

## CHIẾN LƯỢC NÂNG CAO HIỆU SUẤT PIN NHIÊN LIỆU BẰNG HỆ THỐNG LẠI FUEL CELL - BATTERY

Đoàn Văn Tương<sup>1</sup>, Viên Xuân Quý<sup>1</sup>, Nguyễn Danh Nghĩa<sup>1</sup>, Nguyễn Thanh Sơn<sup>1</sup>, Lê Phương Long<sup>1\*</sup>,  
Phạm Quốc Trung<sup>2</sup>, Trần Ngọc Phi Long<sup>3</sup>, Trần Văn Tám<sup>4</sup>, Nguyễn Phú Ân<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Lạc Hồng, số 10, Huỳnh Văn Nghệ, Trán Biên, Đồng Nai, Việt Nam

\*Tác giả liên hệ: [phuonglong@lhu.edu.vn](mailto:phuonglong@lhu.edu.vn)

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận: 30/03/2026	Pin nhiên liệu màng trao đổi proton (PEMFC) được đánh giá là nguồn năng lượng sạch nhiều tiềm năng, song vẫn còn hạn chế về khả năng đáp ứng tải động và hiện tượng sụt áp khi vận hành độc lập dưới mức tải lớn. Nghiên cứu này tập trung đánh giá hiệu năng của hệ thống lai gồm pin nhiên liệu PEM 100W kết hợp ắc quy nhằm cải thiện các nhược điểm nêu trên. Quá trình thực nghiệm được tiến hành thông qua việc đối chiếu ba kịch bản vận hành gồm pin nhiên liệu độc lập, ắc quy độc lập và hệ thống lai tại các tải trở 1Ω, 2Ω, 5Ω cùng 10Ω trong thời gian 10 phút. Các thông số về điện áp, dòng điện, công suất và lưu lượng hydrogen được đo đạc để đánh giá hiệu suất của hệ thống. Kết quả cho thấy hệ thống lai duy trì sự ổn định ở điện áp 13 đến 14V và ngăn ngừa được hiện tượng sụt áp đột ngột từ mức OCV 18V xuống 5V tại mức tải trở 1Ω. Bên cạnh đó, nghiên cứu cũng ghi nhận hệ thống lai duy trì mức hiệu suất chuyển đổi tốt hơn đạt mức xấp xỉ 50% so với cấu hình độc lập. Sự phối hợp này không chỉ giúp giảm lượng hydro tiêu thụ mà còn bù đắp được giới hạn về thời gian xả ngắn của thiết bị lưu trữ. Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống lai ghép là một giải pháp phù hợp để nâng cao độ tin cậy cấp nguồn, đồng thời tạo cơ sở cho việc thiết kế các thuật toán quản lý năng lượng nhằm tối ưu hệ thống.
Ngày hoàn thiện: 18/04/2026	
Ngày chấp nhận: 22/04/2026	
Ngày đăng: 06/06/2026	
TỪ KHÓA	
Pin nhiên liệu PEM; Hệ thống lai; Ắc quy; Hiệu suất chuyển đổi; Quản lý năng lượng.	

## PERFORMANCE ENHANCEMENT STRATEGY FOR FUEL CELLS USING A FUEL CELL - BATTERY HYBRID SYSTEM

Đoàn Văn Tương<sup>1</sup>, Viên Xuân Quý<sup>1</sup>, Nguyễn Danh Nghĩa<sup>1</sup>, Nguyễn Thanh Sơn<sup>1</sup>, Lê Phương Long<sup>1\*</sup>,  
Phạm Quốc Trung<sup>2</sup>, Trần Ngọc Phi Long<sup>3</sup>, Trần Văn Tám<sup>4</sup>, Nguyễn Phú Ân<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Lac Hong University, No.10, Huynh Van Nghe St., Tran Bien, Dong Nai, Vietnam

\*Corresponding Author: [phuonglong@lhu.edu.vn](mailto:phuonglong@lhu.edu.vn)

ARTICLE INFO	TÓM TẮT
Received: Mar 30 <sup>th</sup> , 2026	Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs) are widely recognized as a promising clean energy source; however, they still face limitations in dynamic load response and voltage drop when operating independently under high load conditions. This study focuses on evaluating the performance of a hybrid system consisting of a 100 W PEM fuel cell integrated with a battery to overcome these drawbacks. The experimental investigation was conducted by comparing three operating scenarios, including standalone fuel cell, standalone battery, and hybrid configuration, under resistive loads of 1 Ω, 2 Ω, 5 Ω, and 10 Ω over a 10-minute period. Key parameters such as voltage, current, power output, and hydrogen consumption were measured to assess system performance. The results demonstrate that the hybrid system effectively maintains a stable voltage range of 13–14 V and prevents sudden voltage drops from the open-circuit voltage (OCV) of 18 V to as low as 5 V under a 1 Ω load condition. In addition, the hybrid configuration achieves a higher energy conversion efficiency of approximately 50% compared to the standalone system. Furthermore, the integration of the battery not only reduces hydrogen consumption but also compensates for the short discharge duration inherent in standalone energy storage systems. The experimental findings confirm that the hybrid PEMFC–battery system is a viable solution for enhancing power supply reliability and provides a solid foundation for developing advanced energy management strategies to optimize overall system operation.
Revised: Apr 18 <sup>th</sup> , 2026	
Accepted: Apr 22 <sup>nd</sup> , 2026	
Published: Jun 6 <sup>th</sup> , 2026	
KEY WORD	
PEM Fuel Cell; Hybrid System; Battery; Conversion Efficiency; Energy Management.	

## 1. GIỚI THIỆU

Trong bối cảnh toàn cầu đang đối mặt với những thách thức nghiêm trọng về biến đổi khí hậu và sự suy kiệt của các nguồn nhiên liệu hóa thạch, việc dịch chuyển sang các nguồn năng lượng sạch và bền vững đã trở thành một định hướng tất yếu. Trong kỷ nguyên chuyển đổi này, pin nhiên liệu màng trao đổi proton (PEMFC - Proton Exchange Membrane Fuel Cell) nổi lên như một công nghệ trọng tâm nhờ hiệu suất chuyển đổi điện hóa vượt trội, mật độ công suất cao, khả năng vận hành ổn định, không phát sinh tiếng ồn ở nhiệt độ thấp và đặc biệt là phát thải hoàn toàn thân thiện với môi trường. Dựa trên những tổng hợp mới nhất về công nghệ vật liệu của Y. Xue và cộng sự [1] cùng các đánh giá nền tảng của Y. Wang và cộng sự [2], PEMFC đã chứng minh tiềm năng to lớn trong việc thay thế động cơ đốt trong. Tuy nhiên, khi đi vào vận hành thực tiễn, thách thức lớn nhất của hệ thống PEMFC là khả năng đáp ứng tải động còn nhiều hạn chế. Thông qua các phân tích động lực học chất lưu điện toán (CFD) ba chiều, L. Zhang và cộng sự [3] đã chỉ ra rằng sự biến thiên dòng tải đột ngột gây ra sự phân bố dòng chảy đa pha (khí - nước lỏng) không đồng đều, dẫn đến hiện tượng thiếu hụt chất phản ứng cục bộ trên bề mặt xúc tác. Hệ quả tất yếu là điện áp đầu ra bị sụt giảm nghiêm trọng, làm suy giảm hiệu suất chuyển đổi và ảnh hưởng trực tiếp đến độ bền của toàn hệ thống như phân tích của K. Kabouchi và cộng sự [4].

Để khắc phục hiện tượng sụt áp và quản lý sự tích tụ của nước lỏng cũng như khí trơ trong chế độ vận hành anode kín (Dead-End Anode), nhiều nghiên cứu đã tập trung vào việc tối ưu hóa chiến lược xả khí. Điển hình, T. Niu và cộng sự [5] cùng với J. Yao và cộng sự [6] đã tiến hành phân tích và mô phỏng các chu kỳ mở van nhằm duy trì sự ổn định của nồng độ hydro. Tương tự, L. Shi và cộng sự [7] đã chứng minh rằng việc xác định chính xác khoảng thời gian xả tối ưu có khả năng phục hồi đáng kể hiệu suất của hệ thống PEMFC. Mặc dù vậy, các đánh giá thực nghiệm chuyên sâu từ W. Guo và cộng sự [8] lại đưa ra một cảnh báo quan trọng về việc sử dụng hoặc phụ thuộc quá nhiều vào các chu kỳ xả khí liên tục không chỉ gây thất thoát một lượng hydro lớn ra môi trường, mà còn làm gia tăng ứng suất cơ - nhiệt, đẩy nhanh quá trình thoái hóa của màng trao đổi proton. Từ những giới hạn nội tại của việc chỉ can thiệp vào cơ chế xả khí, một hướng tiếp cận ở cấp độ hệ thống mang tính chiến lược và toàn diện hơn đã được đề xuất chính là lai ghép pin nhiên liệu với các hệ thống lưu trữ năng lượng phụ trợ, tiêu biểu nhất là ắc quy.

Trong cấu trúc lai, ắc quy đóng vai trò như một bộ đệm năng lượng lý tưởng. Theo nghiên cứu mới nhất của T. Olatosu và cộng sự [9], khi hệ thống đối mặt với các đỉnh tải hoặc sự biến thiên tải đột ngột, ắc quy sẽ ngay lập tức hỗ trợ cấp phát công suất, giữ cho PEMFC luôn hoạt động ở vùng hiệu suất điện hóa tối ưu và ngăn chặn triệt để tình trạng sụt áp

sâu. Quan điểm này được minh chứng mạnh mẽ qua các mô hình mô phỏng suy thoái của R. Pedicini và cộng sự [10], khẳng định cấu trúc lai giúp giảm thiểu đáng kể sự lão hóa của pin nhiên liệu. Chính vì tính ưu việt này, bài toán định cỡ tối ưu cho cấu hình lai PEMFC-Ắc quy đã được M. Rasool và cộng sự [11] tổng hợp và nhấn mạnh là một yêu cầu tất yếu trong thiết kế các hệ thống năng lượng hiện đại. Tính khả thi của cấu hình này tiếp tục được E. Xu và cộng sự [12] khẳng định trên các dòng xe điện thương mại, đồng thời được E. Oksuztepe và cộng sự [13] mở rộng đánh giá hiệu quả trên các phương tiện giao thông thông minh. Đối với các cơ sở hạ tầng tĩnh yêu cầu độ tin cậy cao, mô hình do S. Kang và cộng sự [14] phát triển đã chứng minh sự ổn định vượt trội so với các hệ thống truyền thống.

Tuy nhiên, để khai thác tối đa tiềm năng của cấu trúc lai, sự hiện diện của các Chiến lược quản lý năng lượng (EMS - Energy Management Strategy) là điều kiện tiên quyết. Một loạt các thuật toán điều khiển tiên tiến đã được đề xuất, nổi bật như thuật toán tối ưu hóa thời gian thực của H. Chen và cộng sự [15], các mô hình học máy được tổng hợp bởi S. Lee và cộng sự [16], chiến lược điều phối tối ưu chi phí của J. Wu và cộng sự [17], hay cách tiếp cận bằng Học tăng cường được áp dụng bởi A. Benterki và cộng sự [18]. Những nền tảng này cũng được A. Pramuanjaroenkij và cộng sự [19] đúc kết toàn diện nhằm hướng tới mục tiêu tối thiểu hóa lượng hydro tiêu thụ.

Đánh giá tổng quan tình hình nghiên cứu trên thế giới cho thấy các công nghệ quản lý năng lượng cho hệ thống lai đã đạt được những bước tiến vượt bậc với sự hỗ trợ của trí tuệ nhân tạo. Trong khi đó tại Việt Nam, lĩnh vực công nghệ hydro và pin nhiên liệu cũng đang bắt đầu thu hút sự quan tâm lớn, nhưng phần nhiều vẫn đang dừng lại ở giai đoạn mô phỏng phần mềm do những rào cản về chi phí trang thiết bị phần cứng. Điểm chung của nhiều công trình nghiên cứu trong và ngoài nước hiện nay là sự phụ thuộc khá lớn vào các mô hình lý tưởng trên máy tính. Việc lạm dụng mô phỏng dễ dẫn đến rủi ro bỏ qua các vi dao động điện áp hay suy hao nội trở vật lý trong môi trường thực tế. Hiện nay vẫn tồn tại một khoảng trống khoa học rõ rệt trong việc định lượng trực tiếp các giới hạn vận hành nguyên bản của phần cứng khi chưa có sự can thiệp của thuật toán, đặc biệt là tại phân khúc quy mô nhỏ 100W. Đây là dải công suất mục tiêu của các thiết bị bay không người lái hoặc robot tự hành cỡ nhỏ. Ở quy mô này, quán tính điện hóa rất thấp khiến hiện tượng sụt áp động học diễn ra khốc liệt và nhạy cảm hơn nhiều so với hệ thống lớn. Do đó việc thiết lập một hệ quy chiếu tĩnh bằng tải thuần trở nhằm xác định ranh giới hiệu suất tối đa của thiết bị chính là cơ sở dữ liệu nền tảng không thể thiếu trước khi tiến hành lập trình các bộ điều khiển phức tạp.

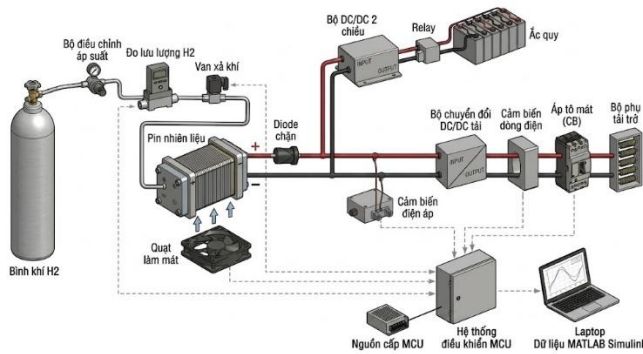
Xuất phát từ những hạn chế nêu trên, bài báo này trình bày một nghiên cứu thực nghiệm chuyên sâu nhằm đánh giá

toàn diện hiệu suất của hệ thống lai PEMFC 100W kết hợp Ắc quy. Bằng phương pháp thiết lập và đối chiếu trực tiếp ba kịch bản vận hành độc lập: (1) Chỉ sử dụng Pin nhiên liệu, (2) Chỉ sử dụng Ắc quy, và (3) Hệ thống lai, dưới bốn phân khúc tải thuần trở từ nặng đến nhẹ ( $1\Omega$ ,  $2\Omega$ ,  $5\Omega$ ,  $10\Omega$ ), nghiên cứu tiến hành định lượng các thông số vận hành cốt lõi. Kết quả thực nghiệm giải quyết ba mục tiêu định lượng cụ thể. Đầu tiên là xác định thời gian đáp ứng tải tối đa của ắc quy độc lập. Thứ hai là lập bản đồ hiệu suất để chứng minh cấu hình lai là điểm làm việc tối ưu nhất. Cuối cùng nghiên cứu đề xuất một chiến lược quản lý năng lượng riêng biệt bám sát giới hạn vật lý của phần cứng nhằm duy trì hiệu năng ở mức tốt nhất.

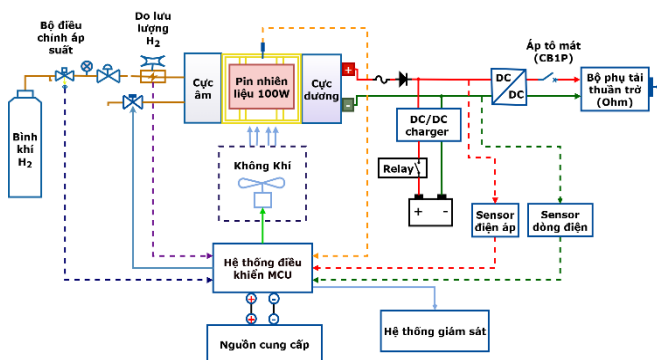
## 2. MÔ HÌNH NGHIÊN CỨU

### 2.1 Thiết lập mô hình thực nghiệm hệ thống lai pin nhiên liệu pem 100w - ắc quy

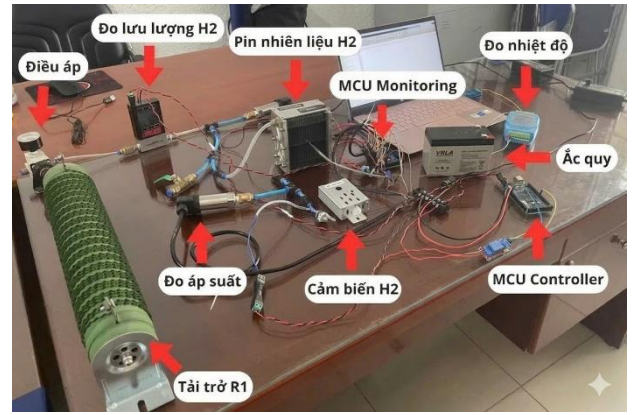
Nhằm đánh giá thực nghiệm khả năng phối hợp công suất và triệt tiêu hiện tượng sụt áp của cấu trúc lai ghép, một mô hình vật lý bao gồm pin nhiên liệu màng trao đổi proton (PEMFC) và ắc quy đã được thiết kế và đưa vào nghiên cứu thực nghiệm. Kiến trúc đề xuất, sơ đồ nguyên lý đầu nối và mô hình hệ thống thử nghiệm thực tế được minh họa lần lượt qua Hình 1, Hình 2 và Hình 3.



Hình 1. Mô hình kiến trúc tổng thể của hệ thống lai PEMFC và ắc quy.



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý của hệ thống lai PEMFC - Ắc quy.



Hình 3. Mô hình thực nghiệm mô phỏng hệ thống lai pin nhiên liệu - ắc quy

Hệ thống được xây dựng xoay quanh hai nguồn năng lượng cốt lõi: một khối pin nhiên liệu PEM công suất 100W (H100, Horizon Fuel Cell Technologies, Singapore) kết nối song song với một ắc quy chi-axit (12V-7.5A).

Về hệ thống cung cấp khí nhiên liệu, hydro tinh khiết được trích xuất từ bình khí H<sub>2</sub>, đi qua cụm bộ điều chỉnh áp suất (Regulator Hydrogen Gas, TANAKA Brand, Japan) và van cơ (Pressurized compressed air, Airtac Brand, Origin of Taiwan) để giảm áp và duy trì áp suất đầu vào ở ngưỡng an toàn, ổn định (khoảng 0.5 bar). Dòng khí này tiếp tục đi qua thiết bị đo lưu lượng H<sub>2</sub> (M-20SLPM-D/5M, Alicat Scientific Inc, USA) trước khi được đưa vào cực âm (Anode) của pin nhiên liệu. Ở cực dương (Cathode), lượng oxy cần thiết cho phản ứng điện hóa được cung cấp từ không khí môi trường thông qua một quạt làm mát. Ở đường khí thải của buồng Anode, một van xả khí được bố trí nhằm mục đích định kỳ xả bỏ lượng nước lỏng và khí trơ tích tụ, giúp duy trì hiệu suất phản ứng trên bề mặt xúc tác.

Về mặt điện học và quản lý năng lượng, điện áp đầu ra từ pin nhiên liệu được dẫn qua một diode chặn. Linh kiện này đóng vai trò thiết yếu nhằm bảo vệ màng pin khỏi hiện tượng dòng điện ngược dội lại từ ắc quy khi có sự chênh lệch điện áp. Sau diode, mạch điện được phân nhánh song song: một nhánh đi qua bộ sạc DC/DC (kết hợp với Relay) để quản lý quá trình nạp/xả an toàn cho ắc quy; nhánh còn lại đi qua áp tô mát (CB1P) để cung cấp công suất trực tiếp cho bộ phụ tải trở. Bộ tải thuần trở này được thiết kế để có thể thay đổi các giá trị điện trở ( $1\Omega$ ,  $2\Omega$ ,  $5\Omega$ ,  $10\Omega$ ), phục vụ cho việc giả lập các kịch bản phụ tải từ lớn, vừa và nhỏ.

Về hệ thống giám sát và thu thập dữ liệu (DAQ), toàn bộ hoạt động của trạm thử nghiệm được điều phối bởi một bộ vi điều khiển trung tâm (MCU Controller/Monitoring) (Arduino Mega2560, Italy). Thông qua sơ đồ nguyên lý và mô hình thực tế, có thể thấy MCU liên tục nhận tín hiệu phản hồi từ các cụm cảm biến đo lường, bao gồm: cảm biến điện áp, cảm biến dòng điện (INA219, Texas Instruments, Mỹ), đo nhiệt độ (RS20K-C, SULINKIOT, Trung Quốc), đo áp suất (ES-P300, Electesla, Trung Quốc) và đo lưu lượng H<sub>2</sub>.

Các dữ liệu này không chỉ là cơ sở để MCU xuất tín hiệu điều khiển tốc độ quạt làm mát và chu kỳ đóng/mở van xả khí, mà còn được truyền tải liên tục theo thời gian thực về máy tính. Tại đây, phần mềm MATLAB Simulink được sử dụng để hiển thị các đồ thị trạng thái, lưu trữ số liệu điện áp, dòng điện và lưu lượng khí tiêu thụ, tạo nền tảng vững chắc cho quá trình đánh giá và tính toán hiệu suất ở phần kết quả.

Về độ tin cậy của hệ thống đo lường, cảm biến điện áp và dòng điện INA219 có sai số đo lường ở mức 1%. Dựa trên nguyên lý căn bậc hai của tổng bình phương, sai số truyền qua cho giá trị công suất điện được định lượng xấp xỉ 1.41%. Bên cạnh đó thiết bị đo lưu lượng hydro có sai số chuẩn là 0.8%. Khi tổng hợp các nguồn sai số này lại, sai số tổng thể của toàn bộ hệ thống đánh giá hiệu suất đạt mức 1.62%. Mức độ sai lệch này nằm an toàn dưới ngưỡng 2% cho phép của các tiêu chuẩn đo lường năng lượng, qua đó cung cấp cơ sở toán học vững chắc để khẳng định độ tin cậy của dữ liệu thực chứng.

## 2.2. Thực hiện thí nghiệm

Để đánh giá toàn diện năng lực đáp ứng tải và hiệu quả chuyển đổi năng lượng của cấu trúc lai, quá trình thực nghiệm được thiết kế và tiến hành thông qua ba cấu hình vận hành độc lập: (1) Hệ thống chỉ sử dụng pin nhiên liệu đơn lẻ, (2) Hệ thống chỉ sử dụng ắc quy, và (3) Hệ thống lai kết hợp song song giữa pin nhiên liệu và ắc quy. Trong mỗi kịch bản, hệ thống được thử nghiệm với bốn mức tải thuần trở khác nhau, lần lượt là 1Ω, 2Ω, 5Ω và 10Ω, nhằm giả lập các điều kiện vận hành từ tải lớn đến tải nhỏ. Trong suốt quá trình đo đạc, áp suất khí hydrogen đầu vào luôn được duy trì ổn định ở mức 0.5 bar thông qua cụm van điều áp. Thời gian vận hành liên tục cho mỗi trường hợp được ấn định là 10 phút. Khoảng thời gian này được tính toán kỹ lưỡng nhằm đảm bảo toàn bộ hệ thống đạt được trạng thái xác lập về mặt nhiệt động lực học và điện hóa học. Trong suốt chu trình thí nghiệm, các biến số cốt lõi bao gồm dòng điện, điện áp, và lưu lượng hydrogen tiêu thụ được hệ thống thu thập dữ liệu (DAQ) ghi nhận liên tục theo thời gian thực và trích xuất qua nền tảng MATLAB Simulink. Đặc biệt, đối với kịch bản hệ thống lai (3), pin nhiên liệu được ghép nối với ắc quy thông qua một mạch bảo vệ diode nhằm triệt tiêu hoàn toàn dòng điện ngược. Cấu hình này cho phép ắc quy ngay lập tức xả dòng hỗ trợ tải khi yêu cầu công suất vượt quá khả năng đáp ứng động học tức thời của pin nhiên liệu. Dữ liệu thu thập từ ba kịch bản này sẽ được đối chiếu chéo để định lượng rõ ưu thế của kiến trúc hybrid trong việc bình ổn công suất và tối ưu hóa nhiên liệu.

## 2.3. Mô hình chuyển đổi năng lượng và đánh giá hiệu suất

Để có cơ sở so sánh đặc tính vận hành giữa các cấu hình, mô hình tính toán chuyển đổi năng lượng đã được thiết lập. Dựa trên dữ liệu điện áp và dòng điện đo được từ các cảm

biến, công suất phát tức thời của hệ thống được xác định. Tuy nhiên, để đánh giá chính xác giá trị năng lượng thực tế mà hệ thống cung cấp cho bộ phụ tải, công suất hữu ích được tính toán thông qua phương trình (1):

$$P_{net} = P_{stack} - P_{auxiliary} \quad (1)$$

Trong đó:

$P_{net}$ : Công suất hữu ích cấp cho tải (W).

$P_{stack}$ : Tổng công suất điện sinh ra từ khối pin nhiên liệu (W).

$P_{auxiliary}$ : Công suất tiêu hao cho các thiết bị phụ trợ của hệ thống, bao gồm quạt tản nhiệt cung cấp oxy, hệ thống điều khiển MCU và các cảm biến (W).

Sau khi xác định được công suất hữu ích và ghi nhận lưu lượng khí hydro cấp vào, hiệu suất thực của hệ thống được đánh giá dựa trên nhiệt trị thấp của hydrogen. Hiệu suất hệ thống trong toàn bộ thời gian khảo sát được xác định theo phương trình (2):

$$\eta_{LHV} = \frac{\int P_{net}(t)dt}{\Delta H \int m_{H_2}(t)dt} \quad (2)$$

Trong đó:

$\eta_{LHV}$ : Hiệu suất chuyển đổi năng lượng tổng thể của hệ thống.

$P_{net}(t)$ : Công suất hữu ích tại thời điểm t (W).

$\Delta H$ : Nhiệt trị thấp của khí hydrogen (LHV).

$m_{H_2}(t)$ : Lưu lượng khối lượng khí hydrogen tiêu thụ tại thời điểm t.

Thông qua mô hình toán học này, tỷ lệ chuyển đổi từ năng lượng hóa học (dòng khí hydro) sang năng lượng điện hữu ích sẽ được định lượng một cách chính xác. Sự chênh lệch về hiệu suất  $\eta_{LHV}$  giữa cấu hình pin nhiên liệu độc lập và hệ thống lai dưới các điều kiện tải khác nhau sẽ là thước đo trực tiếp để đánh giá tính khả thi và hiệu quả của giải pháp đề xuất. Để áp dụng mô hình toán học này quá trình tính toán được thiết lập dựa trên hai giả thiết vật lý cốt lõi. Giả thiết thứ nhất xem dòng khí hydro nạp vào đạt độ tinh khiết lý tưởng do đó nhiệt trị thấp của nhiên liệu được cố định như một hằng số trong suốt thời gian khảo sát. Giả thiết thứ hai xem các suy hao nội trở trên hệ thống dây dẫn truyền tải là rất nhỏ và không đáng kể so với mức năng lượng tiêu hao của các thiết bị phụ trợ chính.

## 3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

Dựa trên dữ liệu thực nghiệm thu thập từ ba cấu hình vận hành, đặc tính động học và khả năng đáp ứng công suất của hệ thống đã được phân tích một cách toàn diện. Các kết quả đạt được không chỉ vạch rõ những giới hạn vật lý của từng

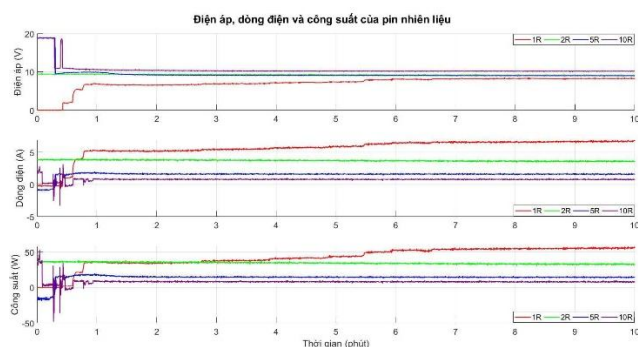
nguồn năng lượng khi hoạt động đơn lẻ, mà còn khẳng định năng lực vượt trội của kiến trúc hybrid trong việc bình ổn điện áp và tối đa hóa công suất hữu ích dưới các chế độ tải thuần trở khắc nghiệt.

### 3.1. Phân tích đặc tính vận hành và đáp ứng công suất của các hệ thống

#### 3.1.1. Phân tích đặc tính vận hành của hệ thống pin nhiên liệu đơn lẻ

Hình 4 mô tả đáp ứng thời gian thực của hệ thống khi chỉ sử dụng nguồn pin nhiên liệu PEMFC. Kết quả cho thấy một số hạn chế của PEMFC khi phải vận hành độc lập dưới các điều kiện tải lớn. Cụ thể tại mức tải  $1\Omega$  (đường màu đỏ), ngay tại thời điểm đóng tải, điện áp của hệ thống sụt giảm đột ngột. Mặc dù sau giai đoạn quá độ, điện áp có phục hồi nhanh chóng và dần ổn định quanh mức 6 đến 8V, nhưng đây vẫn là ngưỡng vận hành dưới mức tiêu chuẩn. Sự sụt áp tức thời này có nguyên nhân chính từ việc thiếu hụt oxy cục bộ khi khả năng tiếp xúc màng xúc tác thay đổi đột ngột, đồng thời tốc độ đáp ứng của hệ thống quạt cấp khí không theo kịp sự gia tăng của dòng điện tải. Hậu quả là tổn thất phân cực nồng độ và tổn thất điện trở tăng cao, làm hệ thống giảm khả năng duy trì điện áp định mức.

Kéo theo sự sụt áp đó, dòng điện đầu ra xuất hiện các dao động với biên độ lớn và thể hiện xu hướng tăng dần nhằm cố gắng bù đắp công suất. Tuy nhiên do điện áp hoạt động đã giảm xuống dưới ngưỡng 10V nên công suất đầu ra trung bình tại tải  $1\Omega$  chỉ duy trì ở mức xấp xỉ 50W, thấp hơn đáng kể so với công suất thiết kế 100W của khối pin. Tình trạng bất ổn định này không chỉ làm suy giảm hiệu suất chuyển đổi mà còn sinh ra lượng nhiệt dư thừa, gây áp lực về ứng suất cơ học và nhiệt học lên màng trao đổi proton, có thể làm thoái hóa vật liệu nếu vận hành liên tục. Dữ liệu thực nghiệm này củng cố nhận định rằng pin nhiên liệu đơn lẻ khó có thể tự đáp ứng các phụ tải lớn một cách tức thời, qua đó đặt ra yêu cầu cần thiết phải kết hợp với hệ thống lai tích hợp ắc quy để đóng vai trò làm bộ đệm năng lượng hỗ trợ đáp ứng tải động.



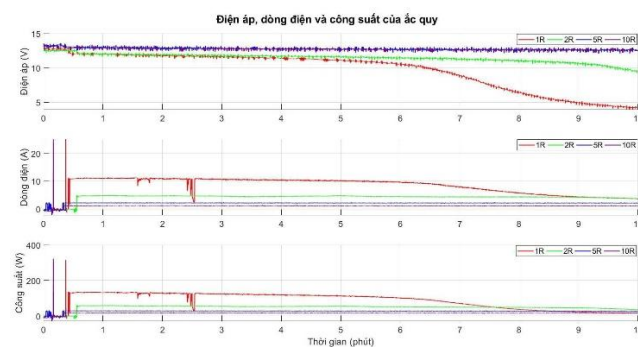
**Hình 4.** Đặc tính điện áp, dòng điện và công suất của pin nhiên liệu độc lập tại các mức tải  $1\Omega$ ,  $2\Omega$ ,  $5\Omega$  và  $10\Omega$ .

#### 3.1.2. Phân tích đặc tính vận hành của ắc quy đơn lẻ

Hình 5 thể hiện đặc tính phóng điện khi hệ thống chỉ sử dụng nguồn cấp là ắc quy. Ở các mức tải trung bình và nhỏ ( $5\Omega$ ,  $10\Omega$ ), ắc quy thể hiện khả năng duy trì điện áp tương đối phẳng và ổn định ở dải 12 đến 13V trong suốt 10 phút khảo sát. Tuy nhiên khi tăng mức tải lên  $2\Omega$ , sự suy hao năng lượng bắt đầu xuất hiện rõ rệt hơn, thể hiện qua việc điện áp có xu hướng giảm dần từ 12V xuống ngưỡng 9V ở phút vận hành thứ 9.

Giới hạn vật lý của ắc quy càng bộc lộ rõ hơn khi đối mặt với tải lớn  $1\Omega$  (đường màu đỏ). Ngay khi đóng tải, dòng điện xả tăng lên mức rất cao. Mặc dù không bị sụt áp tức thời sâu như pin nhiên liệu, nhưng điện áp của ắc quy lại suy giảm tuyến tính và giảm nhanh, chạm mốc 5V chỉ ngay tại phút thứ 6 của chu kỳ thử nghiệm. Sự suy hao điện áp này kéo theo công suất cấp cho tải giảm sâu từ mức hơn 100W xuống dưới ngưỡng 50W.

Từ các dữ liệu thực nghiệm này, có thể thấy nguyên nhân chính là do giới hạn về đặc tính nạp xả và dung lượng lưu trữ nội tại của ắc quy. Mặc dù ắc quy có lợi thế lớn trong việc đáp ứng tức thời các xung tải lớn nhờ động học điện hóa nhanh, nhưng lại nhanh chóng suy giảm năng lượng và khó duy trì công suất cao trong thời gian dài. Phân tích này một lần nữa củng cố luận điểm rằng ắc quy vận hành độc lập khó có thể đảm bảo độ tin cậy cho các hệ thống tải lớn, do đó đòi hỏi phải được lai ghép với một nguồn phát năng lượng liên tục như pin nhiên liệu.



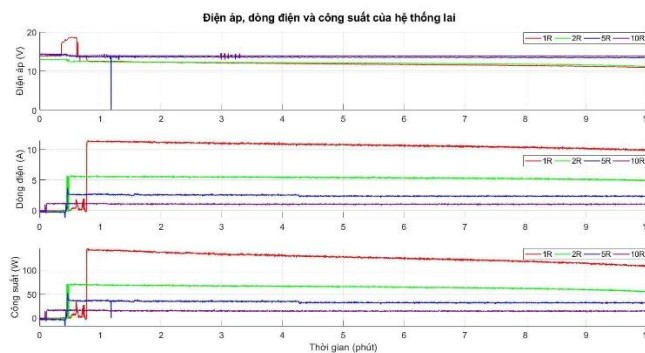
**Hình 5.** Đặc tính phóng điện và công suất của ắc quy độc lập tại các mức tải  $1\Omega$ ,  $2\Omega$ ,  $5\Omega$  và  $10\Omega$ .

#### 3.1.3. Phân tích đặc tính vận hành của hệ thống lai pin nhiên liệu - ắc quy

Hình 6 cho thấy khả năng bù đắp động học của cấu hình lai ghép. Khác với sự bất ổn của hai trường hợp vận hành độc lập, hệ thống lai thiết lập một nền tảng điện áp rất ổn định tại mọi phân khúc tải. Đặc biệt ngay cả khi phải đối mặt với mức tải lớn  $1\Omega$  (đường màu đỏ), hệ thống vẫn duy trì khả năng cấp nguồn liên tục với điện áp được giữ vững ở dải 13 đến 14V. Việc hạn chế hiện tượng sụt áp sâu này tạo tiền đề quan trọng giúp hệ thống duy trì mức công suất đầu ra xấp xỉ 140W, cao hơn hẳn so với khả năng cấp nguồn của pin nhiên liệu hay ắc quy khi vận hành độc lập.

Cơ chế đằng sau sự ổn định này là quá trình phân bổ dòng điện tự động giữa các nguồn phát, trong đó ắc quy đóng vai trò như một bộ đệm năng lượng tin cậy. Khi có sự thay đổi tải đột ngột, ắc quy lập tức xả dòng để bù đắp phần công suất thiếu hụt, giúp màng pin nhiên liệu tránh được ứng suất và hoạt động ở trạng thái xác lập, từ đó cải thiện đáng kể hiệu suất tổng thể. Bên cạnh đó, số liệu từ đồ thị cũng chỉ ra một đặc tính vận hành quan trọng tại các chế độ tải nhỏ (như 5Ω và 10Ω), đó là hệ thống không chỉ đủ khả năng gánh tải mà còn tạo ra một lượng công suất dư thừa. Điều này đặt ra yêu cầu thiết thực là phải tích hợp một chế độ sạc ngược để thu hồi phần năng lượng chưa sử dụng nạp lại cho ắc quy.

Từ các kết quả đo đạc trên, có thể đi đến nhận định rằng trong cấu trúc lai, ắc quy không phải là nguồn phát điện chính mà chỉ đảm nhiệm vai trò bộ đệm động học. Do đó để đạt được hiệu suất tốt nhất cho toàn hệ thống, một bài toán tối ưu hóa cần được đặt ra. Quá trình vận hành thực tế đòi hỏi phải xem xét và tính toán chi tiết chiến lược quản lý năng lượng (EMS), cụ thể là tối ưu hóa thời gian sạc ở dải tải thấp và thời gian xả bù dòng khi hệ thống chạy ở tải cao, nhằm đảm bảo trạng thái điện tích của ắc quy luôn nằm trong vùng an toàn.



Hình 6. Đặc tính điện áp, dòng điện và công suất của hệ thống lai tại các mức tải 1Ω, 2Ω, 5Ω và 10Ω.

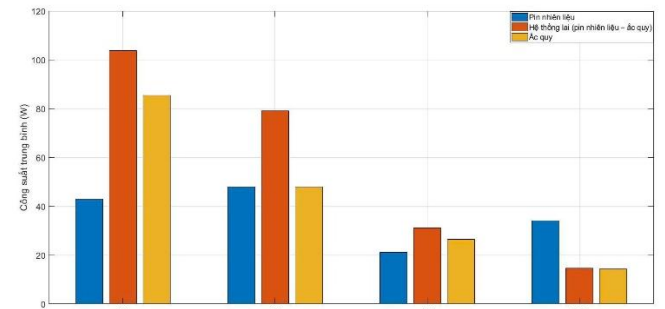
### 3.2. Đánh giá khả năng đáp ứng công suất của các cấu hình vận hành

#### 3.2.1. So sánh công suất trung bình toàn quá trình

Hình 7 tổng hợp giá trị công suất trung bình trong suốt chu kỳ thực nghiệm 10 phút của ba cấu hình vận hành. Tại các phân khúc tải nhỏ (5Ω và 10Ω), biên độ chênh lệch công suất giữa ba hệ thống là tương đối hẹp do bản thân mỗi nguồn đều đủ khả năng đáp ứng yêu cầu phụ tải. Tuy nhiên sự phân hóa về năng lực cấp phát bắt đầu thể hiện rõ rệt hơn khi hệ thống mang các mức tải lớn (1Ω và 2Ω).

Cụ thể tại mức tải 1Ω, hệ thống lai (cột màu cam) ghi nhận mức công suất trung bình cao nhất đạt xấp xỉ 105W. Trong khi đó ắc quy đơn lẻ (cột màu vàng) đạt khoảng 85W do sự suy giảm tuyến tính ở cuối chu kỳ và pin nhiên liệu (cột màu xanh) cho thấy sự sụt giảm khi chỉ duy trì mức

trung bình khoảng 42W. Những số liệu trực quan này cho thấy việc lai ghép cấu hình không chỉ đơn thuần là sự cộng dồn công suất mà còn tạo ra sự hỗ trợ động học hiệu quả. Cấu trúc hybrid giúp khai thác tốt hiệu suất điện hóa của từng nguồn và cho phép toàn hệ thống duy trì mức năng lượng trung bình ổn định hơn so với khi các nguồn vận hành độc lập.

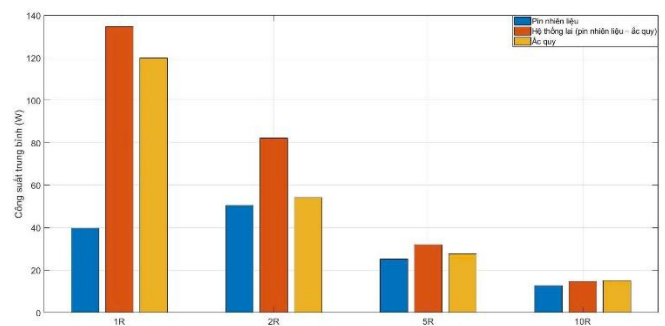


Hình 7. So sánh công suất trung bình của ba cấu hình vận hành tại các mức tải 1Ω, 2Ω, 5Ω và 10Ω.

#### 3.2.2. So sánh công suất ở trạng thái ổn định

Để loại trừ các nhiễu loạn trong pha quá độ (thời điểm dòng khởi động tăng cao hoặc sụt áp tức thời), Hình 8 tập trung phân tích năng lực cấp phát công suất tại trạng thái ổn định. Tại góc nhìn này khả năng đáp ứng của hệ thống lai càng được thể hiện rõ nét.

Ở dải tải 1Ω, trong khi mức công suất ổn định của pin nhiên liệu dao động quanh ngưỡng thấp (khoảng 40W) thì hệ thống lai duy trì được mức công suất xấp xỉ 140W, cao hơn mức 120W của ắc quy ở cùng thời điểm. Nếu đối chiếu sự chênh lệch giữa công suất trung bình (Hình 7) và công suất ổn định (Hình 8) của ắc quy, ta có thể thấy sự suy giảm năng lượng đáng kể của thiết bị này theo thời gian. Ngược lại hệ thống lai duy trì một mặt bằng năng lượng ổn định xuyên suốt quá trình khảo sát. Kết quả này cho thấy cấu hình lai ghép là một giải pháp thiết kế phù hợp cho các ứng dụng đòi hỏi độ tin cậy cao, giúp cải thiện đáng kể hiện tượng suy giảm năng lượng nhanh của ắc quy và hạn chế sự bất ổn định về dòng điện cùng điện áp của pin nhiên liệu đơn lẻ.



Hình 8. So sánh công suất ở trạng thái ổn định của ba cấu hình vận hành tại các mức tải 1Ω, 2Ω, 5Ω và 10Ω.

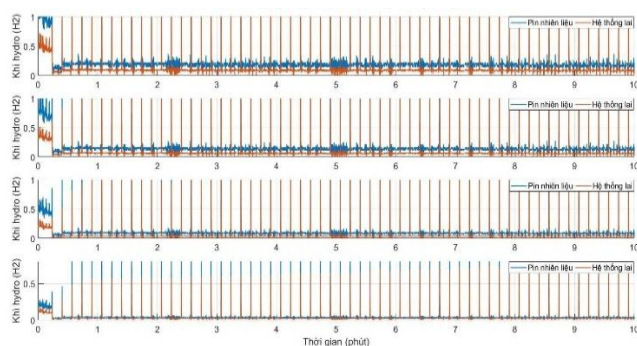
### 3.3. Phân tích lưu lượng tiêu thụ hydrogen và mức độ tối ưu hóa nhiên liệu

Một trong những tiêu chí quan trọng để đánh giá tính khả thi và hiệu quả kinh tế của một hệ thống năng lượng là đặc tính tiêu thụ nhiên liệu. Hình 9 trình bày biểu đồ đối chiếu lưu lượng khí hydrogen tiêu thụ trực tiếp giữa cấu hình pin nhiên liệu độc lập (đường màu xanh) và cấu hình lai ghép (đường màu cam) xuyên suốt thời gian thực nghiệm.

Kết quả đo đạc cho thấy dưới cùng một điều kiện tải định mức, hệ thống lai tiêu thụ một lượng hydro thấp hơn so với khi vận hành độc lập. Quan sát trên đồ thị có thể nhận thấy đường đặc tính lưu lượng khí của hệ thống lai thường duy trì ở mức thấp hơn và thể hiện sự ổn định tốt hơn so với những dao động của hệ thống đơn lẻ.

Cơ sở vật lý đằng sau kết quả này xuất phát từ sự phối hợp động học của ắc quy. Trong cấu hình lai ghép, ắc quy đóng vai trò như một bộ đệm năng lượng. Thay vì yêu cầu pin nhiên liệu phải liên tục thay đổi lượng khí nạp để đáp ứng các thay đổi tải tức thời, ắc quy đã hỗ trợ cung cấp phần năng lượng thiếu hụt. Quá trình này tạo điều kiện cho pin nhiên liệu được duy trì vận hành ổn định tại vùng có hiệu suất điện hóa phù hợp.

Cơ chế vận hành phối hợp này mang lại nhiều lợi ích về mặt kỹ thuật. Việc giảm bớt yêu cầu đáp ứng động học cho pin nhiên liệu giúp hạn chế các đợt gia tăng lưu lượng khí đột ngột vốn là một trong những nguyên nhân gây lãng phí nhiên liệu. Nhờ đó hệ thống lai không chỉ góp phần giảm lượng hydro tiêu thụ nhằm mang lại hiệu quả kinh tế mà còn làm giảm các áp lực về ứng suất cơ học và nhiệt học tác động lên màng trao đổi proton. Việc giảm thiểu các ứng suất này đóng góp một phần quan trọng trong việc bảo vệ linh kiện và góp phần duy trì độ bền vận hành của toàn bộ hệ thống phát điện.



**Hình 9.** So sánh lượng tiêu thụ hydro giữa pin nhiên liệu độc lập và hệ thống lai.

### 3.4. Đánh giá hiệu suất chuyển đổi năng lượng tổng thể của hệ thống

Nhằm đánh giá toàn diện khả năng chuyển đổi và mức độ tối ưu hóa năng lượng, Hình 10 trình bày biểu đồ so sánh hiệu suất tổng thể giữa cấu hình pin nhiên liệu vận hành độc

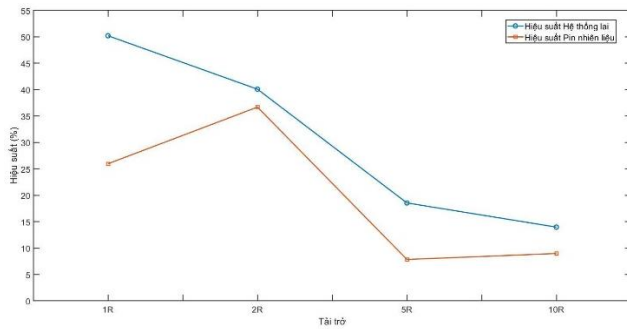
lập (đường màu cam) và hệ thống lai ghép (đường màu xanh) tại các mức tải thuần trở khác nhau.

Phân tích đồ thị cho thấy hệ thống lai ghép duy trì mức hiệu suất tốt trên toàn bộ dải tải khảo sát, nhưng mức độ chênh lệch có sự phân hóa tùy thuộc vào từng phân khúc. Tại khu vực tải lớn ( $1\Omega$ ), hệ thống lai cho thấy hiệu quả rõ rệt khi mức hiệu suất chuyển đổi đạt xấp xỉ 50%, cao gần gấp đôi so với hiệu suất vận hành độc lập của pin nhiên liệu (chỉ đạt khoảng 26%). Dữ liệu này là cơ sở thực chứng quan trọng cho vai trò đệm năng lượng của ắc quy. Khi tải đòi hỏi dòng điện khởi động tăng cao tức thời, sự san sẻ công suất kịp thời từ ắc quy đã giúp pin nhiên liệu tránh được vùng sụt áp sâu do tổn thất phân cực nồng độ, từ đó ổn định điểm làm việc của toàn hệ thống ở vùng có hiệu suất điện hóa phù hợp nhất.

Tại khu vực các dải tải trung bình và nhẹ ( $2\Omega, 5\Omega, 10\Omega$ ), đồ thị ghi nhận hiệu suất của cấu hình lai vẫn tiếp tục duy trì ở mức cao hơn so với cấu hình pin nhiên liệu đơn lẻ. Cụ thể tại mức tải  $2\Omega$ , hệ thống lai đạt hiệu suất khoảng 40%, nhỉnh hơn mức xấp xỉ 37% của hệ thống độc lập. Khả năng duy trì hiệu suất này tiếp tục được ghi nhận ở các dải  $5\Omega$  (khoảng 18% so với 8%) và  $10\Omega$  (khoảng 14% so với 9%). Về mặt bản chất kỹ thuật, kết quả này cho thấy cấu trúc lai không chỉ hoạt động ổn định ở tải lớn mà còn có khả năng phối hợp công suất tốt ở tải nhỏ, giúp hạn chế các hao phí qua linh kiện phụ trợ như bộ sạc DC/DC hay diode chặn dòng.

Dựa trên kết quả phân tích thực nghiệm, biểu đồ hiệu suất một lần nữa củng cố nhận định về khả năng tối ưu hóa năng lượng của cấu trúc lai ghép trên toàn bộ dải tải khảo sát. Bộ dữ liệu này cung cấp cơ sở khoa học thiết thực để phát triển các thuật toán quản lý năng lượng thông minh trong tương lai. Qua đó hệ thống có thể tự động phân bổ công suất linh hoạt nhằm nâng cao hiệu năng toàn diện và duy trì tuổi thọ cho thiết bị.

Khi đối chiếu với các nghiên cứu gần đây, kết quả thực nghiệm cho thấy sự tương đồng nhất định về mặt xu hướng và góp phần bổ sung thêm dữ liệu đo đạc thực tế. Cụ thể nghiên cứu của J. Wu và cộng sự [17] cùng M. Rasool và cộng sự [11] dựa trên các mô hình mô phỏng cũng ghi nhận mức hiệu suất của hệ thống lai dao động quanh ngưỡng 45% đến 50%. Việc hệ thống vật lý trong bài báo này đạt được mức xấp xỉ 50% trong môi trường tải thuần trở thực tế đã phản ánh sự phù hợp giữa kết quả đo đạc và các tính toán lý thuyết trước đây. Sự tương đồng này cho thấy khả năng tối ưu hóa năng lượng của cấu hình lai ghép ở quy mô nhỏ có thể được áp dụng một cách hiệu quả trên phân cứng.



**Hình 10.** So sánh hiệu suất chuyển đổi giữa pin nhiên liệu độc lập và hệ thống lai tại các mức tải  $1\Omega$ ,  $2\Omega$ ,  $5\Omega$  và  $10\Omega$ .

#### 4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã tiến hành thực nghiệm và đánh giá năng lực cấp phát công suất cùng hiệu suất chuyển đổi của hệ thống lai PEMFC 100W kết hợp ắc quy. Thông qua phương pháp đối chiếu trực tiếp dữ liệu từ ba kịch bản vận hành dưới các dải tải thuần trở từ  $1\Omega$  đến  $10\Omega$ , bài báo cung cấp bốn kết quả trọng tâm như sau.

Thứ nhất, nghiên cứu đã định lượng được giới hạn sụt áp động học của pin nhiên liệu ở quy mô vi mô. Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống lai có khả năng khắc phục hiện tượng sụt áp sâu từ mức điện áp hở mạch xuống ngưỡng 5V khi mang tải lớn  $1\Omega$ . Việc duy trì nền tảng điện áp ổn định trong dải 13 đến 14V và xác lập đỉnh công suất xấp xỉ 140W đóng vai trò là minh chứng thực tiễn về năng lực bù đắp quán tính điện hóa của cấu trúc lai ghép.

Thứ hai, bài báo cung cấp đánh giá thực chứng về giới hạn chịu tải của thiết bị lưu trữ nguyên bản. Kết quả đo đạc chỉ ra rằng khi vận hành độc lập tại mức tải  $1\Omega$  và  $2\Omega$  ắc quy đã chạm ngưỡng suy kiệt năng lượng lần lượt tại phút thứ 6 và phút thứ 9. Việc tìm ra độ dốc cạn kiệt này làm rõ cơ chế tương hỗ giữa động học phản ứng nhanh của ắc quy và năng lực phát điện bền bỉ của pin nhiên liệu.

Thứ ba, nghiên cứu đã lập bản đồ hiệu suất chi tiết và xác nhận khả năng tối ưu hóa năng lượng của cấu hình lai ghép. Cụ thể tại mức tải lớn nhất  $1\Omega$  hệ thống lai đạt đỉnh hiệu suất xấp xỉ 50% cao hơn đáng kể so với mức 26% của pin nhiên liệu độc lập. Điều này không chỉ giúp tiết kiệm lượng hydro tiêu thụ mà còn làm giảm các ứng suất cơ học và nhiệt học tác động lên thiết bị.

Cuối cùng, dựa trên ranh giới thời gian cạn kiệt và điểm hiệu suất vừa thiết lập nghiên cứu đóng góp một cơ sở dữ liệu thực tiễn để phát triển chiến lược quản lý năng lượng chuyên biệt. Đây là hệ quy chiếu vật lý quan trọng cho các thuật toán tự động nạp lại ắc quy khi tải thấp và xả bù dòng linh hoạt khi tải cao nhằm duy trì toàn hệ thống vận hành tại vùng hiệu năng tối ưu.

#### 5. TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Y. Xue, M. Alnajideen, R. Navaratne. "Evolution of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Technology for

Aviation Applications A Review", Energy & Fuels, 2025.

DOI: 10.1021/acs.energyfuels.5c03463.

[2] Y. Wang, D. Ruiz Diaz, K. Chen, Z. Wang, X. Adroher. "Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells A review", Materials Today, vol. 32, pp. 178 to 203, 2020.

DOI: 10.1016/j.matod.2019.06.005.

[3] L. Zhang, J. Liu, S. Du, C. Zhao. "Multiphase flow dynamics in metal foam proton exchange membrane fuel cell", Renewable Energy, vol. 226, 2024.

DOI: 10.1016/j.renene.2024.120486.

[4] K. Kabouchi, M. Ettouhami. "Proton Exchange Membrane Fuel Cells Effects of Gas Diffusion Layer Porosity Differences", E3S Web of Conferences, vol. 520, 2024.

DOI: 10.1051/e3sconf/202560100080.

[5] T. Niu, X. Yu, C. Zhang, G. Wang, M. Han, H. Liu, F. Zhao, Q. Shuai. "Purge strategy analysis of proton exchange membrane fuel cells based on experiments and comprehensive evaluation method", Fuel, vol. 363, 130970, 2024.

DOI: 10.1016/j.fuel.2024.130970.

[6] J. Yao, Z. Wu, B. Wang, Y. Yang, F. Yang, Z. Zhang, J. Ren, B. Li. "High stability dead end anode proton exchange membrane fuel cells by purge optimization", Journal of Power Sources, vol. 595, 2024.

DOI: 10.1016/j.jpowsour.2024.234062.

[7] L. Shi, X. Tang, S. Xu, Z. Liu. "Numerical research on liquid water removal mechanism during shutdown purge of fuel cell", Energy, vol. 288, 2024.

DOI: 10.1016/j.energy.2023.129892.

[8] W. Guo, X. Mu, W. Shen, C. Ma, J. Yu, F. Wang, J. Yuan. "The Purge Characteristics and Strategy in a Proton Exchange Membrane Fuel Cell with a Linear Segmentation-Based Anode Recirculation System", Energies, vol. 18, 2025.

DOI: 10.3390/en18092156.

[9] T. Oladosu, J. Pasupuleti, T. Kiong, S. Koh, T. Yusaf. "Energy management strategies control systems and artificial intelligence based algorithms development for hydrogen fuel cell powered vehicles", Int. J. Hydrogen Energy, vol. 61, pp. 1380 to 1404, 2024.

DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.02.284.

[10] R. Pedicini, M. Romagnoli, P. Santangelo. "A critical review of polymer electrolyte membrane fuel cell systems for automotive applications Components, materials, and comparative assessment", Energies, vol. 16, no. 7, 3111, 2023.

DOI: 10.3390/en16073111.

[11] M. Rasool, M. Khan, R. Zo. "A Comprehensive Analysis of Online and Offline Energy Management Approaches for Optimal Performance of Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles", Energies, vol. 16, no. 8, 3325, 2023, DOI: 10.3390/en16083325.

- [12] E. Xu, M. Ma, W. Zheng, Q. Huang. "An Energy Management Strategy for Fuel-Cell Hybrid Commercial Vehicles Based on Adaptive Model Prediction", *Sustainability*, MDPI, vol. 15, no. 10, 7915, 2023.  
DOI: 10.3390/su15107915.
- [13] E. Oksuztepe, M. Yildirim. "PEM fuel cell and supercapacitor hybrid power system for four in-wheel switched reluctance motors drive EV", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol 75, pp. 74 to 87, 2024.  
DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.12.207.
- [14] S. Kang, L. Zhao, J. Brouwer. "Dynamic modeling and verification of a proton exchange membrane fuel cell battery hybrid system to power servers in data centers", *Renewable Energy*, vol. 143, 2019.  
DOI: 10.1016/j.renene.2019.04.150.
- [15] H. Chen, J. Chen, Z. Liu, H. Lu. "Real-time optimal energy management for a fuel cell/battery hybrid system", *Asian J. Control*, vol. 21, pp. 1847 to 1856, 2019.  
DOI: 10.1002/asjc.2065.
- [16] S. Lee, J. Seon, B. Hwang, S. Kim, Y. Sun, J. Kim. "Recent Trends and Issues of Energy Management Systems Using Machine Learning", *Energies*, vol. 17, 2024.  
DOI: 10.3390/en17030624.
- [17] J. Wu, Y. Zhang, J. Ruan, Z. Liang, K. Liu. "Rule and optimization combined real time energy management strategy for minimizing cost of fuel cell hybrid electric vehicles", *Energy*, vol. 285, 2023.  
DOI: 10.1016/j.energy.2023.129442.
- [18] A. Benterki, A. Bäumlér, J. MENG, T. AZIB, M. BOUKHNIFER. "Energy Management Strategy Based on Reinforcement Learning for Fuel Cell Hybrid Vehicle with A New Reward Function Approach", *VPPC*, 2023.  
DOI: 10.1109/VPPC60535.2023.10403148.
- [19] A. Pramuanjaroenkij, S. Kakaç. "The fuel cell electric vehicles The highlight review", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 48, pp. 9401 to 9425, 2023.  
DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.103.

## 6. ĐƠN VỊ CÔNG TÁC

<sup>1</sup>Trường Đại học Lạc Hồng, số 10, Huỳnh Văn Nghệ, Trán Biên, Đồng Nai, Việt Nam

<sup>2</sup>Công ty TNHH Ever Power, TPHCM, Việt Nam

<sup>3</sup>Trường Cao đẳng Công nghệ và Quản trị Sonadezi, Đồng Nai, Việt Nam

<sup>4</sup>Công ty Finetoday Việt Nam, Đồng Nai, Việt Nam

<sup>5</sup>Công ty Thủy lực VP-tech, Đồng Nai, Việt Nam