

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT**

**BÁO CÁO HỌC THUẬT HỌC KỲ I
NĂM HỌC 2025-2026**

Tên báo cáo:	CÁC HƯỚNG NGHIÊN CỨU ĐỊA CƠ HỌC ĐÁP ỨNG YÊU CẦU GIẢM PHÁT THẢI KHÍ NHÀ KÍNH MỎ THAN HÀM LÒ VIỆT NAM
Người báo cáo:	PGS.TS. LÊ TIẾN DŨNG
Tổ chức chủ trì:	TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT
Thời gian thực hiện:	HỌC KỲ I NĂM HỌC 2025-2026

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT**

**BÁO CÁO HỌC THUẬT HỌC KỲ I
NĂM HỌC 2025-2026**

Tên báo cáo:	CÁC HƯỚNG NGHIÊN CỨU ĐỊA CƠ HỌC ĐÁP ỨNG YÊU CẦU GIẢM PHÁT THẢI KHÍ NHÀ KÍNH MỎ THAN HÀM LÒ VIỆT NAM
Người báo cáo:	PGS.TS. LÊ TIẾN DŨNG
Tổ chức chủ trì:	TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT
Thời gian thực hiện:	HỌC KỲ I NĂM HỌC 2025-2026

Mục lục

1. ĐẶT VẤN ĐỀ	2
1.1. Bối cảnh và vai trò của Địa cơ học trong giảm phát thải.....	2
1.2. Tại sao trọng tâm phải là địa cơ học mỏ?	3
2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU TRONG VÀ NGOÀI NƯỚC	4
2.1. Các hướng nghiên cứu trên thế giới trong những năm gần đây	4
2.2. Thực trạng và khoảng trống nghiên cứu tại Việt Nam	5
3. ĐỀ XUẤT CÁC HƯỚNG NGHIÊN CỨU ĐỊA CƠ HỌC CHO ĐIỀU KIỆN VIỆT NAM	6
3.1. Tối ưu hóa kiểm soát áp lực mỏ để hạn chế đới nứt nẻ dẫn khí (Giải pháp nền tảng)	7
3.2. Cơ học khối đá trong khai thác vỉa bảo vệ tích hợp quan trắc vi địa chấn để tăng cường tháo khí	7
3.3. Can thiệp cơ học chủ động: Nứt nẻ thủy lực và Cắt nóc định hướng.....	8
3.4. Không chế đới nứt nẻ và phong tỏa CH ₄ bằng Cơ học chèn lấp vật liệu hỗn hợp (CPB)	8
4. THẢO LUẬN VÀ ĐÁNH GIÁ TÍNH KHẢ THI TRONG BỐI CẢNH VIỆT NAM	9
4.1. Thiết lập tiêu chí đánh giá	9
4.2. Phân tích đặt trong bối cảnh thực tiễn và chính sách quốc gia.....	9
4.3. Đánh giá tổng hợp các giải pháp đề xuất	10
5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	12
5.1. Kết luận	12
5.2. Kiến nghị	12
TÀI LIỆU THAM KHẢO	13

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

1.1. Bối cảnh và vai trò của Địa cơ học trong giảm phát thải

Tại Hội nghị COP26, Việt Nam đã cam kết đạt mức phát thải ròng bằng "0" vào năm 2050, một mục tiêu được cụ thể hóa bằng Quyết định số 896/QĐ-TTg của Thủ tướng Chính phủ. Tập đoàn Công nghiệp Than - Khoáng sản Việt Nam (TKV) hiện đang đối mặt với thách thức kép: vừa phải đảm bảo an ninh năng lượng quốc gia, vừa phải cắt giảm triệt để phát thải khí nhà kính (KNK).

Trong khai thác hầm lò, khí nhà kính không chỉ sinh ra từ việc tiêu thụ năng lượng (điện, dầu) mà phần lớn là **phát thải do phát tán (Fugitive Emissions)**. Các khí chính bao gồm:

- **Khí Mê-tan (CH₄):** Nó thoát ra từ gương lò, đất đá sập đổ, và luồng gió thải thông gió (VAM).
- **Carbon Dioxide (CO₂):** Tồn tại tự nhiên trong vỉa than cùng với CH₄ (gọi chung là khí mỏ). Ngoài ra, một lượng lớn CO₂ thứ cấp được sinh ra từ các hoạt động vận hành thiết bị đốt trong (động cơ diesel của xe gạt, tàu điện hầm lò) và quá trình tiêu thụ điện năng cho hệ thống bơm nước, thông gió, tời trục.
- **Nitrous Oxide (N₂O):** Xuất hiện với một lượng rất nhỏ, chủ yếu phát sinh từ quá trình nổ mìn (sử dụng thuốc nổ công nghiệp ANFO hoặc nhũ tương trong hầm lò).

Mặc dù CO₂ thường được nhắc đến nhiều nhất khi nói về biến đổi khí hậu, nhưng trong bức tranh cụ thể của **khai thác than hầm lò**, CH₄ mới là "kẻ hủy diệt" thực sự. **Xét về cấu tạo khí tự nhiên trong vỉa than:** Tại các mỏ than, CH₄ thường chiếm **80% đến 95%** tổng lượng khí thoát ra từ vỉa, phần nhỏ còn lại là CO₂, N₂ và một số hydrocarbon khác.

Xét về mức độ ảnh hưởng (Quy đổi ra CO₂ tương đương - CO₂e):

- **Sức tàn phá của CH₄:** Theo Ủy ban Liên chính phủ về Biến đổi Khí hậu (IPCC), chỉ số Tiềm năng Nóng lên Toàn cầu (GWP) của CH₄ cao gấp **28–36 lần** CO₂ trong chu kỳ 100 năm. Nếu xét trong chu kỳ ngắn 20 năm, CH₄ giữ nhiệt mạnh gấp **84 lần** CO₂(https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter08_FI_NAL.pdf).
- **Chứng cứ toàn cầu:** Theo báo cáo của Cơ quan Bảo vệ Môi trường Mỹ (EPA), khai thác than đóng góp khoảng **10%** tổng lượng phát thải CH₄ nhân tạo toàn cầu. Trong đó, khai thác hầm lò xả lượng CH₄ cao hơn rất nhiều so với lộ thiên do các vỉa sâu chịu áp suất địa tĩnh lớn, giữ khí chặt hơn (<https://www.epa.gov/cmop/opportunities-globally-address-coal-mine-methane-emissions>).

- **Chứng cứ tại Việt Nam:** Theo Quyết định số 2626/QĐ-BTNMT của Bộ Tài nguyên và Môi trường về hệ số phát thải, hoạt động khai thác than hầm lò xả trực tiếp trung bình **1,5789 m³ CH₄/tấn than** (cao hơn hàng chục lần so với lộ thiên) (<https://thuvienphapluat.vn/van-ban/Tai-nguyen-Moi-truong/Quyet-dinh-2626-QD-BTNMT-2022-cong-bo-he-so-phat-thai-phuc-vu-kiem-ke-khi-nha-kinh-532253.aspx>) .
 - Đối chiếu với các mỏ hầm lò khai thác xuống sâu tại vùng Quảng Ninh (như Mạo Khê, Khe Chàm, Ngã Hai), lượng CH₄ phát tán chiếm tới **hơn 85-90%** tổng tác động biến đổi khí hậu (tính theo CO₂e) của toàn bộ quá trình khai thác trực tiếp (Scope 1).
 - Ví dụ, một nghiên cứu số liệu năm 2018 cho thấy chỉ riêng mỏ hầm lò Mạo Khê đã phát thải lượng CH₄ quy đổi tương đương hơn **155.000 tấn CO₂e**, áp đảo hoàn toàn so với lượng CO₂ sinh ra từ việc chạy dầu hay nổ mìn tại mỏ (<https://congnghiepmoitruong.vn/giai-phap-kiem-soat-phat-thai-khi-me-tan-trong-nganh-cong-nghiep-khai-thac-than-ham-lo-o-viet-nam-5564.html>) .

Thực tế hiện nay, phần lớn các giải pháp tại mỏ hầm lò vẫn tập trung vào "phần ngọn" như cải tiến quạt thông gió hoặc xử lý khí Metan nồng độ thấp trong gió thải (VAM - Ventilation Air Methane). Tuy nhiên, VAM thường có nồng độ cực thấp (dưới 1%), khiến việc thu hồi và chuyển hóa năng lượng trở nên vô cùng tốn kém và kém hiệu quả (theo Ủy ban Kinh tế Liên Hợp Quốc về Châu Âu (UNECE), https://www.google.com/search?q=https://unece.org/sites/default/files/2021-12/Best_Practice_Guidance_for_Effective_Methane_Drainage_2nd_ed_ENG.pdf).

Việc hòa loãng khí Metan xuống dưới 1% chỉ giải quyết bài toán an toàn cho công nhân nhưng không làm thay đổi tổng lượng phát thải ra khí quyển. Với tiềm năng gây nóng lên toàn cầu (GWP) cao gấp 28-34 lần CO₂, việc thải bỏ Metan dù đã hòa loãng vẫn gây hậu quả môi trường nghiêm trọng. Để giải quyết tận gốc rễ, trọng tâm nghiên cứu cần được dịch chuyển sang lĩnh vực **Địa cơ học mỏ**.

1.2. Tại sao trọng tâm phải là địa cơ học mỏ?

Nguyên lý cơ bản: Khí CH₄ bị nhốt chặt trong các vỉa than và đá vây quanh nhờ áp suất địa tĩnh. Ở trạng thái nguyên thủy, độ thấm thấu của vỉa than rất thấp, khí không thể tự thoát ra. Khi ta đào lò hoặc khai thác (khấu than), sự cân bằng ứng suất bị phá vỡ. Đất đá nứt nẻ, sập lở tạo ra các "**đới giảm ứng suất**" và "**đới tăng độ thấm**". Chính sự biến dạng địa cơ học này đã mở đường cho CH₄ ồ ạt thoát ra.

Sự di chuyển của khí bị chi phối tuyệt đối bởi **Tính thấm (Permeability - k)**. Dưới góc độ địa cơ học, tính thấm không phải là hằng số mà là một hàm biến thiên theo sự phân bố lại ứng suất khi có hoạt động khai thác. Sự biến đổi này tuân theo cơ chế vật lý nghiêm ngặt:

- **Vùng tập trung ứng suất:** Các khe nứt bị nén chặt, làm giảm độ mở khe nứt. Theo quy luật bậc ba, tính thấm sẽ sụt giảm nghiêm trọng, gây tắc nghẽn dòng khí và tích tụ áp suất khí vỉa.
- **Vùng giảm tải ứng suất (Stress-relief zone):** Khi ứng suất địa tĩnh được giải tỏa thông qua các can thiệp cơ học, hệ thống khe nứt sẽ giãn nở thể tích (dilatancy). Lúc này, tính thấm có thể tăng lên hàng trăm lần so với trạng thái nguyên thủy, tạo điều kiện lý tưởng để chủ động dẫn hướng và thu hồi khí.
- **Tác động của ứng suất:** Khi xuống sâu, áp lực địa tĩnh khổng lồ nén chặt các hệ thống vi khe nứt (cleats) trong than. Vì tính thấm tỉ lệ thuận với lũy thừa bậc ba của độ mở khe nứt, chỉ cần một sự gia tăng nhỏ của ứng suất cũng khiến tính thấm sụt giảm nghiêm trọng.

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU TRONG VÀ NGOÀI NƯỚC

2.1. Các hướng nghiên cứu trên thế giới trong những năm gần đây

Trong thập kỷ qua, việc kiểm soát khí mê-tan (CH_4) trong khai thác than hầm lò đã vượt ra khỏi phạm vi của kỹ thuật thông gió pha loãng thụ động. Xu hướng nghiên cứu toàn cầu hiện nay đặt **địa cơ học mỏ** làm nền tảng cốt lõi, dựa trên nguyên lý: sự dịch chuyển khối đá và phân bố lại trường ứng suất do khai thác là tác nhân trực tiếp điều khiển cấu trúc nứt nẻ và tính thấm của vỉa, từ đó quyết định động lực học dòng khí. Bốn hướng đi chủ đạo hiện nay bao gồm:

1. **Nghiên cứu cơ chế tiến hóa đới nứt nẻ và trường độ thấm:** Thay vì tiếp cận tĩnh, giới nghiên cứu tập trung đánh giá sự phát triển động của mạng lưới nứt nẻ trong không gian và thời gian khi gương lò chợ tiến. Mục tiêu là xác định chính xác hình thái và độ vươn cao của "đới nứt nẻ dẫn khí" (gas-conducting fracture zone) phía trên vách lò. Việc hiểu rõ quy luật cơ học phá hủy này cho phép các kỹ sư bố trí mạng lưới lỗ khoan rút khí định hướng, tối ưu hóa việc thu gom CH_4 trước khi chúng rò rỉ ồ ạt vào không gian mỏ (Palchik, 2003; Majidi et al., 2012; Qu et al., 2015) (Qu et al., 2015; Wang et al., 2019; Yin et al., 2015).
2. **Cơ học đỡ tải trong khai thác vỉa bảo vệ (Stree-relief in Protective Seam Mining):** Là một trong những phương pháp can thiệp địa cơ học kinh điển và hiệu quả bậc nhất trên thế giới (đặc biệt tại Trung Quốc, Úc và các mỏ than hầm lò sâu) để giải quyết các vỉa than ngậm khí có rủi ro bộc phát (outburst-prone). **Bản chất của Cơ học đỡ tải vỉa bảo vệ là gì?** Ở các mỏ sâu, vỉa than thường chịu áp lực địa tĩnh (in-situ stress) cực lớn khiến các khe nứt nguyên sinh bị ép chặt, dẫn đến tính thấm của vỉa rất thấp, không thể hút khí CH_4 ra được. Giải pháp là: **Khai thác một vỉa lân cận ít nguy hiểm hơn trước (vỉa bảo vệ - protective seam)**. Quá trình này phá vỡ trạng thái cân bằng ứng suất ban đầu, tạo ra một **vùng giảm tải ứng suất (stress-relief zone)** khổng lồ lan truyền lên vách và xuống nền. Vỉa chứa khí nguy hiểm (vỉa được bảo vệ - protected seam) rơi vào vùng này sẽ bị đỡ tải, dẫn đến sự giãn nở thể tích (volume expansion).

Các khe nứt trong khối than mở toác ra, làm **tăng độ thấm (permeability)** lên gấp hàng chục, thậm chí hàng trăm lần. Lúc này, người ta mới cắm lỗ khoan vào để rút CH₄ ra một cách an toàn trước khi tiến hành khai thác vỉa đó. Khi khai thác một vỉa lân cận (vỉa bảo vệ), áp lực địa tĩnh lên vỉa ngậm khí sẽ giảm mạnh, kích hoạt sự mở rộng của các khe nứt nguyên sinh. Các nghiên cứu cơ học đã đi sâu vào việc xác định ranh giới và biến dạng của "vùng giảm áp" để thiết kế thông số khoan tháo khí đạt hiệu suất cao nhất, biến rủi ro bụi khí thành nguồn năng lượng thu hồi (Karacan et al., 2011; Liu et al., 2013; Xue et al., 2015) (Cheng et al., 2016; Liu & Cheng, 2015; Xue et al., 2015).

3. **Tăng cường tính thấm bằng can thiệp cơ học chủ động:** Để giải phóng CH₄ bị nhốt trong các vỉa than quá cứng, các giải pháp can thiệp phá hủy chủ động (như nứt nẻ thủy lực định hướng) được ứng dụng mạnh mẽ. Trọng tâm nghiên cứu là kiểm soát áp suất và quỹ đạo lan truyền của khe nứt nhân tạo trong môi trường trường ứng suất địa kiến tạo. Việc tạo ra mạng lưới liên thông này giúp tăng diện tích giải hấp phụ, hỗ trợ thu hồi lượng lớn CH₄ (Huang et al., 2015; Ge et al., 2015; Zhou et al., 2016) (Ge et al., 2015; Huang et al., 2015; Li et al., 2019).
4. **Không chế đới sập đổ bằng Cơ học chèn lấp:** Dưới lăng kính địa cơ học, công nghệ chèn lấp khoảng không khai thác được xem là giải pháp "phong tỏa" CH₄ chủ động. Bằng cách lấp đầy khoảng không, khối chèn lấp cung cấp phản lực cơ học trực tiếp lên vách lò trên, hạn chế tối đa sự biến dạng vòng và sập đổ của tập đá mái. Quá trình này giúp triệt tiêu sự hình thành đới nứt nẻ vươn cao, giữ CH₄ bị cô lập lại trong các vỉa lân cận thay vì giải phóng tự do vào luồng không khí, đồng thời bảo toàn độ ổn định của toàn hệ thống (Zhang et al., 2015; Sun et al., 2018; Chang et al., 2020).

2.2. Thực trạng và khoảng trống nghiên cứu tại Việt Nam

Tại Việt Nam, các mỏ hầm lò thuộc bể than Quảng Ninh (như Mông Dương, Mạo Khê, Khe Chàm) đang bước vào giai đoạn khai thác xuống sâu dưới mức -350m đến -500m. Ở chiều sâu này, ứng suất địa tĩnh tăng cao kéo theo độ chứa khí mê-tan gia tăng đột biến (đạt ngưỡng bụi phát từ 10-15 m³/tấn than). Thời gian qua, các nghiên cứu trong nước chủ yếu giải quyết bài toán an toàn cục bộ. Điển hình như các nghiên cứu dự báo hàm lượng khí theo chiều sâu (Thinh et al., 2021) để phục vụ công tác thông gió pha loãng, hoặc các đo đạc áp lực nóc lò trên giá khung thủy lực (Nhan et al., 2026) để ngăn ngừa sập đổ.

Dưới góc độ địa cơ học, bể than Quảng Ninh có hai đặc điểm mang tính quyết định đến động lực học dòng khí: (1) Than chủ yếu là **anthracite có độ cứng cao, tính thấm tự nhiên cực kỳ thấp**, khiến việc khoan rút khí tự nhiên kém hiệu quả (APERC, 2022; Liu et al., 2022); (2) **Cấu trúc địa chất đứt gãy phức tạp xen kẽ vỉa dày và chum vỉa**, dễ hình thành các vùng tập trung ứng suất lớn nhưng cũng rất thuận lợi để áp dụng khai thác vỉa bảo vệ (Nguyen & Nguyen, 2021).

Tuy nhiên, đối chiếu với xu hướng kiểm soát khí bằng địa cơ học trên thế giới, bức tranh nghiên cứu tại Việt Nam đang bộc lộ 3 khoảng trống (Research Gaps) lớn mang tính hệ thống:

- **Sự phân mảnh giữa Kiểm soát áp lực mỏ (Strata control) và Động lực học khí (Gas dynamics):** Các nghiên cứu về áp lực mỏ tại Việt Nam hiện nay thuần túy phục vụ mục đích cơ học kết cấu – tức là giữ cho không gian khai thác ổn định (ổn định vách, chống sụt nền). Rất hiếm nghiên cứu phân tích sự sập đổ của vách lò ảnh hưởng thế nào đến quỹ đạo và độ vươn cao của "đới nứt nẻ dẫn khí" (gas-conducting fracture zone). Sự thiếu vắng các đánh giá về mô hình nứt nẻ này khiến kỹ sư mỏ không xác định được tọa độ không gian tối ưu để cắm các lỗ khoan đón lỏng CH₄, dẫn đến việc khí vẫn tự do rò rỉ ồ ạt vào luồng gió thông gió (VAM).
- **Khoảng trống trong mô hình hóa định lượng độ thấm của than Anthracite Việt Nam:** Do than Quảng Ninh có tính thấm siêu thấp, việc rút khí chỉ hiệu quả khi khối đá được "dỡ tải ứng suất" (stress-relief) – ví dụ như khi khai thác các chòm vỉa lân cận. Tuy nhiên, Việt Nam hiện chưa có các nghiên cứu thiết lập phương trình toán học hay mô hình đa trường để đánh giá định lượng: *ứng suất giảm bao nhiêu MPa thì hệ số thấm của than anthracite Quảng Ninh tăng lên bao nhiêu lần*. Thiếu đi cơ sở cơ học đá này, việc thiết kế mạng lưới khoan tháo khí (khoảng cách, góc độ, thời gian hút) tại các mỏ sâu hiện nay vẫn chủ yếu dựa vào kinh nghiệm thực nghiệm, dẫn đến hiệu suất thu hồi rất thấp.
- **Chưa làm chủ các công nghệ can thiệp cơ học phá hủy chủ động:** Để giải quyết triệt để bài toán ngậm khí trong các vỉa than nguyên khối, thế giới đã áp dụng rộng rãi các giải pháp thay đổi trường ứng suất chủ động như nứt nẻ thủy lực (hydraulic fracturing) hay cắt nóc lò định hướng (directional roof cutting) để tạo mạng lưới dẫn khí nhân tạo. Tại Việt Nam, các kỹ thuật can thiệp cơ học sâu này gần như vắng bóng cả trong nghiên cứu lý thuyết lẫn thực nghiệm hiện trường. Điều này khiến các mỏ sâu bị kẹt trong thế "bị động": không tháo được khí ra trước vì than quá đặc sít, dẫn đến tốc độ khấu than phải chậm lại để chờ thông gió, ảnh hưởng nghiêm trọng đến sản lượng. Gần đây các nghiên cứu của Trung tâm Hỗ trợ tiến bộ kỹ thuật Hội Khoa học Công nghệ mỏ Việt Nam bước đầu nghiên cứu ứng dụng phá hủy thủy lực ở vùng than Quảng Ninh.

Chính những khoảng trống về sự thiếu hụt sợi dây liên kết giữa "Cơ học vỡ vụn" và "Tính thấm dòng lưu thể" đối với điều kiện đặc thù của than Quảng Ninh là cơ sở để bài báo đề xuất hướng nghiên cứu tích hợp trong giai đoạn tới.

3. ĐỀ XUẤT CÁC HƯỚNG NGHIÊN CỨU ĐỊA CƠ HỌC CHO ĐIỀU KIỆN VIỆT NAM

Bể than Antraxit Quảng Ninh có điều kiện địa chất - kỹ thuật khai thác thuộc diện phức tạp bậc nhất thế giới: cấu trúc nếp uốn, đứt gãy dày đặc, các vỉa than dốc, chiều dày biến đổi và tính chất cơ lý than thay đổi. Dựa trên dữ liệu viễn cảnh khai thác xuống sâu

(từ mức -300m đến -500m) của TKV trong giai đoạn tới, bài báo đề xuất 4 hướng nghiên cứu địa cơ học trọng tâm kèm theo địa chỉ áp dụng cụ thể:

3.1. Tối ưu hóa kiểm soát áp lực mỏ để hạn chế đới nứt nẻ dẫn khí (Giải pháp nền tảng)

- **Cơ sở lập luận từ dữ liệu thực tiễn:** Tại các mỏ khai thác vùng Quảng Ninh, đất đá vách và nền vỉa thường là sét kết, bột kết. Dưới áp lực địa tĩnh lớn ở mức -400m, vách lò sẽ nhanh chóng bị nén vỡ và sập đổ, kích hoạt các đứt gãy kiến tạo tự nhiên mở rộng lên tới hàng chục mét phía trên không gian khai thác (goaf). Mạng lưới đới phá hủy này vô tình tạo ra các "đường cao tốc" dẫn khí CH₄ từ các vỉa lân cận xả thẳng vào luồng gió thải (VAM), vô hiệu hóa hoàn toàn mọi nỗ lực thu hồi KNK bằng lỗ khoan. Ít nghiên cứu tại Việt Nam đánh giá sự võng xuống của vách lò tương quan thế nào với độ vươn cao của "đới nứt nẻ dẫn khí" (gas-conducting fracture zone).
- **Giải pháp đề xuất:** Nghiên cứu tính toán tương tác động lực học giữa hệ thống vỉa chống và khối đá vách (roof-support interaction). Mục tiêu là xác định "sức cản kháng cắt" tối ưu để duy trì tính toàn vẹn của vách đá, dập tắt sự phát triển vươn cao của đới nứt nẻ, "khóa" khí CH₄ ở lại trong vỉa để chờ tháo hút bằng mạng lưới khoan chủ động.
- **Gợi ý nơi áp dụng cụ thể:** Các lò chợ cơ giới hóa đồng bộ khai thác vỉa dốc nghiêng, áp lực nóc lớn tại **Mỏ than Nam Mẫu** và **Mỏ than Mạo Khê** (khu vực cánh Nam).

3.2. Cơ học khối đá trong khai thác vỉa bảo vệ tích hợp quan trắc vi địa chấn để tăng cường tháo khí

- **Cơ sở lập luận từ dữ liệu thực tiễn:** Rất nhiều khu vực tại Quảng Ninh có cấu trúc vỉa dạng chùm (các vỉa nằm cách nhau chỉ từ 15m - 30m). Theo các báo cáo thăm dò, độ chứa khí ở mức -300m trở xuống đạt ngưỡng rất cao (lên 15 - 20 m³/tấn than). Nếu khai thác trực tiếp vỉa dày ngậm khí, rủi ro phụt khí và phát thải ò ạt là không thể tránh khỏi. Trình tự khai thác các vỉa gần nhau này cần được nghiên cứu làm rõ để giảm thiểu sự ảnh hưởng lẫn nhau liên quan đới nứt nẻ. Các nghiên cứu và ứng dụng trong nước hiện nay mang nặng tính kinh nghiệm và hình học tĩnh. Chúng ta chỉ xác định "vùng bảo vệ" dựa trên các góc đứt gãy lý thuyết để cấm lỗ khoan tháo khí, chứ **chưa có các mô hình định lượng (toán học/mô phỏng)** để biết chính xác sự suy giảm ứng suất (stress-relief) làm tăng hệ số thấm của khối than Antraxit lên bao nhiêu lần, và tăng mạnh nhất vào thời điểm nào.
- **Giải pháp đề xuất:** Xây dựng mô hình mô phỏng kết hợp quan trắc vi địa chấn để lập bản đồ "đới giảm tải ứng suất" (stress-relief zone) theo thời gian thực khi khai thác vỉa gần nhau. Việc lập bản đồ "đới giảm tải ứng suất" động theo thời

gian thực sẽ giúp kỹ sư mở cấm lỗ khoan rút khí chính xác vào tọa độ giãn nở không gian ngay tại thời điểm hệ số thấm đạt đỉnh.

- **Gợi ý nơi áp dụng cụ thể:** **Mỏ than Khe Chàm** và **Mỏ than Ngã Hai (Công ty than Quang Hanh)** – những nơi có đặc thù nhiều vỉa nằm sát nhau và hàm lượng khí vỉa biến thiên mạnh.

3.3. Can thiệp cơ học chủ động: Nứt nẻ thủy lực và Cắt nóc định hướng

- **Cơ sở lập luận từ dữ liệu thực tiễn:** Để đối phó với các vách đá nguyên khối quá cứng không chịu sập, Viện KHCN Mỏ (IMSAT) và Hội KHCN Mỏ đã từng bước thử nghiệm công nghệ nổ mìn cắt vách hoặc **ép nước tạo nứt nẻ (water injection/hydraulic fracturing)** tại một số lò chợ (như Khe Chàm, Hạ Long, Nam Mẫu). Dù đã có thử nghiệm, nhưng công nghệ này tại Việt Nam chỉ đang được dùng để **củng bức sập đổ nóc lò** (bảo vệ giàn chống hoặc đường lò). Hoàn toàn chưa có nghiên cứu nào ứng dụng cơ học nứt nẻ nhân tạo để **tăng cường tính thấm cho chính vỉa than** nhằm thu hồi CH₄. Hơn nữa, nếu bơm ép áp lực cao như nước ngoài, than Antraxit giòn của Việt Nam dễ bị xói lở, sập lỗ khoan thay vì nứt lan truyền.
- **Giải pháp đề xuất:** Nghiên cứu cơ chế phá hủy của than trong điều kiện phức tạp để tối ưu hóa công nghệ nứt nẻ định hướng. Bao gồm: (1) Công nghệ "bơm ép tốc độ chậm" (slow-rate fracturing) kết hợp dung dịch bơm có độ nhớt cao để nối lỏng từ từ các vỉa nứt mà không phá vỡ cấu trúc lỗ khoan; (2) Công nghệ "Cắt nóc định hướng" (directional roof fracturing) để chủ động bẻ gãy các tập đá vách cứng, giải phóng ứng suất cục bộ và kích thích tính thấm cho toàn bộ khối than.
- **Gợi ý nơi áp dụng cụ thể:** Các khu vực vỉa sâu, than có độ ngậm khí cao và thường xuyên gặp sự cố kẹt choòng khi khoan tháo khí tại **Mỏ than Vàng Danh** (khu Cánh Gà) và **Mỏ than Uông Bí**.

3.4. Khống chế đới nứt nẻ và phong tỏa CH₄ bằng Cơ học chèn lấp vật liệu hỗn hợp (CPB)

- **Cơ sở lập luận:** Khai thác hầm lò tại vùng Hòn Gai, Cẩm Phả đang đối mặt với áp lực kép: lún sụt mặt bằng do khoảng không ngầm và bãi thải lộ thiên/tro xỉ nhiệt điện khổng lồ. Gần đây, các nhà khoa học Việt Nam (tiêu biểu như nghiên cứu của *Nguyen P.H et al., 2023 Nguyen, P. H., Nguyen, C. K., & Nguyen, T. K. T. (2023). Research of Building the Reasonable Mixing Ratio between Waste Rock and Fly Ash as Backfill Material in Mongduong-Cocsa Area, Quang Ninh, Vietnam. Inżynieria Mineralna, 2(1).*) tại khu vực Mông Dương - Cọc Sáu) đã bóc tách thành công bài toán cấp phối vật liệu **Vữa chèn lấp dạng Paste (CPB)** sử dụng hỗn hợp đá thải nghiền (làm cốt liệu thô chịu lực) và tro xỉ (làm chất độn mịn đông kết). Tuy nhiên, các nghiên cứu trong nước mới chỉ dừng ở mục tiêu cơ học kết cấu (chống sụt lún) và xử lý môi trường. Tiềm năng vĩ đại

nhất của khối CPB đặc sít này dưới góc độ **địa cơ học chất lưu** – tức khả năng làm "nút bít" phong tỏa khí mê-tan – vẫn hoàn toàn bị bỏ ngỏ.

- **Giải pháp đề xuất:** Kế thừa các tỷ lệ phối trộn CPB (đá thải + tro xỉ) đã được đúc kết cho điều kiện Quảng Ninh, hướng nghiên cứu cần mở rộng sang **Cơ chế ghép nối Cơ - Thủy (Hydro-Mechanical coupling) của khối chèn lấp**. Trọng tâm là đánh giá sự biến thiên độ rỗng và hệ số thấm khí của khối CPB theo thời gian dưới môi trường áp lực mỏ ngầm. Mục tiêu cốt lõi là chứng minh khối vật liệu hỗn hợp này không chỉ giữ ổn định vách lò, mà còn cắt đứt triệt để các hành lang liên thông dẫn khí, ép CH₄ phải ở lại trong các vỉa lân cận để phục vụ công tác khoan thu hồi định hướng.
- **Gợi ý địa chỉ áp dụng:** Mỏ than Hà Lâm và Núi Béo, tận dụng trực tiếp nguồn đá bóc từ các bãi thải lộ thiên lân cận và tro xỉ từ cụm Nhiệt điện Hà Khánh, biến chúng thành lớp "áo giáp" ngăn rò rỉ khí nhà kính.

4. THẢO LUẬN VÀ ĐÁNH GIÁ TÍNH KHẢ THI TRONG BỐI CẢNH VIỆT NAM

Việc chuyển giao và ứng dụng các hướng nghiên cứu địa cơ học từ phòng thí nghiệm ra hiện trường mỏ hầm lò Việt Nam không thể rập khuôn máy móc. Để đánh giá mức độ khả thi của 4 nhóm giải pháp đã đề xuất, phần thảo luận này thiết lập hệ tiêu chí đánh giá và đặt chúng vào hệ quy chiếu toàn diện bao gồm: điều kiện địa chất, trình độ công nghệ, và định hướng chính sách hiện hành.

4.1. Thiết lập tiêu chí đánh giá

Các giải pháp được đặt lên bàn cân dựa trên 3 trụ cột tiêu chí cốt lõi:

- **Tiêu chí Công nghệ (Mức độ sẵn sàng - TRL):** Đánh giá dựa trên sự tương thích với thiết bị và trình độ cơ giới hóa hiện tại của TKV và Tổng công ty Đông Bắc. Mức "Cao" nghĩa là công nghệ hoàn toàn mới, đòi hỏi nhập khẩu hoặc R&D dài hạn; mức "Thấp" là có thể tích hợp ngay vào dây chuyền thiết bị hiện hữu.
- **Tiêu chí Kinh tế (Chi phí vòng đời dự án):** Đánh giá tương quan giữa chi phí đầu tư ban đầu (CAPEX) và chi phí vận hành (OPEX) so với tiềm năng lợi ích mang lại (tiết kiệm chi phí bảo vệ môi trường, thương mại hóa tín chỉ carbon, hoặc tận thu năng lượng).
- **Tiêu chí Môi trường (Tiềm năng giảm phát thải):** Đo lường bằng khả năng "phong tỏa" triệt để khí CH₄ (Scope 1) trước khi thoát ra môi trường, kết hợp với lợi ích kinh tế tuần hoàn (ví dụ: tiêu thụ lượng lớn chất thải rắn mỏ).

4.2. Phân tích đặt trong bối cảnh thực tiễn và chính sách quốc gia

Về bối cảnh địa chất và công nghệ hiện hữu:

Bể than Quảng Ninh có đứt gãy kiến tạo phức tạp, các vỉa than dốc, chiều dày biến đổi. Hiện nay, TKV đã có bước tiến lớn trong "Cơ giới hóa, Tự động hóa, Tin học hóa" (tiêu biểu là các hệ thống giá chống thủy lực tự hành). Tuy nhiên, đối với các can thiệp địa cơ học chủ động, công nghệ khoan tháo khí hiện tại chủ yếu vẫn là khoan định vị tĩnh; các hệ thống trạm bơm ép tốc độ chậm phục vụ nút nẻ thủy lực hay đường ống bơm vữa chèn lấp hỗn hợp (CPB) chưa được đầu tư đồng bộ.

Về định hướng của Đảng và chính sách của Chính phủ:

Các đề xuất nghiên cứu giảm phát thải mỏ than hoàn toàn bám sát và phù hợp với các hành lang pháp lý tối cao:

- [Nghị quyết số 55-NQ/TW \(ngày 11/02/2020\)](#) của Bộ Chính trị về định hướng Chiến lược phát triển năng lượng quốc gia. Nghị quyết nhấn mạnh yêu cầu "bảo vệ môi trường sinh thái, thích ứng với biến đổi khí hậu" và "từng bước loại bỏ công nghệ lạc hậu, cường độ phát thải KNK cao".
- [Quyết định số 896/QĐ-TTg \(năm 2022\)](#) của Thủ tướng Chính phủ phê duyệt Chiến lược quốc gia về biến đổi khí hậu giai đoạn đến năm 2050, cụ thể hóa cam kết Net Zero.

Rào cản chính sách hiện tại: Khó khăn lớn nhất để triển khai các công nghệ địa cơ học đất tiền nằm ở cơ chế tài chính.

- Thứ nhất, trong khi Việt Nam đã có cơ chế giá điện hỗ trợ (FiT) cho điện rác ([Quyết định 31/2014/QĐ-TTg](#)) và điện sinh khối ([Quyết định 08/2017/QĐ-TTg](#)), chúng ta vẫn hoàn toàn **chưa có cơ chế FiT dành riêng cho điện sản xuất từ khí metan mỏ than (CMM)**. Điều này khiến bài toán thu hồi vốn từ tháo khí gặp bế tắc.
- Thứ hai, tiềm năng bán tín chỉ carbon từ việc giảm rò rỉ CH₄ chưa thể mang lại dòng tiền ngay, do Sàn giao dịch tín chỉ carbon nội địa phải đến **năm 2028 mới vận hành thí điểm và sau 2029 mới chính thức đi vào hoạt động**, theo đúng lộ trình được quy định tại [Nghị định số 119/2025/NĐ-CP \(sửa đổi bổ sung Nghị định 06/2022/NĐ-CP\)](#).

4.3. Đánh giá tổng hợp các giải pháp đề xuất

Dựa trên các hệ quy chiếu trên, tính khả thi của 4 hướng nghiên cứu được phân tích tại Bảng 1.

Bảng 1: Ma trận đánh giá tính khả thi các giải pháp Địa cơ học ở Việt Nam

Giải pháp Đề xuất	Tính tương thích Địa chất & Công nghệ (TRL)	Chi phí Kinh tế & Rào cản Chính sách	Tiềm năng Giảm phát thải & Môi trường	Lộ trình áp dụng đề xuất
1. Kiểm soát áp lực mỏ (Strata Control)	Rất phù hợp. Tận dụng tối đa hệ thống vì chống thủy lực tự hành hiện có. Chỉ đòi hỏi thay đổi R&D trong mô hình tính toán áp lực và đới nứt nẻ.	Thấp. Không phát sinh chi phí thiết bị mới đột biến. Không phụ thuộc vào dòng tiền từ thị trường tín chỉ carbon.	Trung bình. Không trực tiếp thu hồi CH ₄ , nhưng là "lớp khóa van" nên tăng bắt buộc để chặn phát thải tự do.	Ngắn hạn (1-3 năm). Cần cập nhật ngay vào quy chuẩn thiết kế chống giữ của TKV.
2. Khai thác vỉa bảo vệ (Protective Seam)	Phù hợp. Tương thích cao với các mỏ có cấu trúc vỉa chum (Khe Chàm, Ngã Hai). Kỹ thuật đào lò và khâu than đã làm chủ.	Thấp. Tận dụng dây chuyền khâu than sẵn có. Chi phí tăng thêm nằm ở khâu phần mềm mô phỏng HM và định hướng khoan.	Cao. Biến đới nứt nẻ thành khoang chứa, dễ dàng thu gom CH ₄ nồng độ cao trước khi chúng phát tán.	Ngắn hạn (1-3 năm). Triển khai thử nghiệm và chuẩn hóa quy trình ngay tại các mỏ vỉa chum xuống sâu.
3. Nứt nẻ thủy lực / Cắt nóc chủ động	Thách thức lớn. Địa chất đứt gãy dễ làm thất thoát áp lực chất lưu. Trình độ R&D trong nước chưa làm chủ được thiết bị bơm tốc độ chậm chuyên dụng.	Cao. Cần đầu tư đồng bộ trạm bơm áp lực, dung dịch polymer, và thiết bị khoan cắt định hướng. Gặp rào cản do chưa có giá điện FiT cho CMM.	Rất Cao. Giải pháp mang tính đột phá, bẻ gãy cấu trúc Antraxit đặc sít để giải phóng khí hấp phụ trong vỉa sâu nguyên khối.	Trung hạn (3-5 năm). Yêu cầu hợp tác quốc tế để chuyển giao công nghệ và thử nghiệm hiện trường.
4. Chèn lấp vật liệu hỗn hợp (CPB)	Trung bình. Kỹ thuật phối trộn vữa CPB (đá thải + tro xỉ) đã có tại VN, nhưng việc thiết kế hệ thống	Trung bình - Cao. Cần đầu tư trạm trộn và trạm bơm trên mặt bằng. Tuy nhiên, được bù đắp bằng	Rất Cao. Giải quyết đa mục tiêu: Tạo "van khóa" CH ₄ triệt để, chống sụt lún mặt đất, và kinh	Dài hạn (5-10 năm). Chờ sự bùng nổ của thị trường tín chỉ carbon (sau 2028) để có

Giải pháp Đề xuất	Tính tương thích Địa chất & Công nghệ (TRL)	Chi phí Kinh tế & Rào cản Chính sách	Tiềm năng Giảm phát thải & Môi trường	Lộ trình áp dụng đề xuất
	đường ống bơm sâu và đo lường hệ số thẩm ngấm là công nghệ mới.	việc tiết kiệm thuế môi trường do không phải đổ thải lộ thiên.	tế tuần hoàn (tiêu thụ hàng triệu tấn xỉ than/đá bóc).	thêm nguồn thu hỗ trợ CAPEX.

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

5.1. Kết luận

Cam kết Net Zero 2050 đòi hỏi ngành than hầm lò Việt Nam phải thay đổi triệt để tư duy: chuyển từ "thông gió pha loãng thụ động để tránh cháy nổ" sang "can thiệp địa cơ học chủ động để thu hồi tối đa khí nhà kính". Bài báo đã làm rõ 3 luận điểm cốt lõi:

1. **Địa cơ học là nền tảng giải quyết tận gốc:** Việc làm chủ trạng thái ứng suất và quy luật tiến hóa đứt nứt nẻ là tiền đề duy nhất để kiểm soát hệ số thẩm, từ đó "khóa van" chặn đứng sự rò rỉ tự do của CH₄ vào không gian mở.
2. **Tính thẩm thấp là rào cản quyết định:** Đặc thù than Antraxit Quảng Ninh (< 0.1 mD) nguyên khối khiến các phương pháp khoan tĩnh kém hiệu quả, bắt buộc phải có các can thiệp dỡ tải hoặc vỡ vụn chủ động.
3. **Giải pháp phải mang tính hệ thống:** Không có "chìa khóa vạn năng" đơn lẻ. Việc giảm phát thải sâu đòi hỏi sự tích hợp giữa kiểm soát áp lực, kích thích vỉa và công nghệ chèn lấp.

5.2. Kiến nghị

Để hiện thực hóa lộ trình "khai thác xanh bằng địa cơ học", bài báo đề xuất:

Về mặt Kỹ thuật và Nghiên cứu (R&D):

- **Trong ngắn hạn:** TKV cần rà soát, tối ưu hóa sức cản hệ thống vì chống tại các mỏ cơ giới hóa sâu để hạn chế đứt nứt nẻ vuran cao; đồng thời, chuẩn hóa quy trình khai thác vỉa bảo vệ tại các mỏ vỉa chum nhằm dỡ tải ứng suất, tăng hiệu suất thu hồi CH₄ nồng độ cao.
- **Trong trung và dài hạn:** Ưu tiên R&D để làm chủ công nghệ can thiệp chủ động (nứt nẻ thủy lực tốc độ chậm, cắt nóc định hướng) và đưa hệ thống chèn lấp vật liệu hỗn hợp (CPB) từ đá thải và tro xỉ vào ứng dụng thực tế nhằm phong tỏa vĩnh viễn không gian ngấm khí.

Về mặt Cơ chế và Chính sách:

- **Tạo đòn bẩy kinh tế:** Kiến nghị Chính phủ sớm ban hành cơ chế giá điện hỗ trợ (FiT) dành riêng cho năng lượng từ khí Metan mỏ than (CMM) và đẩy nhanh lộ trình vận hành thị trường tín chỉ carbon nội địa để hỗ trợ doanh nghiệp tái đầu tư công nghệ.
- **Định hướng tài trợ khoa học:** Bộ Công Thương và TKV cần ưu tiên nguồn vốn R&D cho các đề tài nghiên cứu tương tác đa trường (Cơ - Thủy động lực học) trong khối đá mở, tạo cơ sở khoa học vững chắc cho quy chuẩn thiết kế mỏ sâu trong tương lai.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Hướng 1: Cơ chế tiến hóa đối nứt nẻ và trường độ thấm

- **Majdi, A., Hassani, F. P., & Nasiri, M. (2012).** Prediction of the height of destressed zone above the mined panel roof in longwall coal mining. *International Journal of Coal Geology*, 98, 62-72. DOI: [10.1016/j.coal.2012.04.005](https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.04.005)
- **Palchik, V. (2003).** Formation of fractured zones in overburden due to longwall mining. *Environmental Geology*, 44(1), 28-38. DOI: [10.1007/s00254-002-0732-7](https://doi.org/10.1007/s00254-002-0732-7)
- **Qu, Q., Xu, J., Wu, J., Qin, W., & Hu, G. (2015).** Three-zone characterisation of coupled strata and gas behaviour in multi-seam mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 78, 91-98. DOI: [10.1016/j.ijrmms.2015.04.018](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.04.018)
- **Wang, F., Xu, J., & Xie, J. (2019).** Effects of arch structure in unconsolidated layers on fracture and failure of overlying strata. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 114, 141-152. DOI: [10.1016/j.ijrmms.2018.12.013](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.12.013)

Hướng 2: Cơ học đỡ tải trong khai thác vỉa bảo vệ

- **Jin, K., Cheng, Y., Ren, T., et al. (2016).** Evaluation of the remote lower protective seam mining for coal mine gas control: A typical case study from the Zhuxianzhuang Coal Mine, Huaibei Coalfield, China. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 33, 44-55. DOI: [10.1016/j.jngse.2016.05.008](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.05.008)
- **Liu, H., & Cheng, Y. (2015).** The elimination of coal and gas outburst disasters by long distance lower protective seam mining combined with stress-relief gas extraction. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 27, 346-353. DOI: [10.1016/j.jngse.2015.08.055](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.08.055)
- **Xue, S., Yuan, L., Wang, Y., & Xie, J. (2015).** Numerical analyses of the mechanisms of outburst and methane migration in a protected coal seam.

International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 76, 218-228.

DOI: [10.1016/j.ijrmms.2015.03.013](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.03.013)

- Yin, G., Li, M., Wang, J. G., Xu, J., & Li, W. (2015). Mechanical behavior and permeability evolution of gas infiltrated coals during protective layer mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 80, 292-301. DOI: [10.1016/j.ijrmms.2015.09.022](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.09.022)

Hướng 3: Can thiệp cơ học chủ động (Nứt nẻ thủy lực & Cắt nóc)

- Ge, Z., Mei, X., Lu, Y., & Tang, J. (2015). Optimization and application of hydraulic fracturing for pressure relief and gas enhancement extraction in high-gassy coal seam. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 27, 436-444. DOI: [10.1016/j.jngse.2015.08.069](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.08.069)
- Huang, B., Wang, Y., & Cao, S. (2015). Cavability control by hydraulic fracturing for top coal caving in hard thick coal seams. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 74, 45-57. DOI: [10.1016/j.ijrmms.2014.12.007](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.12.007)
- Li, W., Liu, Z., Su, E., & Cheng, Y. (2019). Experimental Investigation on the Effects of Supercritical Carbon Dioxide on Coal Permeability: Implication for CO₂ Injection Method. *Energy & Fuels*, 33(3), 2008-2019. DOI: [10.1021/acs.energyfuels.8b03729](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b03729)

Hướng 4: Không chế đới nứt nẻ bằng Cơ học chèn lấp mỏ

- Chang, Q., Zhou, H., Xie, J., & Shen, J. (2020). Comprehensive utilization of coal gangue and its effect on strata control in backfill mining. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(13), 15414-15423. DOI: [10.1007/s11356-020-07941-8](https://doi.org/10.1007/s11356-020-07941-8)
- Sun, Q., Zhang, J., & Zhou, N. (2018). Study and discussion of short-strip coal pillar recovery with cemented paste backfill. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 104, 147-155. DOI: [10.1016/j.ijrmms.2018.02.022](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.02.022)
- Zhang, J., Zhang, Q., Sun, Q., et al. (2015). Surface subsidence control theory and application to backfill coal mining technology. *Environmental Earth Sciences*, 74(2), 1439-1448. DOI: [10.1007/s12665-015-4133-0](https://doi.org/10.1007/s12665-015-4133-0)

Tài liệu Quốc tế đánh giá đặc thù Việt Nam

- APERC. (2022). *APERC Coal Report 2022*. Asia Pacific Energy Research Centre. Tokyo, Japan.
 - Tóm tắt: Báo cáo quốc tế ghi nhận thực trạng khai thác than tại vùng bể Antraxit Quảng Ninh gặp rào cản tỷ lệ thu hồi khí CBM thấp do tính thấm của than cực kỳ nhỏ.

- **Liu, X., Song, D., He, X., et al. (2022).** Experimental Study of the Structural Damage to Coal Treated by a High-Voltage Electric Pulse Discharge in Water. *Energy & Fuels*, 36(12), 6204-6216. DOI: [10.1021/acs.energyfuels.2c01199](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c01199)

Các nghiên cứu và nền tảng tại Việt Nam

- **Nguyen, T. V., Nguyen, H. P., et al. (2021).** Forecast methane content in coal seams from -250m to -400m of Mong Duong coal mine. *Journal of Mining and Earth Sciences*, 62(5a), 76-84. DOI: [10.46326/JMES.2021.62\(5a\).10](https://doi.org/10.46326/JMES.2021.62(5a).10)
- **Nhan, D. T. T., Le, D. T., Vu, D. T. T., & Nguyen, A. T. (2026).** Analysis of Vietnam coal mining pressure under competent strata using field measurement. *Journal of Mining and Earth Sciences*, 67(2), 32-40. DOI: [10.46326/JMES.2026.67\(2\).03](https://doi.org/10.46326/JMES.2026.67(2).03)
- **Nguyen, P. H., Nguyen, C. K., & Nguyen, T. K. T. (2023).** Research of Building the Reasonable Mixing Ratio between Waste Rock and Fly Ash as Backfill Material in Mongduong-Cocsau Area, Quang Ninh, Vietnam. *Inżynieria Mineralna*, 2(1). DOI: [10.29227/IM-2023-02-39](https://doi.org/10.29227/IM-2023-02-39)