



ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG ÁP DỤNG Ô TÔ TẢI LẠI PIN NHIÊN LIỆU VÀ PIN ĐIỆN PHỤC VỤ KHAI THÁC MỎ LỘ THIÊN

Nguyễn Đăng Tấn^{1,*}, Tạ Ngọc Hải²

¹Trường Đại học Thủy lợi, 175 Tây Sơn, Hà Nội, Việt Nam

²Hội Khoa học và Công nghệ Mỏ, 226 Lê Duẩn, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 02/7/2025

Ngày nhận bài sửa: 08/9/2025

Ngày chấp nhận đăng: 10/9/2025

^{1,*}Tác giả liên hệ:

Email: nguyendangtan@tlu.edu.vn

TÓM TẮT

Khi ngành công nghiệp khai khoáng tìm cách phát triển bền vững hơn, các tập đoàn khai khoáng mong muốn tìm nguồn năng lượng phát thải các bon thấp cho các xe tải vận chuyển khoáng sản. Thay thế động cơ diesel xe tải mỏ bằng pin điện hoặc bằng pin nhiên liệu đã được nghiên cứu áp dụng. Mỗi hệ thống có những ưu, nhược điểm riêng. Gần đây, trên thế giới đã có những nghiên cứu áp dụng hệ thống động lực lai giữa pin nhiên liệu và pin điện dùng cho ô tô tải mỏ. Pin nhiên liệu kết hợp hydro và oxy để tạo ra điện, pin điện lưu trữ điện năng để sử dụng khi cần tăng công suất đột ngột và tái tạo năng lượng khi phanh. Khi thay thế động cơ diesel, thách thức đặt ra là phải cải tiến xe tải được thiết kế ban đầu dùng động cơ diesel thành xe tải sử dụng pin nhiên liệu đồng thời với pin điện. Bài báo này đưa ra những đánh giá ban đầu một số chỉ tiêu ô tô mỏ công suất lớn dùng động cơ diesel, cải tạo sang sử dụng hệ thống động lực lai giữa pin nhiên liệu và pin điện, làm cơ sở cho việc lựa chọn hệ thống động lực ô tô tải mỏ thân thiện với môi trường.

Từ khóa: pin nhiên liệu, xe tải lại pin nhiên liệu- pin điện.

@ Hội Khoa học và Công nghệ Mỏ Việt Nam

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện nay, khối lượng đất đá thải của các đơn vị thuộc Tập đoàn Công nghiệp Than - Khoáng sản Việt Nam (TKV) chỉ riêng tại vùng Quảng Ninh đã lên tới 150 triệu m³. Để vận chuyển khối lượng đất đá thải này, TKV đã sử dụng nhiều phương tiện, trong đó dùng ô tô là chủ yếu, trong đó có nhiều ô tô tải nặng, tải trọng từ 58 Tấn đến 100 Tấn. Gần đây đã có những thử nghiệm ô tô có trọng tải 130 Tấn truyền động điện. Ngoài ra còn số lượng lớn các ô tô chạy xăng được sử dụng. Khi làm việc, động cơ xe ô tô sử

dụng thải ra các khí độc hại như: Cacbon monoxit (CO), Oxit nito (NOx), Cacbon dioxit CO₂,...gây ô nhiễm môi trường, góp phần gây hiệu ứng nhà kính. Để giảm thải ô nhiễm môi trường, trên thế giới đã đề xuất nhiều giải pháp, trong đó có giải pháp sử dụng pin điện (electric battery), pin nhiên liệu hydro (fuel cell) [1] dùng cho xe tải mỏ. Một giải pháp khác cũng được nghiên cứu, đó là sử dụng hệ thống động lực lai giữa pin nhiên liệu và pin điện cho xe tải mỏ. Bài báo trình bày tính toán đánh giá ban đầu một số chỉ tiêu ô tô mỏ công suất lớn dùng động cơ diesel hiện đang sử dụng ở Việt Nam, cải tạo



sang sử dụng hệ thống động lực lai giữa pin nhiên liệu và pin điện.

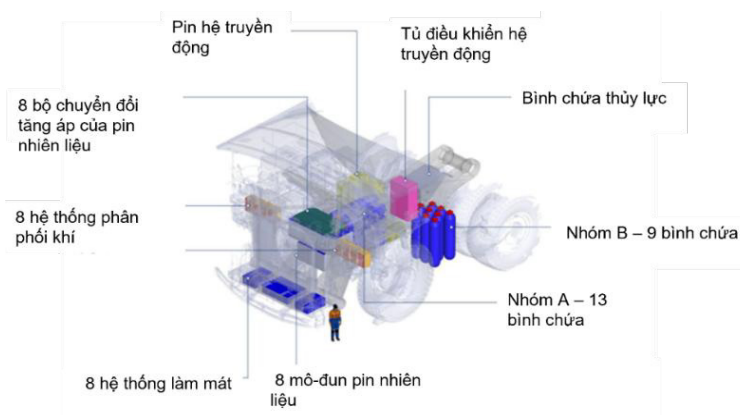
2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Ô tô tải với hệ thống động lực lai giữa pin nhiên liệu và pin điện

Trong bối cảnh toàn cầu đang đối mặt với những thách thức ngày càng nghiêm trọng liên quan đến biến đổi khí hậu, nhu cầu giảm phát thải khí nhà kính trong mọi lĩnh vực sản xuất và vận chuyển trở nên cấp thiết hơn bao giờ hết. Ngành khai thác mỏ, với đặc thù sử dụng nhiều loại phương tiện vận tải hạng nặng tiêu tốn lượng lớn nhiên liệu hóa thạch và phát thải CO₂ cao, đang trở thành một trong những ngành cần được ưu tiên trong lộ trình phi cacbon hóa. Đặc biệt, các xe tải dùng trong khai thác mỏ là một trong những nguồn phát thải lớn nhất trong hoạt động khai thác lộ thiên, do công suất vận hành lớn, trọng tải cao và cường độ làm việc cao. Trong hơn một thập kỷ qua, nhiều giải pháp thay thế động cơ diesel truyền thống đã được nghiên cứu và triển khai thử nghiệm, nổi bật trong số đó là xe ô tô sử dụng pin điện (battery electric vehicles – BEV) và xe ô tô sử dụng pin nhiên liệu (fuel cell electric vehicles – FCEV). Tuy nhiên, cho đến thời điểm hiện tại, đa phần các ứng dụng thực tế mới chỉ triển khai một trong hai công nghệ này một cách đơn lẻ, tùy theo điều kiện hạ tầng, mục tiêu vận hành và nguồn lực kỹ thuật của từng khu vực hay doanh nghiệp. Trong khi đó, tiềm năng của việc kết hợp cả hai công nghệ – tạo thành một hệ thống

động lực lai giữa pin nhiên liệu và pin điện (hệ thống lai pin nhiên liệu- pin điện) – vẫn chưa được khai thác đầy đủ, đặc biệt là trong lĩnh vực vận tải mỏ, nơi mà yêu cầu về công suất, độ tin cậy và khả năng làm việc liên tục là rất cao. Tầm hoạt động hạn chế của các phương tiện dùng pin điện là một trong những mối quan tâm chính cần được giải quyết hiện nay. Tầm hoạt động chủ yếu phụ thuộc vào hệ thống lưu trữ năng lượng. Đối với các ô tô điện cỡ nhỏ, hệ thống lưu trữ năng lượng chủ yếu là pin điện. Tuy nhiên, đối với các ô tô hạng nặng cũng như các dòng xe thể thao điện hiệu suất cao, hệ thống lưu trữ năng lượng lai đã được chứng minh là giải pháp hiệu quả hơn. Hệ thống lưu trữ năng lượng lai thường bao gồm hai thiết bị lưu trữ năng lượng bổ trợ cho nhau, được phối hợp vận hành thông qua một hệ thống điều khiển tập trung. Các thiết bị này có thể là pin điện, pin nhiên liệu và các thiết bị khác – mỗi loại đều có những ưu, nhược điểm riêng và phù hợp với các tình huống ứng dụng khác nhau [2].

Ô tô sử dụng pin nhiên liệu (FCEV) được cung cấp năng lượng bởi một mô đun pin nhiên liệu kết hợp với hệ thống pin điện lithium-ion công suất cao để thay thế cho động cơ diesel truyền thống của xe, được điều khiển bởi một bộ phân phối điện áp cao, cung cấp dung lượng lưu trữ năng lượng đến hơn 1.000 kWh. Cấu tạo chung của xe tải sử dụng pin nhiên liệu được thể hiện trên Hình 1.



Hình 1. Bố trí các bộ phận trên xe tải sử dụng pin nhiên liệu [2]



Trên Hình 2 là ô tô tải mỏ, được cải tạo từ ô tô tải sử dụng pin nhiên liệu thành xe ô tô tải lai giữa pin nhiên liệu và pin điện tạo ra công suất 2 MW, lớn hơn so với công suất mẫu xe diesel trước đó và có tải trọng lên đến 290 tấn [3]. Xe được trang bị bộ pin điện có dung lượng 1,2 MWh. Do sử dụng nhiều pin nhiên liệu, tổng công suất cung cấp lên tới 800 kW. Chiếc xe này được thiết kế để vận hành trong điều kiện khai thác tại mỏ PGMs Mogalakwena ở vùng Đông Bắc Nam Phi. Công ty Anglo American dự định sẽ thay thế đội xe gồm 40 chiếc tại đây, vốn tiêu thụ khoảng một triệu lít dầu diesel mỗi năm.

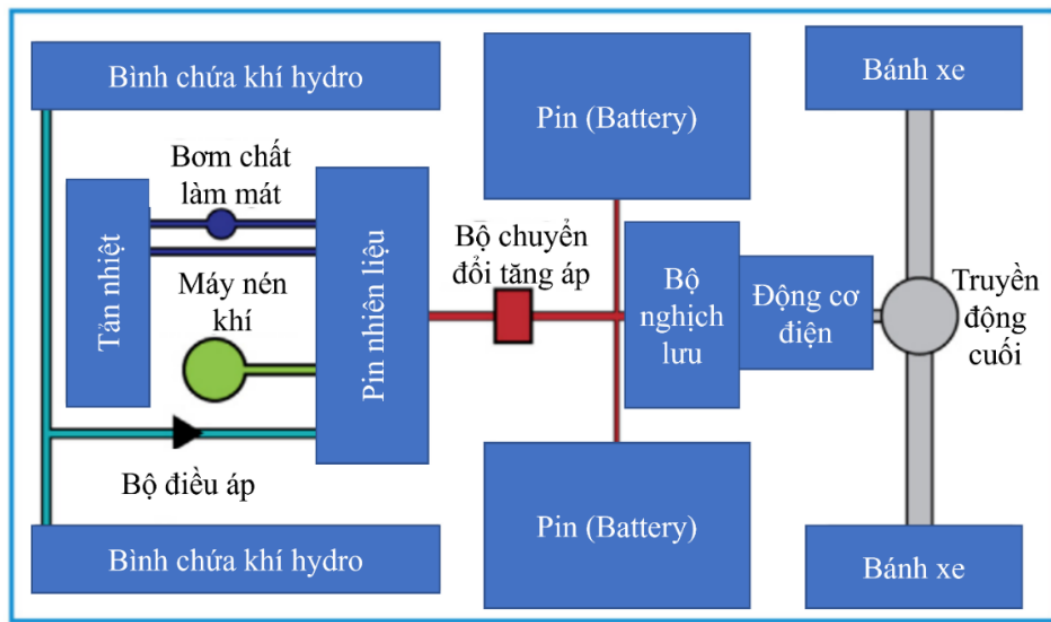
Chiếc xe là một phần trong giải pháp Vận tải không phát thải nuGen (ZEHS) của Công ty Anglo American – một hệ thống hydro xanh được triển khai ngay tại mỏ. Hệ thống này sẽ lấy điện từ trang trại điện mặt trời để cung cấp cho thiết bị điện phân nước, tạo ra hydro – nhiên liệu xanh cung cấp cho các xe tải. Dự án ZEHS dự kiến sẽ hoạt động hoàn chỉnh vào năm 2026. Đây là bước đi đầu tiên trong mục tiêu đưa 8 mỏ của Công ty trở nên trung hòa cacbon vào năm 2030. Công ty khai khoáng toàn cầu này đặt mục tiêu đạt mức phát thải ròng bằng 0 cho toàn bộ hoạt động vào năm 2040 [3].



Hình 2. Xe tải mỏ lai pin nhiên liệu và pin điện

Hình 3 minh họa sơ đồ nguyên lý làm việc của hệ thống truyền động trong xe ô tô sử dụng pin nhiên liệu lai với pin điện. Điện được tạo ra từ pin nhiên liệu kết hợp với điện từ pin điện khi cần thiết để cung cấp cho động cơ điện. Cụ thể, khí hydro được lưu trữ trong các bình chứa và được đưa đến pin nhiên liệu thông qua máy nén khí và bộ điều áp, đồng thời bơm chất làm mát và tản nhiệt giúp kiểm soát nhiệt độ trong quá trình phản ứng. Pin nhiên liệu tạo ra dòng điện một chiều, sau đó điện áp được điều chỉnh thông

qua bộ tăng áp để đạt mức phù hợp. Dòng điện được biến đổi thành điện xoay chiều bằng bộ nghịch lưu, rồi cấp cho động cơ điện. Động cơ điện truyền mô men xoắn đến hệ thống truyền động cuối và làm quay các bánh xe, giúp xe di chuyển. Ngoài ra, hệ thống còn có pin điện đóng vai trò lưu trữ và cung cấp năng lượng bổ xung trong các tình huống cần công suất cao hoặc khi pin nhiên liệu chưa đạt công suất. Khi phanh, năng lượng phanh chuyển thành điện tích trữ vào pin điện.



Hình 3. Sơ đồ cấu tạo ô tô với hệ thống lai pin nhiên liệu - pin điện [1]

2.2. Xác định pin nhiên liệu và pin điện dùng cho ô tô tải với hệ thống động lực lai pin nhiên liệu và pin điện

Để thay thế động cơ diesel cho xe tải công suất lớn bằng hệ thống pin nhiên liệu lai pin điện cần đảm bảo rằng hệ thống mới có khả năng cung cấp đủ công suất và tầm hoạt động tương đương. Đây là một bài toán phức tạp vì không chỉ đơn thuần là chuyển đổi công suất mà còn liên quan đến hiệu suất, trọng lượng, không gian và điều kiện vận hành. Hệ thống lai sẽ bao gồm: Pin nhiên liệu (Fuel Cell Stack) được sử dụng để chuyển đổi hydro thành điện năng. Bình chứa hydro (Hydrogen Tanks) nhằm lưu trữ hydro cung cấp cho pin nhiên liệu. Bộ pin điện (Battery Pack) đóng vai trò là bộ đệm, cung cấp công suất lớn nhất, thu hồi năng lượng phanh. Động cơ điện (Electric Motor) có nhiệm vụ chuyển đổi điện năng thành cơ năng, dẫn động các bánh xe [6].

Để tính toán được kích thước và số lượng pin cần được sử dụng cho xe ô tô này cần các thông số chính: mức năng lượng tiêu tốn trung bình; và khoảng cách mà xe đi được trong một lần nạp [4]. Công suất động cơ điện được tính toán dựa vào tổng lực cản

và tốc độ di chuyển của ô tô [6]. Tuy nhiên, đây là đánh giá sơ lược ban đầu nên chỉ căn cứ vào công suất động cơ diesel trên xe tải sẵn có để tính công suất động cơ điện thay thế.

2.2.1. Các thông số tính toán

Trong cấu hình hệ thống động lực lai này, pin điện không phải là nguồn năng lượng chính cho toàn bộ hành trình, mà chủ yếu là để hỗ trợ và tối ưu hóa hoạt động của pin nhiên liệu nhằm cung cấp công suất lớn nhất. Công suất động cơ diesel trong tài liệu kỹ thuật là công suất tối đa. Khi xe cần tăng tốc, lên dốc đột ngột, pin điện sẽ bổ sung công suất cho pin nhiên liệu để đạt được mức công suất tối đa (hoặc cao hơn nếu cần mô men xoắn tức thời lớn hơn) của động cơ diesel. Ngoài ra, pin điện sẽ hấp thụ năng lượng tái tạo khi xe giảm tốc hoặc xuống dốc. Khi dừng hoặc chạy ở tải thấp, pin nhiên liệu có thể tạm tắt hoặc hoạt động ở công suất thấp hơn. Các thông số tính toán gồm có:

a) Công suất động cơ diesel lớn nhất P_{max} , kW;



b) Thời gian làm việc quyết định dung tích bình chứa pin nhiên liệu cũng như dung lượng pin điện T_{ca}, h ;

c) Hệ số tải α (load factors) là phần trăm công suất động cơ được sử dụng để ước tính mức tiêu thụ nhiên liệu của ô tô tải dùng động cơ diesel;

Phân loại điều kiện hoạt động ô tô tải thành các mức: nhẹ, trung bình và nặng với các hệ số tải tương ứng. Đối với điều kiện nặng, hệ số tải cho các loại xe tải kéo (haul trucks) trong điều kiện này có thể nằm trong khoảng 0,65 – 0,80. Điều này phù hợp với giả định $\alpha=0,7-0,9$ vì xe tải mỏ thường xuyên hoạt động ở điều kiện tải nặng, leo dốc và đường xá không tốt.

d) Hiệu suất hệ thống truyền động điện:

- Các nhà sản xuất lớn như Siemens, ABB, Schneider Electric, Danfoss, ..., thường công bố các thông số kỹ thuật chi tiết về hiệu suất của sản phẩm của họ (động cơ và biến tần) trong catalogue, hướng dẫn sử dụng hoặc trên website chính thức. Hiệu suất của bộ biến đổi (inverter) thường rất cao, có thể đạt đến 98% hoặc hơn. Khi kết hợp với động cơ hiệu suất cao, tổng hiệu suất của hệ thống có thể dễ dàng đạt 90%. Do đó, hiệu suất động cơ điện và bộ biến đổi $\eta_{\text{động cơ-bộ biến đổi}} = 0,9$;

- Hiệu suất pin điện (sạc/xả): Hiệu suất sạc là tỷ lệ phần trăm năng lượng được lưu trữ vào pin điện so với năng lượng được cấp vào để sạc. Pin điện Li-ion có hiệu suất sạc rất cao, thường trên 95% và có thể đạt 99%. Hiệu suất xả là tỷ lệ phần trăm năng lượng có thể lấy ra từ pin so với năng lượng đã được lưu trữ trong pin. Hiệu suất pin (sạc/xả) $\eta_{\text{pin}} = \eta_{\text{sạc}} \times \eta_{\text{xả}} = 0,9$;

- Hiệu suất pin nhiên liệu: hiệu suất điện của pin nhiên liệu thường dao động trong khoảng 40-60%. Một số loại pin nhiên liệu công suất lớn hơn có thể đạt hiệu suất cao hơn, đặc biệt khi áp dụng hệ thống đồng phát nhiệt điện (CHP - Combined Heat and Power), nơi nhiệt thải được tận dụng, tổng hiệu suất có thể lên đến 85%. Tuy nhiên,

hiệu suất điện tính toán cho ô tô chọn trong khoảng 40-60% [4].

$\eta_{\text{pin nhiên liệu}} = 0,5 - 0,6$ (thấp hơn pin điện). Chọn $\eta_{\text{pin nhiên liệu}} = 0,55$

e) Năng lượng riêng của hydro: Giá trị nhiệt cao (Higher Heating Value - HHV) là lượng năng lượng tổng cộng được giải phóng khi hydro cháy hoàn toàn với oxy, bao gồm cả năng lượng của hơi nước ngưng tụ có giá trị: $\sim 141,86 \text{ MJ/kg}$ và chuyển đổi sang kWh: $141,86 \text{ MJ} \times 0,27778 \approx 39,41 \text{ kWh/kg}$. Giá trị nhiệt thấp (Lower Heating Value - LHV) là lượng năng lượng được giải phóng không tính năng lượng ngưng tụ của hơi nước (thường dùng trong ứng dụng thực tế) có giá trị: $\sim 119,93 \text{ MJ/kg}$ và chuyển đổi sang kWh: $119,93 \text{ MJ} \times 0,27778 \approx 33,31 \text{ kWh/kg}$. ($E_{\text{hydro}} = 33,31 \text{ kWh/kg}$).

2.2.2. Xác định năng lượng tiêu thụ

Công suất trung bình yêu cầu từ hệ thống truyền động điện [3]:

$$P_{tb} = \alpha P_{\text{diesel}}, \text{ kW} \quad (1)$$

Tổng năng lượng tiêu thụ trong một ca làm việc:

$$E_{\text{tổng-ca}} = P_{tb} T_{ca}, \text{ kW} \quad (2)$$

Trong một hệ thống lai pin nhiên liệu - pin điện, pin điện thường cung cấp năng lượng cho các yêu cầu công suất lớn nhất, tăng tốc, và thu hồi năng lượng phanh. Pin nhiên liệu cung cấp năng lượng cơ bản và sạc lại pin điện khi cần thiết. Để tính toán, ta giả định một tỷ lệ phân chia năng lượng: Giả sử pin điện cung cấp 30% - 50% tổng năng lượng trong thời gian ngắn hoặc các khi cần công suất lớn nhất. Để đảm bảo khả năng đáp ứng công suất lớn nhất, pin điện cần được chọn với công suất xả cao. Các hệ thống lai được thiết kế để kết hợp hai hoặc nhiều nguồn năng lượng. Tùy thuộc vào mức độ "lai" (mild hybrid, full hybrid, plug-in hybrid), tỷ lệ đóng góp của pin điện sẽ khác nhau. Với các xe lai nhẹ (mild hybrid), pin điện nhỏ hơn và chủ yếu hỗ trợ khởi động/dừng (start-stop) và phanh tái sinh, công suất động cơ điện thường thấp hơn và



không thể chạy độc lập hoàn toàn bằng điện trong thời gian dài. Chọn tỷ lệ năng lượng từ pin: $x_{pin\ n\grave{a}p} = 0,3$ (pin chủ yếu hỗ trợ công suất lớn nhất và phanh tái sinh). Chọn tỷ lệ năng lượng từ fuel cell: $x_{pin\ n\grave{a}n\ l\dot{i}u} = 0,7$.

2.2.3. Xác định dung lượng pin, bình chứa hydro và các chi phí

a) Dung lượng pin cần được tính dựa trên năng lượng cần thiết cho các pha hoạt động lớn nhất, khả năng xả sâu (Depth of Discharge - DoD) và chu kỳ sạc/xả.

- Năng lượng cần cung cấp từ pin điện trong một ca

$$E_{pin\ y\grave{e}u\ c\grave{a}u} = E_{t\acute{o}ng-ca} x_{pin}, \text{ Kw} \quad (3)$$

- Dung lượng pin điện cần: Pin không nên xả cạn hoàn toàn để kéo dài tuổi thọ. DoD thường được giới hạn ở 80-90%.

$$C_{pin} = \frac{E_{pin\ y\grave{e}u\ c\grave{a}u}}{\eta_{pin} DoD}, \text{ kWh} \quad (4)$$

b) Dung tích bình chứa hydro cho pin nhiên liệu

- Năng lượng cần cung cấp từ pin nhiên liệu trong một ca:

$$E_{pin\ n\grave{a}n\ l\dot{i}u\ y\grave{e}u\ c\grave{a}u} = E_{t\acute{o}ng-ca} x_{pin\ n\grave{a}n\ l\dot{i}u}, \text{ kWh} \quad (5)$$

- Khối lượng hydro cần thiết:

$$m_{hydro} = \frac{E_{pin\ n\grave{a}n\ l\dot{i}u\ y\grave{e}u\ c\grave{a}u}}{\eta_{pin\ n\grave{a}n\ l\dot{i}u} E_{hydro}}, \text{ kg} \quad (6)$$

- Dung tích bình chứa Hydro: Nếu sử dụng Hydro khí nén có áp suất 700 bar, khối lượng riêng hydro khí nén ở 700 bar:

$$\rho_{H_2-gas} \approx 0,04 \text{ kg/L} \\ V_{H_2-gas} = \frac{m_{hydro}}{\rho_{H_2-gas}}, \text{ lít} \quad (7)$$

c) Tính chi phí nhiên liệu và nạp điện

- Chi phí tiền điện sạc pin điện

Để tính chi phí tiền điện để sạc pin điện, cần biết dung lượng pin và hiệu suất sạc/xả của pin cần biết dung lượng pin nạp $C_{pin\ n\grave{a}p}$. Năng lượng điện cần nạp vào pin để có năng lượng khả dụng là:

$$E_{\text{điện nạp pin}} = \frac{C_{pin\ n\grave{a}p}}{\eta_{pin}}, \text{ kWh} \quad (8)$$

Giá điện tại Việt Nam có nhiều bậc và có thể thay đổi tùy khu vực và thời điểm. Giả sử

giá điện trung bình cho mục đích công nghiệp/kinh doanh là 3.000 VNĐ/kWh. Chi phí tiền điện để sạc đầy pin:

$$CP_{\text{điện cho pin nạp}} = E_{\text{điện nạp pin}} P_{\text{giá điện}}, \text{ VNĐ} \quad (9)$$

- Chi phí khí Hydro

Để ước tính chi phí khí hydro, chúng ta cần xác định lượng hydro cần thiết dựa trên năng lượng mà pin nhiên liệu cung cấp, hiệu suất của pin nhiên liệu và năng lượng riêng của hydro. Giá hydro trên thị trường dao động khá lớn tùy thuộc vào phương pháp sản xuất (xám, xanh, lam), độ tinh khiết và hình thức vận chuyển/lưu trữ. Giá hydro xanh hiện tại nằm trong khoảng 10 - 17 USD/kg. Giả sử giá hydro trung bình là 10 USD/kg (khoảng 250.000 VNĐ/kg với tỷ giá 1 USD = 25.000 VNĐ). Chi phí khí hydro được xác định:

$$CP_{hydro} = m_{hydro} P_{\text{giá hydro}}, \text{ VNĐ} \quad (10)$$

d) Chi phí dầu diesel khi sử dụng động cơ diesel

Việc tiêu thụ nhiên liệu phụ thuộc vào tình trạng làm việc khác nhau của xe tải, trong phần tính toán này kể đến tải trọng trung bình, quá tải tối thiểu thì mức tiêu thụ nhiên liệu từ $g = 0,07 - 0,1 \text{ l/kWh}$. Lượng dầu diesel tiêu thụ trong 1 ca được xác định

$$V_{\text{tiêu thụ}} = P_{tb} g T_{ca}, \text{ lít} \quad (11)$$

Giá dầu diesel DO 0,001S-V ($P_{\text{giá diesel}}$) hiện nay khoảng 20.000 VNĐ/lít nên chi phí nhiên liệu cho xe tải được xác định

$$CP_{diesel} = V_{\text{tiêu thụ}} P_{\text{giá diesel}}, \text{ VNĐ} \quad (12)$$

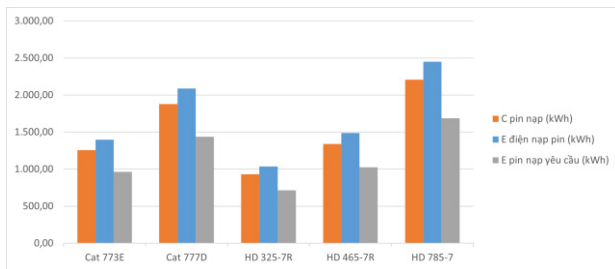
2.2.4. Tính toán hệ thống lai pin nhiên liệu - pin điện cho xe tải mỏ đang sử dụng tại Việt Nam

Sử dụng kết quả trong mục 3.3 để tính toán dung lượng pin, khối lượng và thể tích khí hydro cũng như chi phí nhiên liệu cho một số loại xe tải chở đất đá trong khai thác than lộ thiên ở Việt Nam khi cải tạo để sử dụng hệ thống lai pin nhiên liệu - pin điện. Thông số các loại xe tải trình bày trong Bảng 1.

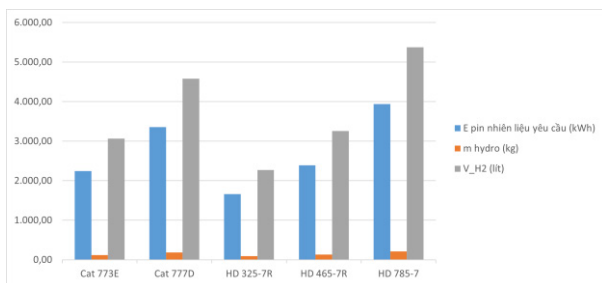
**Bảng 1. Một số xe tải công suất lớn dùng trong khai thác lộ thiên ở Việt Nam**

Loại xe	Tải trọng, tấn	Công suất động cơ, kW	Dung tích thùng nhiên liệu, lít
Cat 773E	55,5	501	700
Cat 777D	96	749	1.137
HD 325-7R	34,5	371	500
HD 465-7R	55	533	780
HD 785-7	96	879	1.308

Áp dụng các công thức (1) ÷ (12), tính cho các xe: Cat 773E, Cat 777D, HD 325-7R, HD 465-7R và HD 785-7. Thời gian làm việc 1 ca: 8 giờ, Hiệu suất hệ truyền động: 0,90, Hiệu suất động cơ điện và bộ chuyển đổi: 0,90, Hiệu suất pin nhiên liệu: 0,55, Hệ số tải

**Hình 4. Dung lượng, năng lượng nạp và năng lượng yêu cầu của pin điện**

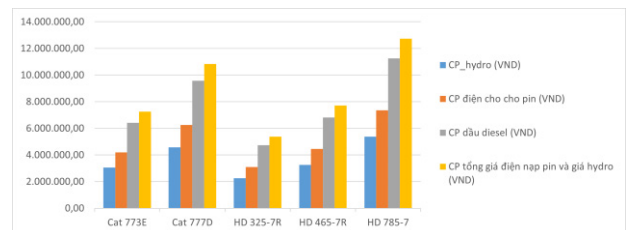
Hình 5 thể hiện năng lượng, khối lượng hydro, dung tích bình chứa yêu cầu của pin nhiên liệu hydro của 05 loại xe tải khi cải tạo để sử dụng hệ thống lai pin nhiên liệu - pin điện, bao gồm: $E_{pin\text{ nhiên liệu yêu cầu}}$, m_{hydro} , V_{H_2} .

**Hình 5. Năng lượng, khối lượng hydro, dung tích bình chứa yêu cầu của pin nhiên liệu**

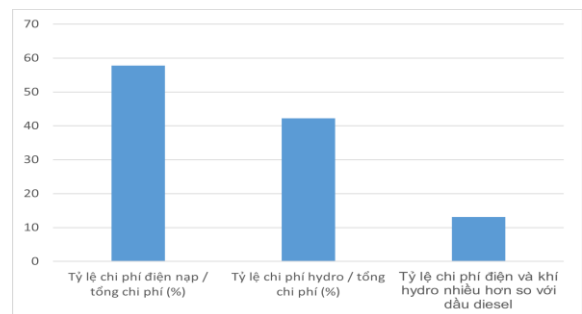
α (hệ số sử dụng tải): 0,8. Kết quả tính toán thể hiện trên các Hình 4 ÷ Hình 7.

Hình 4 thể hiện dung lượng, năng lượng nạp và năng lượng yêu cầu của pin điện của 05 loại xe tải khi cải tạo để sử dụng hệ thống lai pin nhiên liệu - pin điện, bao gồm: C_{pin} , $E_{điện\ nạp\ pin}$, $E_{pin\text{ yêu cầu}}$.

Hình 6 thể hiện chi phí vận hành theo từng nguồn năng lượng, bao gồm: CP_{hydro} , $CP_{điện\ nạp\ cho\ pin}$, $CP_{đầu\ diesel}$, $CP_{tổng}$.

**Hình 6. Chi phí vận hành theo từng nguồn năng lượng**

Hình 7 thể hiện biểu đồ cột trên thể hiện các tỷ lệ chi phí liên quan đến năng lượng trong xe tải khi cải tạo để sử dụng hệ thống lai pin nhiên liệu - pin điện.

**Hình 7. So sánh tỷ lệ chi phí**



3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Từ kết quả tính toán thể hiện bằng đồ thị trên các Hình 4 ÷ Hình 7 có thể thấy:

- Xe ô tô Cat 777D và HD 785-7 có dung lượng pin cần nạp lớn nhất, phản ánh nhu cầu năng lượng cao cho vận hành. Trong mọi trường hợp, $E_{\text{điện nạp pin}}$ (kWh) đều cao hơn C_{pin} , cho thấy tồn tại tổn thất trong quá trình nạp điện (hiệu suất nạp $< 100\%$). Xe ô tô HD 325-7 có nhu cầu năng lượng thấp nhất, phù hợp với tải trọng nhỏ hơn. Mức chênh lệch giữa C_{pin} và $E_{\text{điện nạp pin}}$ cũng phản ánh hiệu suất sử dụng pin thực tế, cho thấy có thể cần tối ưu hóa thiết kế hệ thống lưu trữ năng lượng;

- Xe ô tô HD 785-7 có giá trị cao nhất ở cả ba chỉ số: năng lượng yêu cầu, khối lượng và thể tích hydro, phản ánh mức tiêu thụ lớn tương ứng với tải trọng và công suất cao. Xe ô tô Cat 773E và HD 325-7 có yêu cầu năng lượng và hydro thấp nhất. Tỷ lệ m_{hydro} và V_{H_2} giữa các xe gần như đồng nhất, phản ánh cùng điều kiện nén/lưu trữ hydro. Sự khác biệt lớn về năng lượng yêu cầu giữa các dòng xe cho thấy khả năng áp dụng pin nhiên liệu cần được điều chỉnh phù hợp từng phân khúc tải trọng;

- $CP_{\text{tổng}} = CP_{\text{hydro}} + CP_{\text{điện nạp cho pin}}$ luôn cao hơn chi phí diesel trong tất cả các loại xe xem xét, nhưng mức chênh lệch không quá lớn, đặc biệt với các xe công suất trung bình như xe ô tô HD 325-7 và Cat 773E. Xe ô tô HD 785-7 và Cat 777D có chi phí vận hành cao nhất ở mọi phương án, do yêu cầu năng lượng lớn. Trong hầu hết trường hợp, chi phí điện cao hơn chi phí hydro, có thể do giả định giá điện cao hoặc hiệu suất nạp điện chưa tối ưu. Xe ô tô HD 465-7 là một trong các phương án có tổng chi phí tương đối cân bằng giữa các loại

năng lượng, phù hợp cho đánh giá chuyển đổi năng lượng;

- Tỷ lệ chi phí điện nạp / tổng chi phí là cao nhất, ở mức gần 60%, cho thấy chi phí nạp điện chiếm phần lớn trong tổng chi phí vận hành hệ thống.

Tỷ lệ chi phí hydro / tổng chi phí ở mức khoảng 42%, thấp hơn so với chi phí điện, nhưng vẫn là một phần đáng kể.

Tỷ lệ chi phí điện và khí hydro so với dầu diesel chỉ cao hơn khoảng 13%, cho thấy việc sử dụng điện và hydro có thể giúp giảm chi phí năng lượng đáng kể so với sử dụng nhiên liệu diesel truyền thống.

- Các biểu đồ cho thấy rằng tuy chi phí điện và hydro chiếm phần lớn trong cơ cấu chi phí vận hành, nhưng tổng chi phí năng lượng cao hơn không nhiều so với sử dụng dầu diesel.

Tuy nhiên cần lưu ý rằng, trong điều kiện phát triển của công nghệ hiện nay, giá hydro xanh có xu hướng giảm đáng kể. Trong trường hợp giá hydro xanh giảm xuống đến 8,85 USD/kg, chi phí sẽ bằng dùng dầu diesel và giá hydro xanh giảm giảm nữa sẽ có hiệu quả. Ngoài ra, khi dùng hydro xanh lượng khí thải sẽ giảm đến 89%, so với khi dùng pin điện là 63%, nghĩa là lượng khí thải giảm tăng 1,4 lần.

4. KẾT LUẬN

➤ Các xe ô tô có tải trọng lớn như HD 785-7 và Cat 777D sẽ yêu cầu nhiều năng lượng và chi phí hơn, đặt ra thách thức khi chuyển đổi sang hệ thống lai pin nhiên liệu - pin điện. Các xe ô tô tải trọng nhỏ và trung bình như Cat 773E, HD 325-7 phù hợp hơn cho thử nghiệm và triển khai hệ thống năng lượng thay thế nhờ yêu cầu năng lượng và chi phí thấp hơn. Chi phí hydro hiện vẫn thấp hơn điện trong nhiều trường hợp, cho thấy tiềm năng phát triển nếu cơ sở hạ tầng hydro



được cải thiện. Để cải thiện hiệu quả hệ thống, cần tối ưu hiệu suất nạp điện pin điện và nâng cao hiệu quả sử dụng pin nhiên liệu;

➤ Cần chính sách hỗ trợ giá hydro xanh hoặc giảm thuế nhập khẩu công nghệ nhiên liệu sạch: Nếu giá hydro xanh giảm xuống, phần lớn xe tải với hệ thống lai pin nhiên liệu - pin điện có thể cạnh tranh với ô tô dùng dầu diesel. Ngoài ra khi dùng hydro xanh, lượng khí thải giảm 1,4 lần so với xe tải dùng pin điện;

➤ Ưu tiên thử nghiệm hệ thống lai pin nhiên liệu - pin điện cho các xe tải trung bình như HD 325-7R, HD 465-7R. Đây là các loại xe có mức chênh lệch chi phí thấp hoặc có lợi, phù hợp để triển khai thí điểm chuyển đổi năng lượng sạch;

➤ Đầu tư hạ tầng nạp hydro và lưu trữ năng lượng an toàn: Hệ thống bình chứa áp suất cao và trạm nạp cần được nghiên cứu đồng bộ theo tiêu chuẩn an toàn, đặc biệt trong môi trường mỏ;

➤ Phát triển các mô hình kết hợp tái tạo – điện – hydro: Kết hợp điện mặt trời hoặc gió để sản xuất hydro tại chỗ có thể là giải pháp giúp giảm chi phí năng lượng và giảm phụ thuộc vào thị trường nhiên liệu;

➤ Đây mới là nghiên cứu ban đầu, đưa ra thông tin có tính chất tham khảo. Để có đầy đủ dữ liệu để triển khai các dự án đầu tư cải tạo chuyển ô tô tải mỏ từ sử dụng động cơ diesel sang sử dụng hệ thống lai pin nhiên liệu - pin điện cần có nghiên cứu sâu hơn về thiết kế cải tạo, lựa chọn thiết bị, ... cho ô tô cụ thể để quyết định đầu tư □

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Đăng Tấn và Tạ Ngọc Hải, "Nghiên cứu, ứng dụng pin nhiên liệu "fuel cell" thay thế cho dầu diesel sử dụng trên các thiết bị khai thác mỏ lộ thiên nhằm giảm ô nhiễm môi trường," *Tạp chí Công nghiệp Mỏ*, số 4, 2025.
- [2] Hanlin Lei, Kang Li and Ben Chong, "A review of hybrid energy storage system for heavy-duty electric vehicle," *8th International Electric Vehicle Conference*, 2023.
- [3] Michelle Lewis, *The world's largest hydrogen-battery hybrid mine haul truck starts work*, May, 6- 2022.
- [4] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Stefano Longo and Kambiz M. Ebrahimi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*, 2018 by Taylor & Francis Group, LLC.
- [5] Đình Tấn Ngọc, "Tính toán hệ thống pin xe điện," *Tạp chí Khoa học giáo dục*, số 66, 2021.
- [6] Amr Karam and Ahmed Ezz-Elregal, "Calculations of Battery Capacity for an Electric Vehicle for two persons for operation in the new administrative capital," *6th IUGRC International Undergraduate Research Conference, Military Technical College, Cairo, Egypt, Sep. 5th – Sep. 8th*, 2022.
- [7] Yongqiang Wang, Scott J. Moura and Suresh G. Advani and Ajay K. Prasad, "Power management system for a fuel cell/battery hybrid vehicle incorporating fuel cell and battery degradation," *International journal of hydrogenenergy* 44 (2019) 8479-8492
- [2] Craig Wilson and Williams, "Advanced Engineering developing battery system for Anglo," *American's hydrogen-powered mine haul truck*. 11 February 2020.
- [3] Mario Klanfar, Tomislav Korman and Trpimir Kujundžić, "Fuel consumption and engine load factors of equipment in quarrying of crushed stone," *Tehnički vjesnik* 23, 1(2016), 163-169.
- [4] *Fuel Cell Technologies*. Internet: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells>



EVALUATION OF THE APPLICABILITY OF FUEL CELL - BATTERY HYBRID ELECTRIC TRUCKS FOR SERVING OPEN-PIT MINING

Dang Tan Nguyen^{1,*}, Ngoc Hai Ta²

¹Thuyloi University 175 Tay Son, Ha Noi, Vietnam,

²Vietnam Mining Science and Technology Association, 226 Le Duan, Ha Noi, Vietnam

ARTICLE INFOR

TYPE: Research Article

Received: 02/7/2025

Revised: 08/9/2025

Accepted: 10/9/2025

^{1,*} Corresponding author:

Email: nguyendangtan@tlu.edu.vn

ABSTRACT

As the mining industry moves towards more sustainable development, mining corporations are looking for low-carbon energy sources for trucks. Replacing diesel engines in mining trucks with electric batteries or fuel cells has been studied. Each system has its own advantages and disadvantages. Recently, there have been studies in the world applying hybrid power systems between hydrogen fuel cells and electric batteries for mining trucks. Fuel cells combine hydrogen and oxygen to generate electricity, electric batteries store electricity for use when sudden power increases are needed and regenerate energy when braking. When replacing diesel engines, the challenge is to improve trucks originally designed to use diesel engines into trucks using hybrid fuel cells and electric batteries. This article provides initial assessments of some indicators of large-capacity mining trucks using diesel engines, converted to fuel cell - battery hybrid electric truck, as a basis for choosing environmentally friendly mining truck power systems.

Keywords: fuel cell, fuel cell - battery hybrid electric trucks.

@ Vietnam Mining Science and Technology Association