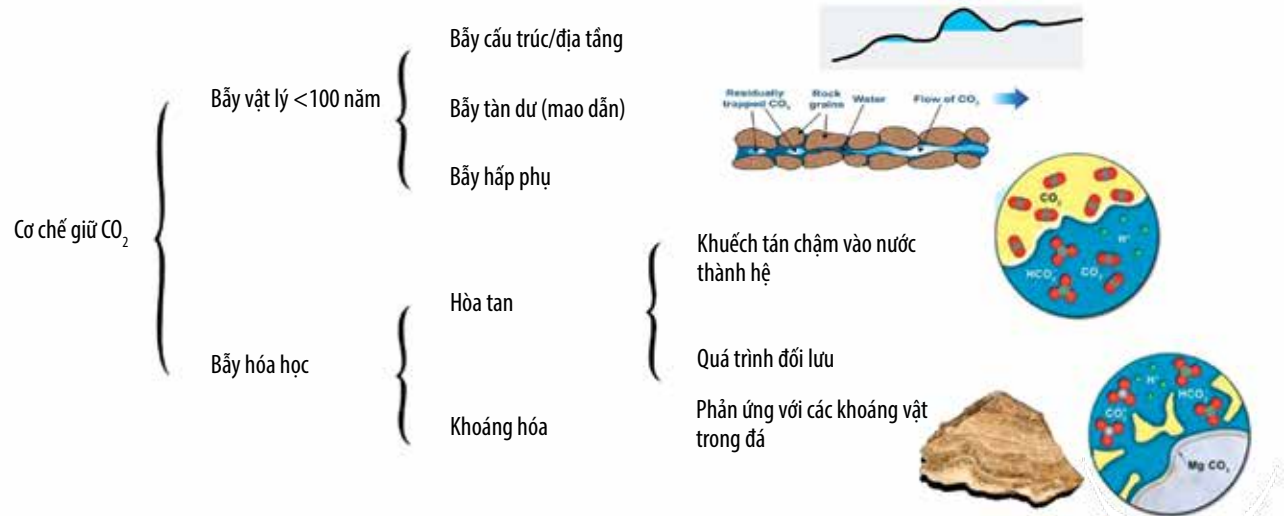
Trong và sau quá trình bơm ép CO_2 xuống vỉa chứa, CO_2 có xu hướng dịch chuyển lên trên và dịch chuyển ngang, đi theo những nơi có độ rỗng và độ thấm tốt do lực nổi của CO_2. Lực nổi này gây ra bởi tỷ trọng của CO_2 ở trạng thái siêu tới hạn thấp hơn tỷ trọng của nước thành hệ. Bẫy cấu trúc chứa CO_2 là một cấu trúc địa chất có khả năng chứa và khép kín, nghĩa là nằm bên dưới một tầng chắn, có thể cả chắn nóc và chắn sườn (chắn đứt gãy). Tầng chắn gồm các loại đá có độ rỗng và độ thấm rất thấp để ngăn CO_2 đi qua và di thoát lên trên như đá sét, đá anhydrite, đá muối, đá phấn, hay đá carbonate thềm. Các bẫy cấu trúc hình thành do các quá trình kiến tạo như uốn nếp, đứt gãy, xoay khối cấu trúc, lớp phủ trên địa hình tàn dư… Còn bẫy địa tầng thành tạo do sự vát mỏng thạch học của đá chứa, xuất phát từ sự thay đổi tướng và môi trường trầm tích theo chiều thẳng đứng lẫn chiều ngang [11]. Cả 2 loại bẫy địa tầng này đều phù hợp để lưu trữ CO_2 lâu dài.

2.1.2. Bẫy tàn dư (mao dẫn)

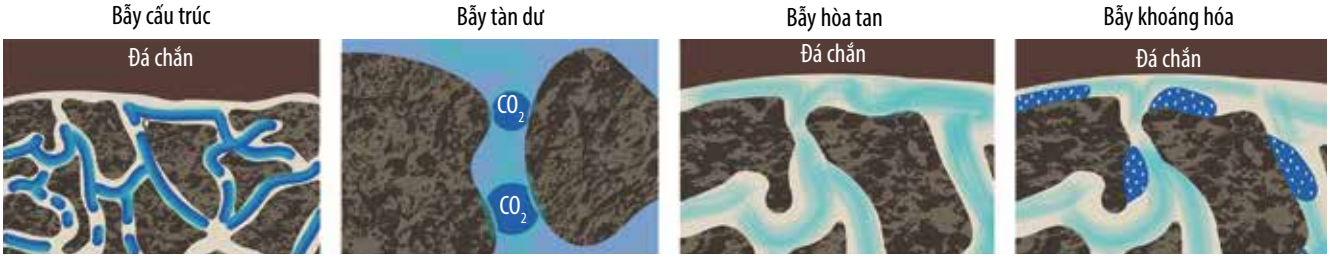
Trong quá trình di chuyển của CO_2 trong các vỉa chứa, một lượng CO_2 có thể bị giữ lại trong các lỗ rỗng và không thể tiếp tục di chuyển (Hình 4). Nguyên nhân là do sức căng bề mặt giữa CO_2 và nước thành hệ trong lỗ rỗng gây ra lực mao dẫn cao hơn so với lực nổi của CO_2, có tác dụng ngăn chặn sự di chuyển của CO_2. Hiện tượng này thường gặp trong các đá có lực mao dẫn không đồng nhất. Các nghiên cứu gần đây cho thấy bẫy tàn dư là cơ chế hiệu quả để giữ CO_2 dưới lòng đất trong thời gian dài và ở quy mô lớn so với các cơ chế bẫy khác [13]. Khi dòng CO_2 di chuyển ra xa khỏi vùng áp suất cao tại giếng bơm ép, bẫy tàn dư trở nên đặc biệt quan trọng, giữ CO_2 lại từng ít một dọc theo đường đi. Mặc dù xảy ra ở cấp độ vi mô, nhưng tổng lượng CO_2 bị giữ lại bởi cơ chế này trở nên đáng kể ở quy mô vỉa chứa khi vỉa có độ dày hàng chục mét và trên diện tích hàng trăm km^2 [11].

2.1.3. Bẫy dạng hấp phụ

Bẫy dạng hấp phụ là cơ chế giữ CO_2 quan trọng đối với các vỉa than hoặc sét kết có hàm lượng vật chất hữu cơ cao. Vì than có ái lực hấp phụ với CO_2 cao hơn so với CH_4 [14], nên khi được bơm vào các vỉa than hoặc đá sét có chứa methane (CH_4), CO_2 sẽ thay thế khí CH_4 bị giữ lại về mặt hóa học do bị hấp phụ (hoặc bám dính) trên bề mặt than/vật chất hữu cơ. CH_4 được giải phóng ra và có thể khai thác lên.



Hình 3. *Tổng hợp các cơ chế lưu giữ CO_2 trong các địa tầng địa chất sâu [5].*



Hình 4. *Cơ chế lưu trữ CO_2 trong bẫy địa tầng trong và sau khi bơm ép xuống vỉa chứa [12].*

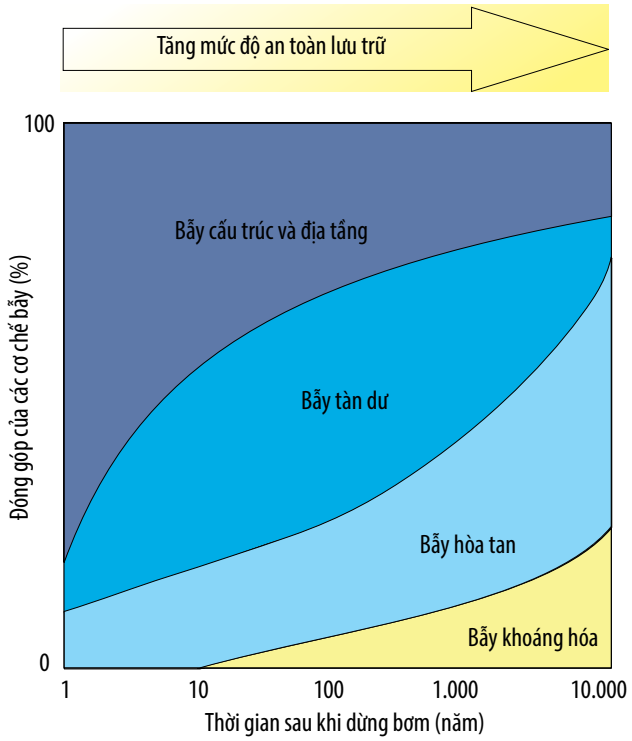
2.2. Bẫy hóa học

2.2.1. Bẫy hòa tan

CO_2 dưới lòng đất theo thời gian có thể trải qua một chuỗi các tương tác hóa học với đá và nước ngầm để làm tăng khả năng và hiệu quả lưu trữ. CO_2 có thể hòa tan trong nước ngầm (Hình 4), mức độ hòa tan phụ thuộc vào nhiều yếu tố, chủ yếu là áp suất, nhiệt độ và độ mặn của nước thành hệ. Mức độ hòa tan tăng khi áp suất tăng (theo độ sâu) nhưng giảm khi nhiệt độ và độ mặn tăng. Lợi ích chủ yếu của bẫy hòa tan là CO_2 hòa tan với nước và không còn tồn tại 2 pha riêng rẽ, vì vậy loại bỏ lực nổi làm CO_2 di chuyển lên trên bề mặt, giảm rủi ro CO_2 bị thất thoát. Nhiều nhà nghiên cứu cho rằng khi hòa tan, tỷ trọng của "CO_2 + nước" sẽ cao hơn so với "CO_2 chưa hòa tan", do vậy "CO_2 + nước" sẽ lại bị chìm dần xuống dưới trong khi CO_2 ở pha riêng rẽ nhẹ hơn vẫn tiếp tục nổi lên từ giếng bơm ép, kết quả là tạo ra dòng đối lưu CO_2 trong vỉa chứa [5].

2.2.2. Bẫy khoáng hóa

Cơ chế bẫy này xảy ra khi CO_2 hòa tan trong nước muối thành hệ phản ứng với các khoáng chất trong đá và trong nước vỉa tạo thành các khoáng vật carbonate bền vững (Hình 4). Cụ thể, CO_2 hòa tan trong nước tạo thành acid carbonic yếu (H_2CO_3), sau đó phản ứng với khoáng vật trong đá tạo thành ion bicarbonate (HCO_3) và kết hợp với các cation khác nhau tùy thuộc vào thành phần của đá. Ví dụ, magnesium (Mg) trong đá chứa kết hợp với CO_3 trong nước để tạo ra khoáng chất $MgCO_3$ trên bề mặt hạt vụn. Quá trình phản ứng và khoáng hóa được cho là xảy ra chậm chạp, có thể từ vài chục năm tới 1.000 năm hay lâu hơn. Tuy nhiên, tính ưu việt của cơ chế bẫy này là khả năng lưu trữ CO_2 vĩnh viễn và an toàn hơn rất nhiều so với các cơ chế lưu trữ khác đã trình bày ở trên [11].



Hình 5. *Sự an toàn theo thời gian của các bẫy lưu trữ CO_2. Mức độ an toàn lưu trữ CO_2 phụ thuộc vào sự kết hợp của các cơ chế bẫy vật lý và địa hóa. Theo thời gian, bẫy hòa tan và bẫy khoáng hóa sẽ gia tăng sự đóng góp trong việc lưu trữ CO_2 lâu dài và an toàn.*

Ở giai đoạn đầu của quá trình bơm ép xuống các vỉa chứa dưới lòng đất, CO_2 ở trạng thái siêu tới hạn sẽ bị giữ lại bên dưới các tầng chắn có độ thấm thấp theo cơ chế bẫy cấu trúc/địa tầng và bẫy tàn dư. Theo thời gian, CO_2 hòa tan dần vào thành hệ nước theo cơ chế bẫy hòa tan, CO_2 cũng có thể phản ứng trực tiếp hoặc gián tiếp với các khoáng chất và chất hữu cơ trong các đá chứa tạo thành khoáng vật bền vững - bẫy khoáng hóa (Hình 5) [15]. Hiệu quả của việc lưu trữ địa chất phụ thuộc vào sự kết hợp của các cơ chế bẫy vật lý và hóa học, và liên quan trực tiếp đến đặc điểm của các thành tạo đá chứa. Phương pháp và vị trí lưu trữ hiệu quả nhất là những nơi CO_2 không thể di động mà bị giữ lại dưới tầng chắn có độ thấm thấp hoặc được chuyển đổi về mặt hóa học thành khoáng vật rắn, hoặc được hấp phụ trên bề mặt của than hoặc kết hợp giữa cơ chế bẫy vật lý và hóa học [10].

3. Các đối tượng địa chất phù hợp để lưu trữ CO_2

Một địa điểm lưu trữ địa chất CO_2 phải có thể tích chứa phù hợp và khả năng bơm ép phù hợp với nguồn cung CO_2, có các tầng chắn tốt và ổn định về mặt địa chất (không có động đất, núi lửa, đứt gãy hoạt động,... làm phá hủy tầng chứa và tầng chắn) để tránh các ảnh hưởng xấu đến tính toàn vẹn của địa điểm lưu trữ. Các đối tượng địa chất phù hợp để lưu trữ CO_2 trong thời gian dài đã được nghiên cứu và thử nghiệm, cũng như phát triển ở quy mô công nghiệp ở nhiều nơi trên thế giới gồm [16]:

- Các mỏ dầu và khí cạn kiệt hoặc đang khai thác mà qua đó có thể tăng cường hệ số thu hồi dầu và khí (CO_2 - EOR và CO_2 - EGR) (Hình 1);
- Các tầng chứa nước mặn dưới sâu (Hình 1);
- Các tầng đá basalt (Hình 1);
- Các vỉa than sâu không thể khai thác và hoặc tăng cường thu hồi khí CH_4, hay các tầng sét giàu vật chất hữu cơ (Hình 1).

3.1. Các mỏ dầu khí cạn kiệt và tăng cường hệ số thu hồi (CO_2 - EOR, CO_2 - EGR)

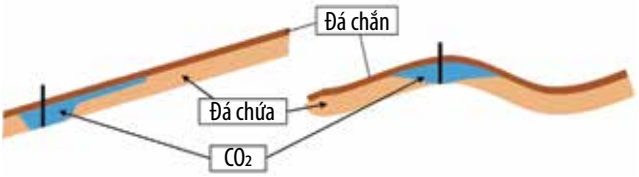
Hiện nay, các mỏ chứa khí và dầu đã cạn kiệt hoặc đang khai thác là đối tượng lựa chọn hàng đầu để lưu trữ CO_2 bởi nhiều lý do: (1) Dầu và khí đã được tích tụ trong các bẫy (cấu trúc và/hoặc bẫy địa tầng) không thể thoát ra được trong thời gian rất dài (hàng triệu năm), vì vậy các bẫy này đã được chứng minh về tính toàn vẹn và đảm bảo an toàn cho lưu trữ CO_2; (2) Các đặc điểm địa chất và đặc điểm đá chứa, tính chất vỉa chứa, đặc điểm đá chắn, chất lưu… của các mỏ dầu khí đã được nghiên cứu và mô tả đầy đủ trong quá trình khai thác dầu khí, bao gồm cả thể tích chứa; (3) Các mô hình địa chất, mô hình khai thác sẵn có để dự báo sự di chuyển, cũng như của hydrocarbon trong bẫy; (4) Cơ sở hạ tầng và giếng khai thác sẵn có trong khu vực mỏ có thể chuyển đổi và sử dụng cho các hoạt động lưu trữ CO_2; và (5) Nếu các mỏ dầu khí vẫn còn đang khai thác, thì quá trình bơm ép CO_2 có thể được kết hợp làm tăng khả năng thu hồi dầu hoặc khí.

Đối với các mỏ dầu khí đang ở giai đoạn suy giảm khai thác: Trong số các biện pháp để nâng cao hệ số thu hồi, CO_2 được coi là lựa chọn phù hợp nhất vì có thể làm giảm độ nhớt của dầu, giảm sức căng bề mặt giữa dầu và nước, làm tăng khả năng dịch chuyển của dầu về giếng khai thác và cũng rẻ hơn so với khí tự nhiên hóa lỏng. Ngoài ra, CO_2 - EOR, và CO_2 - EGR có một điểm thuận lợi nữa là mang lại lợi ích về mặt kinh tế, có thể bù đắp chi phí lưu trữ CO_2.

Nhược điểm của tầng chứa dầu khí cạn kiệt là thường có áp suất thấp (suy giảm trong quá trình khai thác), có thể dẫn tới hiệu ứng làm lạnh Joule-Thomson, làm giảm nhiệt độ tầng chứa, hình thành hydrate, làm đông cứng phần nước dư và làm hỏng giếng bơm, đặc biệt khi CO_2 lạnh được bơm xuống. Do vậy, cần bơm CO_2 có nhiệt độ cao hoặc tốc độ dòng bơm cao. Nhược điểm thứ hai là thể tích lưu giữ thường nhỏ hơn nhiều lần so với đối tượng tầng chứa nước mặn sâu do bị giới hạn trong cấu trúc khép kín của mỏ.

3.2. Các tầng chứa nước mặn sâu

Các tầng chứa nước mặn sâu là các lớp đá trầm tích có độ rỗng, độ thấm tốt và bão hòa với nước mặn (nước muối). Những thành tạo này có thể được tìm thấy trong các bể trầm tích trên bờ và ngoài biển, thường là các đá cát kết, hay đá carbonate. Tầng ngậm nước này thường nhiễm mặn và không phù hợp cho các mục đích sử dụng trong công nghiệp, nông nghiệp và sinh hoạt [21]. CO_2 siêu tới hạn được bơm vào vỉa chứa và được giữ lại an toàn



Hình 6. *Sơ đồ mô tả sự khác nhau giữa lưu trữ CO_2 trong tầng chứa nước mặn sâu (hình bên trái) và mỏ cạn kiệt (hình bên phải). Ở bên trái, CO_2 có thể di chuyển bên dưới tầng chắn để thoát lên trên, cơ chế bẫy mao dẫn là cơ chế chính giữ CO_2 lâu dài. Hình bên phải là một cấu trúc khép kín dạng nếp lồi cơ chế giữ CO_2 chính là bẫy cấu trúc/địa tầng [23].*

dưới lòng đất thông qua các cơ chế bẫy vật lý và bẫy hóa học. Khi được bơm ép xuống tầng chứa, CO_2 nhẹ hơn nước mặn và có xu hướng dịch chuyển lên trên nóc của tầng chứa và dịch chuyển ngang ra khỏi tầng chứa. Do đó, vẫn cần thiết phải có các tầng chắn địa phương và tầng chắn mang tính khu vực nằm trên các tập đá chứa để ngăn CO_2 tiếp tục di chuyển lên trên và rò rỉ khỏi mặt đất [21]. Việc lựa chọn vị trí địa chất để lưu trữ CO_2 trong tầng chứa nước mặn sâu phải đáp ứng 3 điều kiện cơ bản: sức chứa, khả năng bơm ép và sự toàn vẹn để ngăn không cho CO_2 bị rò rỉ lên mặt đất. Yêu cầu về sức chứa để đảm bảo rằng vị trí được lựa chọn có đủ độ rỗng và diện tích lớn để lưu được trữ lượng CO_2 lớn và trong thời gian dài. Khả năng bơm ép phải đảm bảo bơm ép xuống thể tích CO_2 ổn định và lâu dài phù hợp với nguồn cung cấp CO_2.

Điểm thuận lợi của đối tượng tầng chứa nước mặn sâu là có quy mô và diện tích phân bố lớn hơn rất nhiều so với các mỏ dầu khí cạn kiện, hay vỉa than không thể khai thác, do vậy có ưu thế rất lớn về khả năng lưu trữ [22]. Tuy nhiên nhược điểm của đối tượng này là khó kiểm soát sự di chuyển và sự ổn định của CO_2 so với lưu trữ trong mỏ cạn kiệt, do quy mô của các tầng chứa lớn và tính không khép kín. Do vậy, cần giám sát cẩn thận và lâu dài động thái của CO_2 sau khi bơm ép [22]. Hơn nữa mức độ tài liệu về địa chất, địa vật lý và đặc điểm đá chứa, chắn, mô hình địa chất không đầy đủ so với các mỏ cạn kiệt, đòi hỏi nhiều thời gian và nhiều nghiên cứu hơn khi tiến hành lựa chọn vị trí và đối tượng để lưu trữ. Cơ sở hạ tầng, giếng khoan bơm ép, thiết bị bề mặt, hay đường ống vận chuyển cũng không đầy đủ cũng làm gia tăng chi phí và tốn kém hơn so với các mỏ đã cạn kiệt.

Lưu giữ CO_2 trong các vỉa dầu và khí có rất nhiều điểm tương đồng với lưu trữ CO_2 trong tầng chứa nước mặn sâu do cấu tầng đá chứa, đá chắn và nước vỉa có mặt trong cả 2 trường hợp. Hình 6 mô tả sự giống nhau và khác nhau giữa 2 đối tượng lưu trữ này.

3.3. Đá basalt

Đá basalt hình thành do các hoạt động phun trào núi

lửa. Trên đất liền và vùng vỏ lục địa, đá basalt phát triển rộng khắp ở các tỉnh basalt lũ như ở khu vực Tây Nguyên - Nam Trung Bộ Việt Nam. Basalt cũng là thành phần chính của vỏ đại dương vùng biển và đại dương nước sâu do hoạt động phun trào dọc theo sống núi đại dương. Các thành hệ phun trào basalt thường gồm nhiều tập (nhiều đợt) phun trào mà phần trên cùng và dưới cùng của các tập này có thể là các lớp basalt dạng bọt có độ rỗng và độ thấm tốt [17] có thể dùng để lưu trữ CO_2. Thành phần khoáng vật của đá basalt rất phù hợp để lưu trữ vĩnh viễn CO_2 do đá basalt chứa 45 - 85% các khoáng vật mafic, chủ yếu là pyroxene và olivine. Các khoáng vật này chứa magnesium, sắt và calcium, có khả năng phản ứng với CO_2 hình thành nên các khoáng vật carbonate bền vững ở thể rắn [18] (Hình 7). Phương trình phản ứng giữa các khoáng vật này với CO_2 có thể diễn ra như sau:

$$Mg_2SiO_4 + 2CO_2 = 2MgCO_3 + SiO_2$$
$$FORSTERITE \quad MAGNESITE \ QUARTZ$$

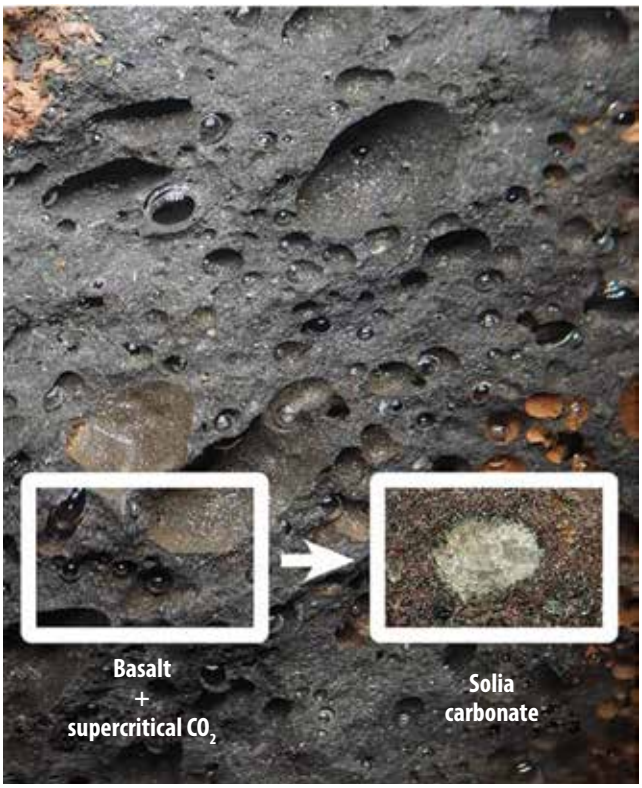
và

$$CaAl_2Si_2O_8 + CO_2 + 2H_2O = CaCO_3 + Al_2Si_2O_5(OH)_4$$
$$ANORTHITE \quad CALCITE \quad KAOLINITE$$

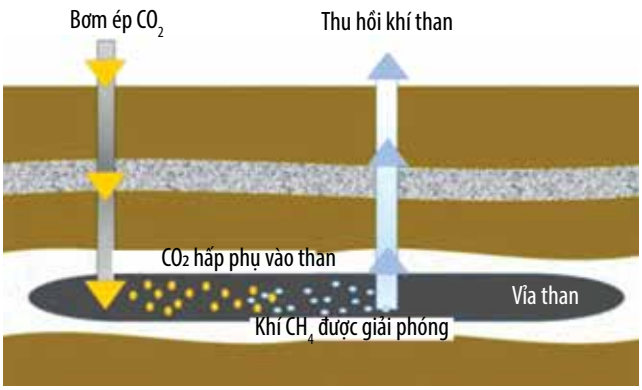
CO_2 có thể được bơm trực tiếp, hoặc hòa với nước trước khi bơm vào tầng chứa basalt. Phương pháp bơm CO_2 hòa tan với nước có ưu điểm là khi CO_2 đã hòa tan thì không còn ở dạng khí, do đó yêu cầu về tầng chắn không khắt khe bằng phương pháp bơm CO_2 tinh khiết. Ngoài ra, quá trình hòa tan CO_2 trong nước cũng thúc đẩy nhanh tốc độ phản ứng hóa học giữa CO_2 với khoáng vật mafic trong basalt, do đó tăng hiệu quả lưu trữ vĩnh viễn [19]. Nhược điểm của phương pháp này là cần lượng nước lớn, chiếm khoảng 95% hỗn hợp "nước + CO_2", do đó chỉ khả thi khi gần các nguồn nước lớn như biển, hồ lớn, hoặc sông. Ngoài ra, đối với đối tượng basalt biển sâu (> 2.700 m), CO_2 còn có thể hình thành hydrate trong điều kiện nhiệt độ và áp suất thích hợp, giúp lưu trữ vĩnh viễn ở dạng rắn [20]. Tuy vậy, ý tưởng này còn ở giai đoạn sơ khai, chưa khả thi do điều kiện công nghệ và chi phí.

3.4. Các vỉa than không thể khai thác và các tầng sét giàu vật chất hữu cơ

Các vỉa than được coi là không thể khai thác được do các yếu tố địa chất, công nghệ và kinh tế (thường là quá sâu, quá mỏng hoặc vỉa không liên tục) [10]. Các vỉa than thường chứa các loại khí, đặc biệt là khí CH_4. Khí được giữ dưới dạng hấp phụ trong các lỗ hổng trên bề mặt than và trong những khe nứt nẻ của vỉa than. Khi được bơm vào các vỉa than, CO_2 sẽ hấp phụ (hoặc bám dính) và thay thế CH_4 trong than; CH_4 được giải phóng ra và sau đó có thể sẽ được thu hồi như là chất khí tự do. Do vậy, các vỉa than có chứa hàm lượng CH_4 cao có thể được khai thác cùng với việc bơm ép CO_2 vào vỉa trong quy trình được gọi là tăng cường khai thác khí than (ECBM) (Hình 8). Với kỹ thuật này, hệ số thu hồi CH_4 có thể đạt tới 90%, thậm chí là lớn hơn [14]. Cơ chế bẫy này cho phép lưu trữ CO_2 ổn định vĩnh viễn. Tuy nhiên, để lưu trữ được CO_2, vỉa than phải có đủ độ thấm để bơm ép CO_2, và khác với lưu trữ CO_2 trong các tầng sâu chứa nước mặn hoặc trong mỏ dầu khí, mật độ lưu trữ, hay khả năng lưu trữ CO_2 trong than lớn nhất là ở độ sâu dưới 600 - 1.500 m, khi CO_2 ở trong pha khí, không phải pha siêu tới hạn. Một điểm thuận lợi của ECBM là



Hình 7. *Kết hạch carbonate hình thành trong quá trình lưu trữ CO_2 trong tầng basalt dạng bọt. Nguồn: Pacific Institute for Climate Solution (PICS).*



Hình 8. *Nguyên lý của quá trình nâng cao hệ số thu hồi CH_4 trong các vỉa than và lưu trữ CO_2 [14].*

mang lại hiệu quả kinh tế từ việc khai thác khí CH_4 để bù đắp chi phí lưu trữ CO_2.

4. Theo dõi và giám sát động thái của CO_2 trong và sau quá trình bơm ép

Cần phải áp dụng các biện pháp kỹ thuật đối với các đối tượng lưu trữ và địa điểm lưu trữ CO_2 để giám sát động thái di chuyển của CO_2 dưới lòng đất. Công việc này cần được tiến hành thường xuyên và liên tục ngay trong và sau quá trình CO_2 được bơm ép vào vỉa chứa. Việc giám sát thường xuyên giúp bổ sung thêm các tài liệu, nhằm hiệu chỉnh và chính xác hóa các mô hình dự báo, đồng thời đưa ra cảnh báo sớm ngăn chặn sự rò rỉ của CO_2 nếu có. Trong trường hợp nếu CO_2 bị rò rỉ, cần chuẩn bị sẵn sàng các biện pháp khắc phục để có thể phản ứng nhanh, tránh các tác động với con người và môi trường bên trên địa điểm lưu trữ. Các dự án lưu trữ CO_2 trên thế giới hiện tại đang áp dụng kết hợp các phương pháp giám sát để theo dõi sự di chuyển của CO_2 và đánh giá rủi ro rò rỉ. Dựa trên tính chất của các phương pháp giám sát có thể chia thành các nhóm sau:

Các phương pháp giám sát địa vật lý bao gồm [24]:

- Phương pháp địa chấn: Đo địa chấn 2D, 3D trên cùng một khu vực ở những thời điểm khác nhau (4D) để xác định những thay đổi về trở kháng âm học do sự có mặt của CO_2 từ đó xác định phân bố và sự di chuyển của CO_2 (Hình 9).

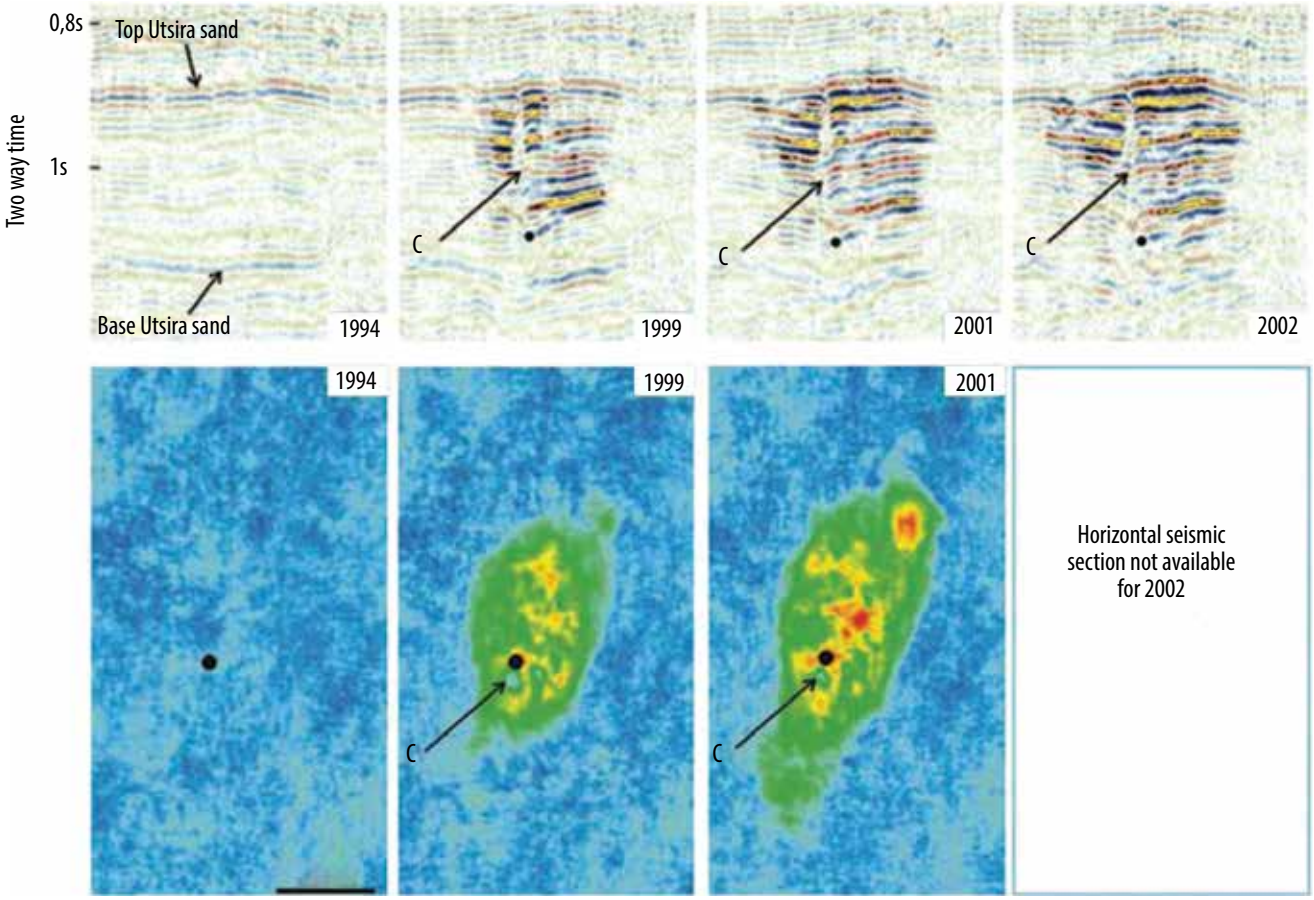
- Đo điện từ (electromagnetic imaging): Xác định sự suy giảm độ dẫn điện ở những khu vực có CO_2 trong lỗ rỗng của đá.

- Đo trọng lực để xác định sự suy giảm mật độ của đá khi có CO_2 do tỷ trọng của CO_2 nhẹ hơn nước thành hệ.

- Đo địa vật lý giếng khoan cung cấp thông tin hữu ích về các đặc tính của giếng và chất lưu trong vỉa chứa, xây dựng bản đồ bão hòa CO_2, hay thông tin về sự ăn mòn ống chống thành giếng khoan.

Hiện tại, phương pháp địa chấn đã được sử dụng rộng rãi nhất và hiệu quả nhất trong việc theo dõi sự di chuyển của CO_2.

Các phương pháp giám sát địa hóa và hóa học gồm các phương pháp phân tích mẫu chất lỏng thu được từ giếng quan sát bằng cách phân tích sự thay đổi thành phần nước mặn hoặc sự di chuyển của các chất đánh dấu tự nhiên/nhân tạo được bơm vào vỉa [24].



Hình 9. *Mặt cắt địa chấn và lát cắt đẳng thời qua khu vực lưu trữ CO_2 ở mỏ Sleipner, Biển Bắc [24].*

Nếu phân chia việc theo dõi và giám sát động thái của CO_2 trong và sau quá trình bơm ép theo không gian và đối tượng giám sát, có thể phân chia như sau: giám sát trong không khí, giám sát gần bề mặt và giám sát dưới vỉa chứa [5].

- Giám sát CO_2 trong không khí: Các công cụ giám sát thường được đặt ở những nơi khí dễ bị rò rỉ để tăng khả năng phát hiện CO_2. Các công cụ được sử dụng phổ biến là cảm biến quang học, máy dò không khí và hiệp phương sai xoáy (eddy covariance). Các hệ thống khác dùng để đo nồng độ CO_2 trong không khí gồm máy đếm CO_2, hệ thống phát hiện rò rỉ tiên tiến như hệ thống laser và LIDAR [5].

- Giám sát CO_2 gần bề mặt: Nếu CO_2 bị rò rỉ lên gần mặt đất sẽ tạo thành các bong bóng khí thoát ra từ các vị trí xung yếu như đứt gãy hoặc gần các giếng đã đóng. Giám sát CO_2 ở gần bề mặt rất quan trọng, có thể cung cấp thông tin về việc rò rỉ dưới lòng đất và đồng thời ngăn chặn rò rỉ vào khí quyển nếu được phát hiện kịp thời. Một số kỹ thuật có thể được sử dụng như radar khẩu độ tổng hợp giao thoa kế (InSAR), máy đo độ nghiêng, địa chấn thời gian thực [5].

- Giám sát CO_2 dưới vỉa chứa: Mục tiêu là để theo dõi chuyển động của chùm khí CO_2 được bơm ép vào vỉa; xác định phạm vi và ranh giới của CO_2; theo dõi những thay đổi áp suất trong vỉa chứa. Nhiều công nghệ giám sát có thể được sử dụng để theo dõi động thái của CO_2, việc lựa chọn sử dụng công nghệ nào phụ thuộc vào lượng thông tin yêu cầu phải có, chi phí bỏ ra và thời gian thu nhận thông tin. Các phương pháp địa chấn 3D thường được sử dụng để đánh giá sự phân bố của đứt gãy, đặc điểm các cấu trúc sâu. Địa chấn 4D cung cấp dữ liệu theo thời gian thực được sử dụng để theo dõi sự dịch chuyển của khí CO_2 được bơm vào. Có thể sử dụng địa chấn 2D để giảm bớt chi phí nếu thực hiện giám sát trong thời gian dài. Nhược điểm của các phương pháp địa chấn 2D là không có khả năng theo dõi chuyển động của chùm CO_2 trong các thành tạo có cấu trúc phức tạp. Phương pháp địa chấn dọc giếng khoan (VSP) và địa chấn giếng khoan - giếng khoan cũng có thể được sử dụng để cung cấp thông tin về rò rỉ và đường di chuyển của CO_2 [5].

Việc lựa chọn công cụ giám sát nào ở mỗi địa điểm lưu trữ CO_2 phụ thuộc vào bản chất địa chất của khu vực đó. Ở những khu vực phức tạp về mặt địa chất, việc giám sát và công cụ giám sát sẽ phức tạp hơn. Những thông tin có sẵn trên một địa điểm lưu trữ cũng ảnh hưởng đến việc lựa chọn kỹ thuật giám sát. Các mỏ dầu và khí đã cạn kiệt đã được chứng minh về khả năng chứa và tính toàn vẹn sẽ giúp cho việc giám sát dễ dàng hơn khi bơm CO_2 vào vỉa chứa.

5. Hiện trạng nghiên cứu và triển khai lưu trữ CO_2 trên thế giới

Việc bơm ép CO_2 để nâng cao hệ số thu hồi dầu khí (CO_2-EOR và CO_2-EGR) được thực hiện ở Mỹ trong bối cảnh khủng hoảng dầu mỏ những năm 70 của thế kỷ XX đã đóng góp những kinh nghiệm quý giá trong đánh giá khả năng lưu trữ CO_2 [25]. CO_2-EOR và CO_2-EGR sau đó cũng được áp dụng ở các quốc gia sản xuất dầu khác như Trung Quốc, Saudi Arabia và Brazil trong những năm 2000 và 2010. Biến đổi khí hậu là vấn đề đã làm thay đổi trọng tâm của CCUS. Dự án lưu trữ CO_2 quy mô lớn đầu tiên trên thế giới đã được Statoil thực hiện vào năm 1996 tại mỏ khí Sleipner ở Biển Bắc (Na Uy) [10]. Vào cuối thập kỷ 90, các chương trình nghiên cứu về thu hồi và lưu trữ CO_2 đã được thực hiện ở Mỹ, Canada, Nhật Bản, Australia và châu Âu. Một số công ty dầu khí bắt đầu quan tâm đến việc lưu trữ địa chất CO_2 như một biện pháp khả thi cho việc phát triển các mỏ khí đốt có hàm lượng CO_2 tự nhiên cao như ở Natuna (Indonesia), Salah (Angeria) và Gordon (Australia). Các doanh nghiệp khai thác than, sản xuất điện và các lĩnh vực công nghiệp khó giảm phát thải CO_2 cũng bắt đầu nghiên cứu việc thu hồi và lưu trữ địa chất CO_2 để đáp ứng tiêu chuẩn ngày càng cao về giảm phát thải trong ngành công nghiệp này.

Mỹ đang dẫn đầu về công nghệ và số lượng các dự án lưu trữ địa chất CO_2 (144 dự án tính đến cuối năm 2022) [11]. Các bang của Mỹ đều đã có số liệu cụ thể về khả năng lưu trữ CO_2 trong phạm vi của bang. Ở châu Âu, Hội đồng Nghị viện châu Âu đã có chỉ thị và văn bản hướng dẫn cụ thể về vấn đề thu hồi và lưu trữ CO_2. Dự án số hiệu SES6-518318 hoàn thành từ năm 2009 là dự án lớn mang tính tổng thể, nghiên cứu khả năng lưu trữ địa chất CO_2 trên toàn bộ lãnh thổ châu Âu. Dự án đã đánh giá tiềm năng lưu trữ CO_2 trong các bể trầm tích của 25 nước châu Âu, đối tượng lưu trữ là các tầng nước mặn sâu, các mỏ dầu khí cạn kiệt và mỏ than [26]. Ở Nam bán cầu, dự án thử nghiệm lưu trữ CO_2 đầu tiên được Australia tiến hành năm 2009 đã bơm và lưu trữ 65.000 tấn CO_2 xuống một mỏ khí tự nhiên cạn kiệt ở phía Tây Victoria ở độ sâu 2.100 m. Khí CO_2 được thu gom từ mỏ khí Bathurst có hàm lượng CO_2 cao, sau đó vận chuyển bằng đường ống đến bơm ép xuống mỏ Naylor cách đó 2 km. Giai đoạn thứ 2 của dự án cũng rất thành công trong việc đánh giá khả năng lưu giữ CO_2 trong các thành tạo nước mặn sâu ở khu vực này [27].

Theo Viện Nghiên cứu CCS toàn cầu (GCCSI), tính đến tháng 9/2022, trên thế giới có 196 dự án lưu trữ CO_2 đã được công bố (bao gồm dự án đã, đang hoạt động, đang trong các giai đoạn phát triển), trong đó riêng năm 2022 có thêm 61 dự án mới được công bố (Hình 10) [11]. Hiện tại, trên toàn cầu có 30 dự án CCS đang hoạt động với khả năng thu giữ và lưu trữ khoảng 43 triệu tấn CO_2/năm; có 11 dự án đang xây dựng và 153 dự án đang trong các giai đoạn phát triển. Tổng khả năng lưu giữ CO_2 của tất cả các dự án đã công bố khoảng 244 triệu tấn CO_2/năm. Tính riêng với các dự án đang lên kế hoạch phát triển, tiềm năng lưu trữ dự kiến tăng mạnh từ 49,4 triệu tấn CO_2/năm vào năm 2021 lên 97,6 triệu tấn CO_2/năm vào năm 2022. Theo mức tăng trưởng về số lượng dự án mới, Mỹ đang dẫn đầu với 34 dự án mới, sau đó là các quốc gia khác gồm Canada (19 dự án mới), Vương quốc Anh (13), Na Uy (8) và Australia, Hà Lan và Iceland (mỗi nước 6 dự án mới).

Ở Đông Nam Á, các nước trong khu vực đã và đang rất quan tâm đến vấn đề lưu trữ địa chất CO_2, đưa lĩnh vực này thành nhiệm vụ ưu tiên phát triển và tầm nhìn xa trong tương lai, cụ thể:

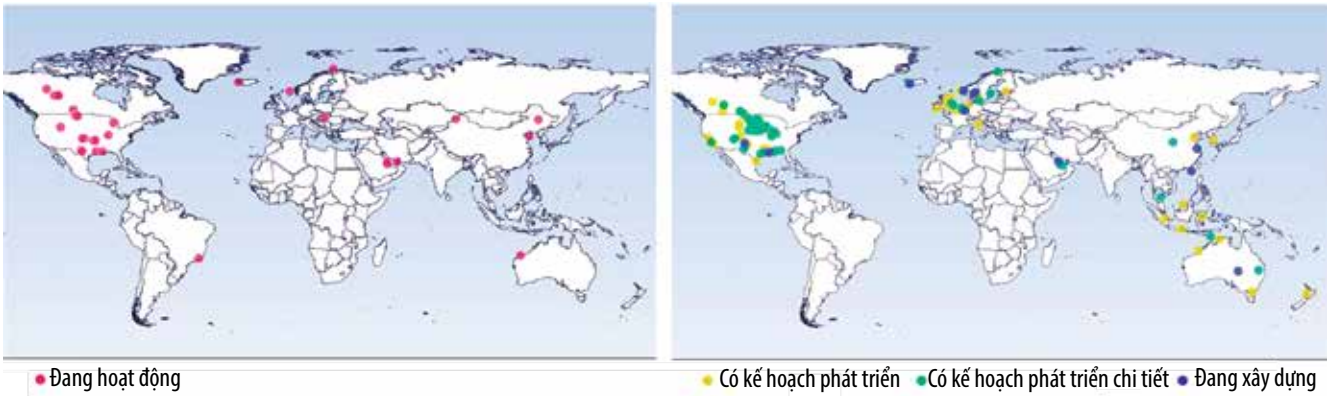
Tại Malaysia, Petronas đã tuyên bố tầm nhìn quốc gia là trở thành trung tâm lưu trữ CO_2 ngoài khơi vào cuối thập kỷ này. Dự án CCS lớn nhất hiện nay của Malaysia là Kasawari CCS nằm ở ngoài khơi Sarawak. Dự án có nguồn khí CO_2 từ mỏ Kasawari Ph2 có hàm lượng CO_2 cao. Mục tiêu của dự án là lưu trữ 4,5 triệu tấn CO_2 mỗi năm, bắt đầu từ năm 2025 vận chuyển khí qua đường ống dài 135 km tới mỏ cạn kiệt M1 [11].

Indonesia là nước đi đầu trong việc triển khai các dự án CCS ở khu vực Đông Nam Á. Giống như Malaysia, tầm nhìn rộng lớn đối với CCS của Indonesia đang mở ra cơ hội để quốc gia này trở thành một trung tâm lưu trữ CO_2 trong khu vực. Chính phủ Indonesia đang tiến hành xây dựng hành lang chính sách và các quy định thuận lợi cho các công ty khai thác dầu khí nước ngoài triển khai các dự án liên quan đến CCS. Cuối năm 2021, cơ quan quản lý dầu khí Indonesia, SKK Migas, đã phê duyệt việc mở rộng dự án Tangguh LNG và phát triển dự án Vorwata CCUS. Dự án này dự kiến hoàn thành vào năm 2026 - 2027, sẽ bơm tới 4 triệu tấn CO_2/năm xuống mỏ để gia tăng thu hồi khí tự nhiên và lưu trữ CO_2. Repsol đang triển khai dự án Sakekamang CCS, dự kiến khởi động vào năm 2027, ước tính có thể bơm ép 2,5 triệu tấn/năm [11].

Tại Thái Lan, PTTEP đã công bố dự án CCS đầu tiên của Thái Lan đặt tại mỏ khí đốt ngoài khơi Arthit, dự kiến sẽ bắt đầu hoạt động vào năm 2026. PTTEP cũng đã ký Biên bản ghi nhớ với JGC Holdings và INPEX của Nhật Bản về "Sáng kiến thu hồi và lưu trữ carbon Thái Lan", đây là nghiên cứu khả thi về tiềm năng triển khai CCS trong ngành dầu khí, các ngành công nghiệp khó giảm thiểu khí CO_2 và sản xuất điện [11].

Tại Singapore, Shell và ExxonMobil có nhà máy lọc hóa dầu ở Singapore, đang nghiên cứu trở thành trung tâm CCS của khu vực (CCS hub) để thu giữ CO_2 và vận chuyển đến địa điểm lưu trữ gần đó. Việc thu giữ CO_2 có thể mở rộng sang lĩnh vực hóa dầu, nhiên liệu sinh học, lọc dầu và hydrogen xanh [11].

Tại Trung Quốc, dự án CCUS tích hợp có công suất 1 triệu tấn/năm đầu tiên của Trung Quốc do SINOPEC phát triển, đã đi vào hoạt động vào cuối tháng 8/2022. CO_2 thu được từ Nhà máy hóa dầu Qilu được vận chuyển đến mỏ dầu Shengli để sử dụng cho việc tăng cường thu hồi dầu. Huaneng (1 trong 5 doanh nghiệp phát điện nhà nước lớn nhất ở Trung Quốc) đã bắt đầu xây dựng dự án CCUS điện đốt than 1,5 triệu tấn/năm ở bể trầm tích Ordos, đây có thể là dự án CCUS điện than lớn nhất thế giới. CNOOC đang khởi động địa điểm lưu trữ CO_2 ngoài khơi đầu tiên của



Hình 10. *Sơ đồ vị trí các dự án CCS trên thế giới trong giai đoạn đang hoạt động (operational), phát triển sớm (early development), đang lên kế hoạch phát triển (advanced development) và đang xây dựng (in construction) [11].*

Trung Quốc ở cửa sông Châu Giang. Một số doanh nghiệp tư nhân (như Guanghui và Hengli) đã công bố triển khai các dự án CCUS ở Trung Quốc [11].

Qua vài thập kỷ, từ ý tưởng ít được quan tâm, đến nay việc lưu trữ địa chất CO_2 đã phát triển và được thừa nhận là biện pháp giảm thiểu khí thải CO_2 quan trọng, lý do là: (1) Nhiều dự án đã được thực hiện thành công ở cấp độ thử nghiệm (pilot), trình diễn (demonstration) và thương mại; (2) Mức độ tin cậy về công nghệ trong các khâu của dự án đã tăng lên đáng kể, làm tăng mức độ an toàn của việc lưu trữ CO_2 trong các đối tượng địa chất; (3) Có sự đồng thuận cao trên thế giới về sự cần thiết phải giảm thiểu khí CO_2 gây hiệu ứng nhà kính.

6. Nghiên cứu, triển khai thu hồi và lưu trữ CO_2 ở Việt Nam

Ở Việt Nam, nghiên cứu cơ bản về thu hồi và lưu trữ CO_2 cấp độ quốc gia vẫn chưa được triển khai đồng bộ. Từ năm 2009, Cục Địa chất và Khoáng sản Việt Nam đã phối hợp với Cơ quan Nghiên cứu Mỏ - Địa chất (BRGM) của Pháp triển khai nghiên cứu "Khả năng lưu trữ khí CO_2 tại Việt Nam đến đâu?" và đã báo cáo kết quả nghiên cứu tại Kỳ họp thứ 8 Diễn đàn kinh tế - tài chính Việt - Pháp tổ chức tại Quảng Ninh từ ngày 16 - 18/11/2009. Nghiên cứu này đã sơ bộ dự báo bể than Quảng Ninh, miền võng Hà Nội và bể Sông Hồng (phần ngoài khơi) phù hợp để tìm kiếm các thành tạo và cấu trúc địa chất cho lưu trữ CO_2 trong các đối tượng là các tầng chứa nước mặn sâu, các mỏ dầu và khí cạn kiệt và các vỉa than không khai thác được. Báo cáo dừng lại ở mức đánh giá sơ bộ tính khả thi cho việc lưu trữ CO_2 trong các đối tượng địa chất và đề xuất với Nhà nước sự cần thiết tiến hành các nghiên cứu chi tiết hơn [10].

Cũng trong năm 2009, Viện Dầu khí Việt Nam (VPI)/ Tập đoàn Dầu khí Việt Nam đã phối hợp với Tổng công ty Dầu khí và Kim loại Nhật Bản (JOGMEC) và Công ty Thăm dò Dầu khí Nippon (NOEX) tiến hành dự án tiền khả thi "Nghiên cứu khả năng sử dụng CO_2 nhằm tăng cường thu hồi dầu ngoài khơi Việt Nam, góp phần giảm thiểu thay đổi khí hậu toàn cầu". Giai đoạn I của dự án (nghiên cứu mô hình, mô phỏng và nghiên cứu khả thi) tiến hành từ năm 2009. Giai đoạn II được tiến hành trong năm 2011, VPI cùng JVPC triển khai tiếp chương trình thử nghiệm bơm CO_2 vào giếng N-02P, tầng Miocene dưới, mỏ Rạng Đông, thuộc Lô 15-2. Kết quả nghiên cứu cho thấy việc sử dụng CO_2 để tăng cường thu hồi dầu cho 1 mỏ chưa khả thi về mặt kinh tế do chi phí thu gom và vận chuyển CO_2 đến vị trí giếng bơm quá cao và cần đầu tư trang thiết bị quá lớn. Tuy nhiên, nếu kết hợp thu gom và sử dụng CO_2 đồng thời tại nhiều mỏ dầu thì có thể giảm được chi phí [28].

Năm 2013, Ngân hàng Phát triển Châu Á (ADB) đã lập báo cáo "Triển vọng thu hồi và lưu trữ carbon ở Đông Nam Á" cho 4 quốc gia là Indonesia, Philippines, Thái Lan và Việt Nam. Đối với Việt Nam, báo cáo đã tính toán tiềm năng lưu trữ CO_2 trong đối tượng là tầng chứa nước mặn sâu, cụ thể trong các bể Sông Hồng, Phú Khánh, Cửu Long, Nam Côn Sơn, Malay - Thổ Chu và Tư Chính - Vũng Mây, và đưa ra ước tính tổng khả năng lưu trữ lý thuyết trong các tầng chứa nước mặn sâu là khoảng 10,4 tỷ tấn CO_2. Tuy nhiên báo cáo chỉ tập trung đánh giá các tầng nước mặn sâu liên quan đến bẫy cấu trúc và bẫy địa tầng và trong các play liên quan đến dầu khí, dẫn đến kết quả tính tiềm năng là khá khiêm tốn, trong đó Sông Hồng và Phú Khánh có khả năng lưu trữ lớn nhất với khoảng 2,5 tỷ tấn CO_2. Tiềm năng lưu trữ cũng được tính toán cho đối tượng là các vỉa than ở khu vực Miền Võng Hà Nội vào khoảng 0,5 tỷ tấn. Các tập vỉa than được tính toán nằm ở độ sâu từ 300 - 1.500 m. Với đối tượng mỏ dầu khí cạn kiệt, sau khi sàng lọc 34 mỏ, lựa chọn các mỏ có tiềm năng lưu trữ trên 10 triệu tấn, tổng tiềm năng chứa của các mỏ ở 4 bể Cửu Long, Malay - Thổ Chu, Nam Côn Sơn và Sông Hồng là 1,15 tỷ tấn CO_2. Mỏ lớn nhất có khả năng lưu trữ khoảng 357 triệu tấn ở bể Cửu Long. Nếu tính riêng bể Cửu Long, có 11 mỏ cạn kiệt với tổng tiềm năng khoảng 692 triệu tấn. Báo cáo cũng kiến nghị cần tiến hành một dự án bơm ép thử nghiệm, ưu tiên ở bể Cửu Long. Đây là nghiên cứu đầu tiên đưa ra các con số ước tính tiềm năng lưu trữ CO_2 ở Việt Nam, tuy nhiên các tài liệu đầu vào sử dụng để tính toán rất hạn chế và từ nhiều nguồn khác nhau, do vậy nhóm tác giả cho rằng, kết quả tính toán được chỉ mang tính chất tham khảo và chưa đánh giá hết tiềm năng của các bể trầm tích ở Việt Nam.

Năm 2015, trong khuôn khổ Chương trình khoa học và công nghệ cấp Nhà nước "Khoa học và công nghệ phục vụ chương trình mục tiêu Quốc gia ứng phó với biến đổi khí hậu", Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản đã thực hiện "Nghiên cứu cơ sở khoa học và thực tiễn, đề xuất giải pháp công nghệ lưu trữ CO_2 trong các hệ tầng, cấu trúc địa chất ở miền Bắc Việt Nam" [10]. Kết quả nghiên cứu cho thấy, trong số các trũng trầm tích trên lãnh thổ miền Bắc Việt Nam bao gồm cả đất liền và ngoài khơi, trũng An Châu, Miền Võng Hà Nội và bể Sông Hồng ngoài khơi vịnh Bắc Bộ là các vị trí rất thích hợp để lưu trữ địa chất CO_2. Các trũng khác trên lục địa phân bố ở các vùng núi xa xôi và điều kiện địa chất phức tạp không thích hợp cho lưu trữ

CO_2. Theo tính toán, khu vực Miền Võng Hà Nội có tiềm năng lưu trữ lý thuyết vào khoảng 11,921 tỷ tấn CO_2, trũng An Châu khoảng 2,131 tỷ tấn CO_2 trong các địa tầng sâu. Báo cáo cũng đã xây dựng mô hình mô phỏng và đánh giá khả năng tiến hành dự án thử nghiệm đối với mỏ khí cạn kiệt Tiền Hải C, với tổng khối tiềm năng lưu trữ khoảng 5 tỷ bộ khối (Bscf), lưu lượng bơm ép tối đa 1,5 triệu bộ khối/ngày đêm. Với việc xây dựng mô hình địa chất và mô phỏng bơm ép, nhóm tác giả đánh giá kết quả của nghiên cứu là một nguồn tham khảo quan trọng khi tiến hành dự án thử nghiệm bơm ép CO_2 tại mỏ Tiền Hải.

Năm 2021, nhằm mục đích lựa chọn địa điểm thích hợp lưu trữ CO_2 từ nguồn phát thải ở Singapore, NUS và ExxonMobil đã tiến hành nghiên cứu đánh giá tiềm năng lưu trữ CO_2 trong các mỏ cạn kiệt và tầng chứa nước mặn sâu ở khu vực Đông Nam Á. Theo tính toán, ở Việt Nam, tiềm năng chứa trong 5 mỏ cạn kiệt (Lan Tây, Rạng Đông, Bạch Hổ, Ruby và Lan Đỏ?) trong 2 phương án "thận trọng" và "lạc quan" lần lượt là 182 triệu tấn và 239 triệu tấn. Tổng tiềm năng của các tầng chứa nước mặn sâu ở bể Cửu Long và Nam Côn Sơn trong 2 phương án này là 11 tỷ tấn và 23 tỷ tấn [29]. Tương tự như các nghiên cứu trước, theo nhóm tác giả, do nguồn tài liệu đầu vào cho tính toán là chưa đầy đủ, nên kết quả nghiên cứu chưa đánh giá hết tiềm năng lưu trữ CO_2 trong các đối tượng địa chất ở Việt Nam.

Tháng 3/2022, OGCI (Oil and Gas Climate Initiative) và GCCSI (Viện CCS toàn cầu) công bố báo cáo thống kê tiềm năng lưu trữ CO_2 của các nước trên thế giới (lần thứ 3), trong đó có Việt Nam. Kết quả thống kê dựa trên tổng hợp các báo cáo/nghiên cứu đã công bố trước đó của CRC (2010), ADB (2013) và Thanh Võ (2019) để đưa ra con số tiềm năng lưu trữ cận thương mại là 0,924 tỷ tấn (mỏ cạn kiệt), tiềm năng chưa phát hiện là 20,826 tỷ tấn (tầng chứa nước mặn sâu). Kết quả thống kê này là tổng của 28 vị trí lưu trữ ở quy mô khu vực và địa phương, nằm tại 7 bể trầm tích. Trong đó, 9 vị trí là tầng chứa nước mặn sâu, 19 liên quan đến dầu khí. Tuy nhiên, báo cáo không đề cập vị trí, địa điểm cụ thể do vậy con số đưa ra chỉ mang tính chất tham khảo [30].

Nghiên cứu của Harsha K.B. và Hon C.L. công bố trên Energy mới đây liên quan đến giảm phát thải ở Việt Nam bằng thu giữ và lưu trữ CO_2. Dựa trên các số liệu địa chất của 7 bể trầm tích (Sông Hồng, Nam Côn Sơn, Malay - Thổ Chu, Cửu Long, Tư Chính - Vũng Mây, Hoàng Sa - Trường Sa, Phú Khánh), của 8 mỏ khí có OGIP >1 Tcf và 25 mỏ dầu ở các bể Sông Hồng, Cửu Long, Nam Côn Sơn và Malay - Thổ Chu để tính toán tổng tiềm năng lưu trữ CO_2 ở Việt Nam vào khoảng 186 tỷ tấn, đủ để lưu trữ lượng CO_2 trung bình là 224 triệu tấn/năm trong 831 năm. Trong đó, 182 tỷ tấn (98%) từ các tầng chứa nước mặn sâu, 2,8 tỷ tấn (1,5%) từ các mỏ khí cạn kiệt (trong tương lai) và 0,5 tỷ tấn (0,3%) từ các mỏ dầu cạn kiệt. Ngoài ra, việc kết hợp CO_2-EOR và CO_2-EGR ở 39 mỏ dầu và khí ở Việt Nam có thể mang lại thêm lần lượt 1.058 triệu thùng dầu từ các mỏ dầu và 94,5 triệu thùng dầu quy đổi từ các mỏ khí [2].

Các kết quả nghiên cứu và tính toán trên cho thấy bức tranh về tiềm năng lưu trữ CO_2 trong các thành tạo địa chất ở các bể trầm tích trên thềm lục địa Việt Nam. Tuy nhiên, việc triển khai các dự án thu hồi và lưu trữ CO_2 ở Việt Nam vẫn đang đối mặt với nhiều thách thức như chi phí đầu tư lớn, cần sự hỗ trợ từ các đối tác quốc tế, vấn đề liên quan đến pháp lý và quản lý môi trường... Do đó, cần cân nhắc và phân tích kỹ lưỡng để đảm bảo tính bền vững và hiệu quả trong việc giảm thiểu tác động của khí thải nhà kính đến môi trường và khí hậu.

7. Kết luận

Bài báo đã giới thiệu khái quát về lưu trữ địa chất CO_2, bao gồm những vấn đề liên quan đến các đối tượng địa chất phù hợp để lưu trữ, các cơ chế bẫy và giữ CO_2 trong vỉa chứa trong thời gian lâu dài và vĩnh viễn; các biện pháp nhằm theo dõi và giám sát động thái của CO_2 trong và sau quá trình bơm ép xuống vỉa chứa nhằm phòng ngừa và ngăn chặn khả năng CO_2 bị rò rỉ lên mặt đất. Sự phát triển của ngành công nghiệp lưu trữ CO_2 trên thế giới cho thấy vai trò quan trọng của giải pháp này đối với vấn đề giảm phát thải CO_2, giảm hiệu ứng nhà kính và chống biến đổi khí hậu toàn cầu.

Đối với Việt Nam, mặc dù thiếu các số liệu chi tiết liên quan đến đặc điểm địa chất các tầng chứa và tầng chắn tiềm năng (là đặc thù trong ngành dầu khí), nhưng kết quả tính toán cho thấy tiềm năng lưu trữ CO_2 trong các bể trầm tích ở Việt Nam cho đối tượng tầng chứa nước mặn sâu và mỏ cạn kiệt là rất đáng kể, tập trung ở các bể Sông Hồng, Cửu Long và Nam Côn Sơn. Với tổng lượng phát thải CO_2 ở hiện tại và trong tương lai từ các ngành công nghiệp ở Việt Nam, việc triển khai các dự án thử nghiệm và dự án lưu trữ CO_2 quy mô công nghiệp ở Việt Nam là hoàn toàn khả thi. Để các dự án này thành công đòi hỏi các bước triển khai đồng bộ từ việc lựa chọn và đánh giá các nguồn phát thải, phương án vận chuyển và kho chứa thu gom CO_2, đến việc đánh giá chi tiết các vị trí và đối tượng địa chất phù hợp để lưu trữ CO_2. Các công việc này cần được thực hiện theo từng giai đoạn từ tổng quan đến chi tiết, từ lựa chọn đánh giá ở quy mô quốc gia, quy mô bể trầm tích, quy mô đối tượng chứa, đánh giá đặc điểm

các vị trí lưu trữ, đánh giá tính khả thi của các vị trí và dự án cụ thể, kết hợp với đánh giá hiệu quả kinh tế và các hiệu ứng mang lại.

Tài liệu tham khảo

[1] Intergouvernemental Panel on Climate Change, *Climate change 2007: The physical science basis*. Cambridge University, 2007.

[2] Harsha Kumar Bokka and Hon Chung Lau, "Decarbonising Vietnam's power and industry sectors by carbon capture and storage", *Energy*, Vol. 262. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125361.

[3] Mai Bui, Claire S. Adjiman, André Bardow, Edward J. Anthony, Andy Boston, Solomon Brown, Paul S. Fennell, Sabine Fuss, Amparo Galindo, Leigh A. Hackett, Jason P. Hallett, Howard J Herzog, George Jackson, Jasmin Kemper, Samuel Krevor, Geoffrey C. Maitland, Michael Matuszewski, Ian S. Metcalfe, Camille Petit, Graeme Puxty, Jeffrey Reimer, David M. Reiner, Edward S. Rubin, Stuart A. Scott, Nilay Shah, Berend Smit, JP Martin Trusler, Paul Webley, Jennifer Wilcox, and Niall Mac Dowell, "Carbon capture and storage (CCS): The way forward", *Energy Environmental Science*, Vol. 11, No. 5, pp. 1062 - 1176, 2018. DOI: 10.1039/C7EE02342A.

[4] Asian Development Bank (ADB), "Prospects for carbon capture and storage in Southeast Asia", 2013. [Online]. Available: https://www.adb.org/sites/default/files/publication/31122/carbon-capture-storage-southeast-asia.pdf.

[5] Temitope Ajayi, Jorge Salgado Gomes, and Achinta Bera, "A review of CO_2 storage in geological formations emphasizing modeling, monitoring and capacity estimation approaches", *Petroleum Science*, Vol. 16, No. 5, pp. 1028 - 1063. DOI: 10.1007/s12182-019-0340-8.

[6] Monitor Scientific LLC, *Natural and industrial analogues for geological storage of carbon dioxide*. Sallie Greenberg, Illinois State Geological Survey, USA, 2009.

[7] IEA, "Net zero by 2050 - A roadmap for the global energy sector", 2021. [Online]. Available: https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050.

[8] Bộ Tài nguyên và Môi trường, *"Báo cáo kỹ thuật phục vụ xây dựng chiến lược quốc gia về biến đổi khí hậu giai đoạn đến năm 2050"*, 2022.

[9] Stefan Bachu, "Screening and ranking of sedimentary basins for sequestration of CO_2 in geological media in response to climate change", Environment *Geology*, Vol. 44, No. 3, pp. 277 - 289, 2003. DOI: 10.1007/s00254-003-0762-9.

[10] Hồ Hữu Hiếu, *"Nghiên cứu cơ sở khoa học và thực tiễn, đề xuất giải pháp công nghệ cất giữ CO_2 trong các hệ tầng, cấu trúc địa chất ở miền Bắc Việt Nam"*, Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản, 2015.

[11] Global CCS institute, *"Global status of CCS 2022"*, 2022.

[12] Global CCS institute, *"Global status of CCS 2021"*, 2021.

[13] Arshad Raza, Reza Rezaee, Raoof Gholami, Chua Han Bing, Ramasamy Nagarajan, and Mohamed Ali Hamid, "A screening criterion for selection of suitable CO_2 storage sites", *Journal of Natural Gas Science and Enginnering*, Vol. 28, pp. 317 - 327, 2016. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.11.053.

[14] Curt M. White, Duane H. Smith, Kenneth L. Jones, Angela L. Goodman, Sinisha A. Jikich, Robert B. LaCount, Stephen B. DuBose, Ekrem Ozdemir, Badie I. Morsi , and Karl T. Schroeder, "Sequestration of carbon dioxide in coal with enhanced coalbed methane recovery a review", *Energy Fuels*, Vol. 19, No. 3, pp. 659 - 724, 2005. DOI: 10.1021/ef040047w.

[15] Mojgan Hadi Mosleh, Majid Sedighi, Masoud Babaei, and Matthew Turner, "Geological sequestration of carbon dioxide", *Managing Global Warming*. Elsevier, 2019, pp. 487 - 500. DOI: 10.1016/B978-0-12-814104-5.00016-8.

[16] Mohammed D. Aminu, Seyed Ali Nabavi, Christopher A. Rochelle, and Vasilije Manovic, "A review of developments in carbon dioxide storage", *Applied Energy*, Vol. 208, pp. 1389 - 1419, 2017. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.015.

[17] Dork L. Sahagian, Alexander A. Proussevitch, and William D. Carlson, "Analysis of vesicular basalts and lava emplacement processes for application as a paleobarometer/paleoaltimeter", *Journal of Geology*, Vol. 110, No. 6, pp. 671 - 685, 2002. DO: 10.1086/342627.

[18] Arshad Raza, Guenther Glatz, Raoof Gholami, Mohamed Mahmoud, and Saad Alafnan, "Carbon mineralization and geological storage of CO_2 in basalt: Mechanisms and technical challenges", *Earth-Science Reviews*, Vol. 229, 2022. DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.104036.

[19] Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir, Frauke Wiese,

Thrainn Fridriksson, Halldór Ármansson, Gunnlaugur M. Einarsson, and Sigurdur R. Gislason, "CO_2 storage potential of basaltic rocks in Iceland and the oceanic ridges", *Energy Procedia*, Vol. 63, pp. 4585 - 4600, 2014. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.11.491.

[20] David Goldberg and Angela L. Slagle, "A global assessment of deep-sea basalt sites for carbon sequestration", *Energy Procedia*, Vol. 1, No. 1, pp. 3675 - 3682, 2009. DOI: 10.1016/j.egypro.2009.02.165.

[21] Gokhan Aydin, Izzet Karakurt, and Kerim Aydiner, "Evaluation of geologic storage options of CO_2: Applicability, cost, storage capacity and safety", *Energy Policy*, Vol. 38, No. 9, pp. 5072 - 5080, 2010. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.04.035.

[22] J. Kaldi, *"Reservoirs, seals, traps and other key issues for geological storage of CO_2"*, 2009.

[23] Stefan Bachu, "Review of CO_2 storage efficiency in deep saline aquifers", *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 40, pp. 188 - 202, 2015. DOI: 10.1016/j.ijggc.2015.01.007.

[24] Sally M. Benson and David R. Cole, "CO_2 sequestration in deep sedimentary formations", *Elements*, Vol. 4, No. 5, pp. 325 - 331, 2008. DOI: 10.2113/gselements.4.5.325.

[25] S. Kimura, *"Study on the potential for the promotion of carbon dioxide capture, utilisation, and storage in ASEAN countries"*.

[26] Thomas Vangkilde-Pedersen, Karen Lyng Anthonsen, Nikki Smith, Karen Kirk, Filipneele, Bertvan der Meer, YannLe Gallo, DanBossie-Codreanu, Adam Wojcicki, Yves-Michel Le Nindre, Chris Hendriks, Finn Dalhoff, and Niels Peter Christensen "Assessing European capacity for geological storage of carbon dioxide-the EU GeoCapacity project", *Energy Procedia*, Vol. 1, No. 1, pp. 2663 - 2670, 2009. DOI: 10.1016/j.egypro.2009.02.034.

[27] Peta Ashworth, Shelley Rodriguez, and Alice Miller, *"Case study of the CO_2 CRC otway project"*, CSIRO, 2010.

[28] Tập đoàn Dầu khí Việt Nam, "Nghiên cứu khả năng sử dụng CO_2 nhằm tăng cường thu hồi dầu ngoài khơi Việt Nam, góp phần giảm thiểu thay đổi khí hậu toàn cầu", *Diễn đàn Kinh tế - Tài chính Việt - Pháp lần thứ 8, Quảng Ninh, 2009*.

[29] E. Li, et. al, *"Carbon capture and storage prospects in ASEAN"*, 2021.

[30] Shelagh Baines, Chris Consoli, Alison Davies, Rachael Jennings, Elle Lashko, Joey Minervini, and Angus Wright, "CO_2 storage resource catalogue - Cycle 3 report", 2022. [Online]. Available: https://www.ogci.com/wp-content/uploads/2022/03/CSRC_Cycle_3_Main_Report_Final.pdf.

CO_2 SEQUESTRATION IN GEOLOGICAL FORMATIONS AND ASSESSMENT OF CO_2 STORAGE POTENTIAL IN VIETNAM

Nguyen Quang Tuan, Bui Huy Hoang, Do Manh Toan, Nguyen Hoang Anh
Vietnam Petroleum Institute
Email: tuannq@vpi.pvn.vn

Summary

Climate change is causing many negative impacts on the earth and humans. Among the methods to reduce CO_2 emissions from human activities into the atmosphere, CO_2 capture and sequestration in geological formations (CCS) has become an effective one. CCS includes four stages: capture, transport, storage, and monitoring of CO_2 underground to ensure safe and long-term storage. The mechanisms for storing CO_2 include physical and chemical/geochemical. Suitable objects for CO_2 storage are depleted oil and gas fields, deep saline aquifers, basalt formations, or coal seams that cannot be extracted by conventional methods. The article provides an update on the status of research and implementation of CCS globally, in the Southeast Asian region and Vietnam specifically, and summarises the findings of various studies on the potential for geological storage of CO_2 in Vietnam.

Key words: CO_2 storage, geological formation.