JOURNAL OF SCIENCE
OF LAC HONG UNIVERSITY
ISSN: 2525 - 2186
Tạp chí Khoa học Lạc Hồng, 2026, 29, 013-018

ẢNH HƯỞNG CỦA DÒNG ĐIỆN ĐẾN ĐẶC TÍNH VẬN HÀNH VÀ QUÁ TRÌNH TĂNG ÁP SUẤT LƯU TRỮ HYDROGEN CỦA HỆ ĐIỆN PHÂN PEM BA CELL

Nguyễn Hồng Quang, Bùi Như Việt, Lê Ngọc Khánh, Lê Trọng Phúc Hậu, Nguyễn Đức Hiếu, Nguyễn Thanh Sơn, Đoàn Văn Tương, Lê Phương Long
Trường Đại học Lạc Hồng, số 10, đường Huỳnh Văn Nghệ, Phường Trấn Biên, thành phố Đồng Nai, Việt Nam
*Tác giả liên hệ: phuonglong@lhu.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận: 18/10/2026
Ngày hoàn thiện: 28/10/2026
Ngày chấp nhận: 05/11/2026
Ngày đăng: 09/11/2026

TỪ KHÓA

Điện phân PEM;
Sản xuất hydro;
Quản lý năng lượng;
Chiến lược vận hành;
Hydro xanh.

TÓM TẮT

Nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của dòng điện đến đặc tính vận hành và quá trình tăng áp suất lưu trữ hydrogen của hệ điện phân nước PEM ba cell tại các mức 5, 10, 15, 20 và 25 A, với áp suất thiết lập 1 MPa. Kết quả được phân tích theo ba nhóm dòng điện: thấp (5 A), trung bình (10–15 A) và cao (20–25 A). Ở dòng điện thấp, áp suất chỉ đạt 0,58 MPa sau 312 phút, chưa đáp ứng yêu cầu lưu trữ. Nhóm dòng trung bình đạt khoảng 0,86–0,87 MPa sau 120–200 phút, tiến gần nhưng chưa đạt áp suất mục tiêu. Trong khi đó, nhóm dòng cao tiến gần 1 MPa sau khoảng 118 phút tại 20 A và 74 phút tại 25 A. Khi tăng dòng điện từ 20 A lên 25 A, thời gian tiến gần áp suất mục tiêu giảm 37,3%, trong khi công suất tăng 31,7%. Kết quả cho thấy dòng điện cao có lợi thế về khả năng tăng áp suất và rút ngắn thời gian nạp hydrogen, nhưng đòi hỏi công suất lớn hơn, cung cấp cơ sở lựa chọn chế độ vận hành phù hợp cho hệ điện phân PEM quy mô nhỏ.

EFFECTS OF OPERATING CURRENT ON THE PERFORMANCE AND HYDROGEN STORAGE PRESSURE EVOLUTION OF A THREE-CELL PEM WATER ELECTROLYZER

Nguyen Hong Quang, Bui Nhu Viet, Le Ngoc Khanh, Le Trong Phuc Hau, Nguyen Duc Hieu, Nguyen Thanh Son, Doan Van Tuong, Le Phuong Long
Lac Hong University, No. 10 Huynh Van Nghe Street, Tran Bien Ward, Dong Nai City, Vietnam
*Corresponding Author: phuonglong@lhu.edu.vn

ARTICLE INFO

Received: Oct 18th, 2026
Revised: Oct 28th, 2026
Accepted: Nov 5th , 2026
Published: Nov 9th , 2026

KEYWORDS

PEM electrolysis;
Hydrogen production;
Energy management;
Operational strategies;
Green hydrogen.

ABSTRACT

This study investigates the effects of operating current on the performance and hydrogen storage pressure evolution of a three-cell proton exchange membrane (PEM) water electrolyzer at 5, 10, 15, 20, and 25 A, with a target storage pressure of 1 MPa. The results are analyzed across three current ranges: low (5 A), medium (10–15 A), and high (20–25 A). At low current, the storage pressure reached only 0.58 MPa after 312 min, remaining below the target. At medium currents, the pressure reached approximately 0.86–0.87 MPa after 120–200 min, approaching but not achieving the target. At high currents, the pressure approached 1 MPa after approximately 118 min at 20 A and 74 min at 25 A. Increasing the current from 20 to 25 A reduced the time required to approach the target pressure by 37.3%, while electrical power increased by 31.7%. These findings demonstrate that higher operating currents accelerate hydrogen storage pressure buildup and shorten the charging time, although at the expense of greater power demand, providing a basis for selecting suitable operating conditions for small-scale PEM electrolysis systems.

Available online at: https://lhj.vn

1. Giới thiệu

Hydrogen được xem là chất mang năng lượng tiềm năng trong quá trình chuyển dịch sang các hệ thống năng lượng sạch, đặc biệt đối với việc chuyển đổi và lưu trữ năng lượng từ các nguồn tái tạo. Trong các công nghệ sản xuất hydrogen bằng điện phân nước, điện phân sử dụng màng trao đổi proton (Proton Exchange Membrane – PEM) có ưu điểm về mật độ dòng điện, khả năng đáp ứng nhanh và cấu trúc tương đối nhỏ gọn. Badwal và cộng sự [1] đã trình bày cơ sở công nghệ PEM trong sản xuất hydrogen và oxygen, đồng thời nhấn mạnh tiềm năng ứng dụng trong các hệ thống năng lượng bền vững. Abdol Rahim và cộng sự [2] tổng quan các mô hình điện phân PEM, tập trung vào quá trình vận chuyển khối và đặc tính điện hóa. Sayed-Ahmed và cộng sự [3] phân tích khả năng vận hành động của bộ điện phân PEM khi kết hợp với nguồn điện tái tạo biến thiên. Các nghiên cứu cho thấy đặc tính vận hành và hiệu quả chuyển đổi năng lượng của hệ thống chịu ảnh hưởng của điều kiện cấp điện, nhiệt độ và các thông số công nghệ.

Đặc tính điện và nhiệt của bộ điện phân là những yếu tố quan trọng khi đánh giá quá trình sản xuất hydrogen. Mazloomi và cộng sự [4] tổng hợp các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu suất điện của quá trình điện phân, chỉ ra rằng điện trở nội và tổn hao điện có thể làm tăng nhu cầu năng lượng và phát sinh nhiệt trong quá trình vận hành. Alkhaldi và cộng sự [5] thực nghiệm khảo sát ảnh hưởng của lưu lượng nước cấp và cấu hình các thành phần cell đến đặc tính điện phân PEM. Ma và cộng sự [6] kết hợp mô hình lý thuyết với thực nghiệm để phân tích ảnh hưởng của nhiệt độ và áp suất đến mật độ dòng điện giới hạn. Những kết quả này cho thấy việc điều chỉnh điều kiện vận hành có liên quan trực tiếp đến điện áp, khả năng truyền khối và đặc tính hoạt động của bộ điện phân. Tuy nhiên, các nghiên cứu chủ yếu đánh giá đặc tính ở cấp cell hoặc trong những điều kiện thử nghiệm xác định, chưa phản ánh đầy đủ diễn biến điện–nhiệt và tích lũy hydrogen của một hệ thống điện phân quy mô nhỏ kết nối với bình chứa. Bên cạnh đặc tính điện hóa, ảnh hưởng của áp suất và dòng điện đến khả năng sản xuất hydrogen đã được khảo sát trong các hệ thống PEM thực nghiệm. Sartory và cộng sự [7] nghiên cứu hệ điện phân PEM áp suất cao, kết hợp thí nghiệm và mô hình bán thực nghiệm để phân tích ảnh hưởng của mật độ dòng điện, nhiệt độ và áp suất sản xuất đến điện áp, lưu lượng hydrogen và hiệu suất vận hành. Kết quả cho thấy các thông số này có mối quan hệ phụ thuộc lẫn nhau, cần được xem xét khi đánh giá chế độ vận hành. Trong khi đó, Zeng và cộng sự [8] nghiên cứu đáp ứng động của bộ điện phân PEM dưới các chế độ khởi động, dừng và thay đổi dòng điện, ghi nhận sự biến thiên điện áp và nhiệt độ khi điều kiện cấp điện thay đổi. Liu và cộng sự [9] thực nghiệm trên hệ điện phân PEM công suất 50 kW, phân tích đồng thời đáp ứng điện áp, nhiệt độ, áp suất và năng lượng tiêu thụ. Các công trình này cung cấp cơ sở để đánh giá mối liên hệ giữa chế độ dòng điện và trạng thái vận hành, mặc dù quy mô và điều kiện khảo sát khác với hệ PEM ba cell. Đối với quá trình tích trữ hydrogen, việc theo dõi áp suất theo thời gian có ý nghĩa quan trọng nhằm đánh giá khả năng nạp khí và lựa chọn chế độ vận hành. Alleori và cộng sự [10] thực nghiệm hệ thống kết hợp bộ điện phân PEM với thiết bị lưu trữ hydrogen bằng hydride kim loại, phân tích ảnh hưởng của điều kiện lưu trữ đến đặc tính vận hành và quá trình tích lũy hydrogen. Công trình cho thấy quá trình sản xuất và lưu trữ cần được đánh giá trong cùng một hệ thống, thay vì chỉ xem xét riêng đặc tính điện phân. Tuy nhiên, do khác biệt về nguyên lý lưu trữ, kết quả trên không thể áp dụng trực tiếp cho quá trình tăng áp suất trong bình chứa khí nén. Nhìn chung, các nghiên cứu đã công bố cung cấp cơ sở quan trọng về đặc tính điện–nhiệt, đáp ứng vận hành và tích trữ hydrogen, nhưng dữ liệu thực nghiệm về diễn biến đồng thời của các thông số này trong hệ PEM ba cell quy mô nhỏ, tại các mức dòng điện xác định và áp suất lưu trữ mục tiêu 1 MPa, vẫn cần được bổ sung.

Từ tổng quan các công trình đã công bố cho thấy, dòng điện vận hành có ảnh hưởng đáng kể đến tốc độ sản xuất hydrogen, đặc tính điện–nhiệt và khả năng tích trữ khí của hệ điện phân PEM. Tuy nhiên, đối với các hệ điện phân quy mô nhỏ được kết nối trực tiếp với bình chứa, việc lựa chọn dòng điện phù hợp để vừa tạo hydrogen vừa tăng áp suất lưu trữ vẫn cần được đánh giá thực nghiệm. Vì vậy, nghiên cứu này thiết lập mô hình điện phân PEM ba cell và đề xuất khảo sát ba nhóm dòng điện: thấp (5 A), trung bình (10–15 A) và cao (20–25 A). Thông qua việc theo dõi các thông số vận hành và diễn biến áp suất theo thời gian, nghiên cứu phân tích khả năng tạo hydrogen, quá trình tích lũy khí và tăng áp suất trong bình chứa đến ngưỡng mục tiêu 1 MPa. Nghiên cứu này nhằm làm rõ ảnh hưởng của từng nhóm dòng điện, từ đó đề xuất chế độ vận hành phù hợp cho hệ thống sản xuất và lưu trữ hydrogen quy mô nhỏ.

Góp phần bổ sung dữ liệu vận hành cho hệ điện phân PEM quy mô nhỏ và cung cấp cơ sở tham khảo để lựa chọn chế độ cấp dòng điện phù hợp với yêu cầu sản xuất và lưu trữ hydrogen.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Cơ sở lý thuyết

Trong quá trình điện phân nước bằng màng trao đổi proton (PEM), phản ứng tạo hydrogen tại cathode được biểu diễn [11]:

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \quad (1)$$

Theo phản ứng (1), mỗi mol hydrogen hình thành cần hai mol electron, tương ứng điện lượng 2F, trong đó F = 96485,33 C/mol là hằng số Faraday. Đối với bộ điện phân gồm N cell nối tiếp về điện, cùng mang dòng điện I và thu chung hydrogen, tốc độ sinh hydrogen được xác định theo định luật Faraday [11-13]:

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{N\eta_F I}{2F} \quad (2)$$

Trong đó, $\dot{n}_{H_2}$ là tốc độ sinh hydrogen (mol/s); N là số cell; η_F là hiệu suất Faraday, biểu diễn dưới dạng thập phân; I là dòng điện thực qua stack (A). Với hệ PEM gồm ba cell, phương trình (2) trở thành:

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{3N\eta_F I}{2F} \quad (3)$$

Phương trình (3) cho thấy, khi hiệu suất Faraday không đổi, tốc độ sinh hydrogen tỉ lệ thuận với dòng điện. Dòng điện lớn hơn cung cấp nhiều điện lượng hơn trong một đơn vị thời gian, làm tăng số mol hydrogen hình thành trong cùng khoảng thời gian.

Khi dòng điện và hiệu suất Faraday được duy trì không đổi, lượng hydrogen sinh ra sau thời gian t được xác định [12]:

$$n_{H_2} = \frac{3\eta_F It}{2F} \quad (4)$$

Trong phương trình (4), n_{H_2} có đơn vị mol và t có đơn vị giây. Do đó, thời gian cần thiết để tạo cùng một lượng hydrogen mục tiêu n* H_2 là:

$$t = \frac{2F\, n^*_{H_2}}{3\eta_F I} \quad (5)$$

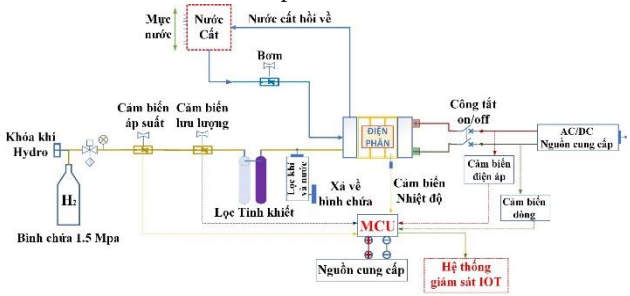
Với cùng lượng khí mục tiêu, cùng cấu hình stack và hiệu suất Faraday tương đương giữa hai chế độ, tỉ số thời gian tạo khí là:

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{I_1}{I_2} \quad (6)$$

Công thức (1) đến công thức (6) là cơ sở lý thuyết để diễn giải ảnh hưởng của các mức dòng 5, 10, 15, 20 và 25 A trong nghiên cứu. Mức độ phù hợp định lượng phải được đánh giá từ dữ liệu thực nghiệm trên cùng lượng khí mục tiêu hoặc cùng điều kiện tích lũy khí.

2.2. Mô hình điện phân hydrogen

Hình 1 trình bày sơ đồ khối cấu hình hệ thống thực nghiệm sản xuất và lưu trữ hydrogen bằng công nghệ điện phân nước màng trao đổi proton (PEM). Hệ thống sử dụng nguồn điện 220V AC thông qua bộ chuyển đổi AC/DC để cấp điện cho stack điện phân ba cell. Điện áp và dòng điện tại đầu vào stack được đo đồng thời để xác định công suất điện trong quá trình vận hành. Nước cấp được xử lý qua cột trao đổi ion; độ dẫn điện và lưu lượng nước được giám sát trước khi đưa vào bộ điện phân.

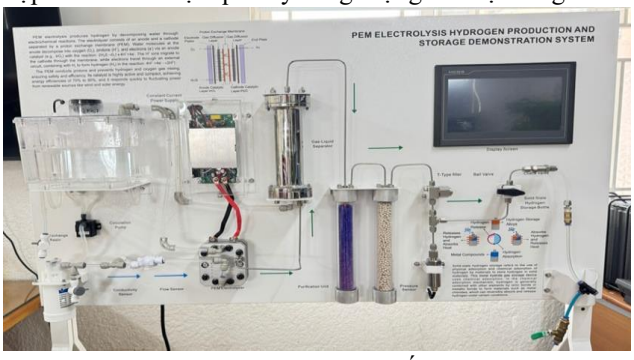


Hình 1. *Sơ đồ khối hệ thống điện phân nước PEM sử dụng nguồn 220 V AC và lưu trữ hydro ở áp suất 1 MPa*

Hydrogen sinh ra tại cathode được dẫn qua bộ tách khí–lỏng và cụm làm sạch để giảm lượng nước và tạp chất trong dòng khí. Sau đó, hydrogen đi qua cụm đường ống có cảm biến áp suất, van bi và van một chiều trước khi được nạp vào bình lưu trữ. Trong nghiên cứu này, áp suất lưu trữ được giới hạn ở 1 MPa. Các thông số điện, nhiệt độ, lưu lượng nước và áp suất được ghi nhận theo thời gian nhằm đánh giá ảnh hưởng của dòng điện đến đặc tính vận hành của bộ điện phân và diễn biến áp suất trong quá trình nạp hydrogen.

2.3. Mô hình thực nghiệm hệ thống điện phân nước PEM

Hình 2 trình bày mô hình thực nghiệm dùng để đánh giá khả năng sản xuất hydro của hệ điện phân nước PEM dưới các mức năng lượng đầu vào khác nhau. Nguồn điện 220 V AC được chuyển đổi sang DC và điều chỉnh lần lượt tại 5, 10, 15 và 20 và 25A. Ở mỗi mức dòng điện, hệ thống ghi nhận điện áp, công suất tiêu thụ, lưu lượng H_2, áp suất và thời gian đáp ứng từ khi cấp điện đến khi hydro được tạo ra ổn định. Nước DI sau xử lý được tuần hoàn vào bộ điện phân PEM; hydro sinh ra được dẫn qua bộ tách khí–lỏng, cụm sấy và làm sạch trước khi lưu trữ trong bình áp suất 2 MPa. Dữ liệu thu thập tại năm chế độ vận hành được sử dụng để so sánh tốc độ sản xuất H_2, thời gian đáp ứng và mức tiêu thụ năng lượng, từ đó xác định vùng vận hành phù hợp cho chiến lược quản lý năng lượng của hệ thống.



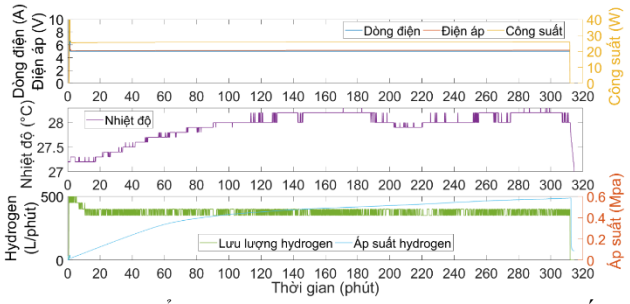
Hình 2. *Mô hình thực nghiệm hệ thống điện phân nước PEM sử dụng nguồn 220 V AC và lưu trữ hydro ở áp suất 1 MPa*

3. Ảnh hưởng của dòng điện đến đặc tính vận hành và quá trình tích trữ hydrogen

3.1. Đặc tính vận hành ở dòng điện thấp (5 A)

Hình 3(a) thể hiện đặc tính vận hành của hệ điện phân PEM tại dòng điện 5 A trong thời gian 312 phút. Ở chế độ này, điện áp stack duy trì trong khoảng 5,0–5,2 V, tương ứng công suất 25–26 W, phản ánh nhu cầu công suất thấp nhất trong năm chế độ khảo sát. Nhiệt độ tăng từ khoảng 27,2 °C lên 28,2 °C và duy trì với biên độ biến thiên nhỏ trong phần lớn thời gian vận hành. Đặc điểm này cho thấy mức độ gia tăng nhiệt tại vị trí đo tương đối hạn chế khi hệ thống hoạt động ở dòng điện thấp. Tuy nhiên, lưu lượng hydrogen hiển thị giảm từ khoảng 450–500 mL/phút trong giai đoạn khởi động xuống 350–400 mL/phút và duy trì trong khoảng giá trị này, mặc dù dòng điện cấp gần như không đổi. Sự khác biệt giữa tín hiệu lưu lượng và tốc độ sinh khí dự kiến theo định luật Faraday cho thấy cần phân biệt lưu lượng ghi nhận tại vị trí cảm biến với tốc độ hydrogen thực tế hình thành tại điện cực.

Về quá trình tích trữ, áp suất tăng lên khoảng 0,40 MPa sau 90 phút và đạt gần 0,58 MPa khi kết thúc thí nghiệm, thấp hơn đáng kể so với áp suất mục tiêu 1 MPa. So với các chế độ dòng điện cao hơn, thời gian vận hành kéo dài nhưng mức áp suất cuối vẫn thấp, cho thấy khả năng tăng áp suất của hệ thống tại 5 A còn hạn chế trong phạm vi thử nghiệm. Sự suy giảm đột ngột của áp suất tại thời điểm kết thúc phản ánh thay đổi trạng thái vận hành hoặc đường khí, nhưng chưa đủ bằng chứng để xác định nguyên nhân cụ thể. Như vậy, chế độ 5 A có ưu điểm về công suất cấp và mức tăng nhiệt nhỏ, song chưa đáp ứng được yêu cầu đạt áp suất lưu trữ mục tiêu trong thời gian khảo sát.



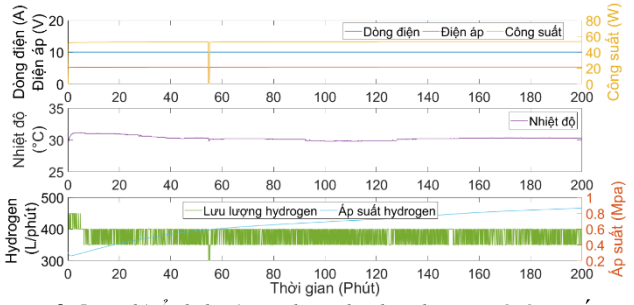
Hình 3. *a) Ảnh hưởng nhiệt độ, lưu lượng và áp suất hydrogen của hệ điện phân PEM tại dòng điện 5 A*

3.2. Sự chuyển biến đặc tính điện–nhiệt và tích lũy hydrogen ở dòng điện trung bình (10–15 A)

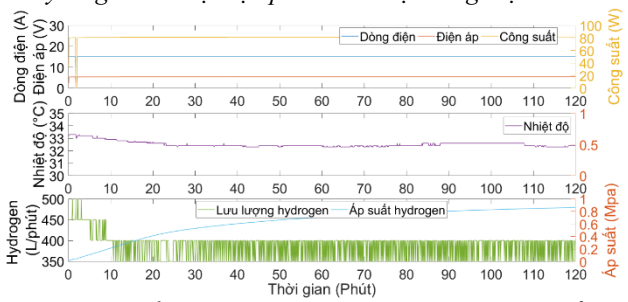
Khi tăng dòng điện từ 10 A lên 15 A, đặc tính điện của hệ thống thể hiện sự thay đổi rõ rệt, trong khi áp suất lưu trữ cuối quá trình đạt mức gần tương đương. Theo Hình 3(b) và 3(c), điện áp stack tăng từ 5,2–5,4 V lên 5,3–5,5 V, kéo theo công suất đại diện tăng từ 53 W lên 81 W, tương đương khoảng 52,8%. Mặc dù công suất tăng đáng kể, áp suất cuối của cả hai chế độ chỉ đạt khoảng 0,86–0,87 MPa, chưa chạm ngưỡng 1 MPa. Đáng chú ý, thời gian ghi nhận ở 15 A là 120 phút, ngắn hơn 40% so với 200 phút tại 10 A. Tuy nhiên, do áp suất ban đầu của thí nghiệm 10 A khoảng 0,27 MPa, trong khi chế độ 15 A bắt đầu gần 0 MPa, sự khác biệt về thời gian và áp suất cuối không thể được sử dụng trực tiếp để định lượng mức cải thiện tốc độ nạp khí theo dòng điện.

Đặc tính nhiệt cho thấy hai trạng thái biến thiên khác biệt. Ở 10 A, nhiệt độ tăng từ khoảng 29,3 °C lên 31,2 °C trong giai đoạn đầu, sau đó giảm và ổn định quanh 30 °C. Ngược lại, tại 15 A, nhiệt độ ban đầu cao hơn, khoảng 33,2 °C, rồi giảm nhẹ và duy trì trong khoảng 32,3–32,6 °C. Sự khác biệt về xu hướng nhiệt không phù hợp với giả định đơn giản rằng tăng dòng điện luôn làm nhiệt độ đo được tăng theo thời gian. Điều này cho thấy trạng thái nhiệt ban đầu và điều kiện trao đổi nhiệt có ảnh hưởng đến đáp ứng nhiệt quan sát được; các dữ liệu hiện tại chưa đủ để tách riêng đóng góp của từng yếu tố. Đồng thời, lưu lượng hydrogen hiển thị ở cả hai chế độ đều hội tụ về khoảng 350–400 mL/phút sau giai đoạn khởi động, dù dòng điện cấp khác nhau 50%. Hiện tượng này đặt ra yêu cầu kiểm tra điều kiện đo lưu lượng, khả năng đáp ứng của cảm biến và ảnh hưởng của hệ thống dẫn khí trước khi sử dụng tín hiệu lưu lượng để đánh giá hiệu suất sinh hydrogen.

Xét tổng thể, việc tăng dòng điện từ 10 A lên 15 A làm tăng công suất cấp và rút ngắn thời lượng ghi nhận để đạt vùng áp suất cuối tương tự. Tuy nhiên, sự khác biệt về điều kiện ban đầu và đặc tính nhiệt cho thấy chưa đủ căn cứ để xác định trực tiếp mức cải thiện hiệu quả nạp khí hoặc hiệu suất năng lượng giữa hai chế độ.



Hình 3. *b)Ảnh hưởng nhiệt độ, lưu lượng và áp suất hydrogen của hệ điện phân PEM tại dòng điện 10 A*



Hình 3. *c)Ảnh hưởng nhiệt độ, lưu lượng và áp suất hydrogen của hệ điện phân PEM tại dòng điện 15 A*

3.3. Sự đánh đổi giữa công suất, nhiệt độ và thời gian tăng áp suất ở dòng điện cao (20–25 A)

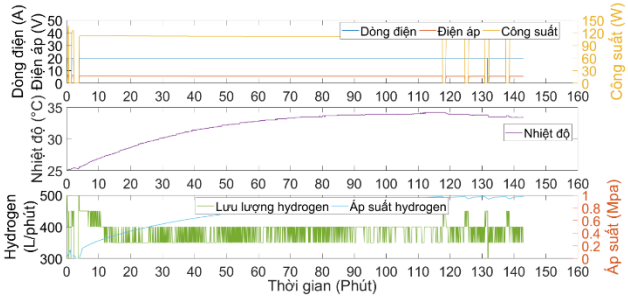
Hình 3(d) và 3(e) cho thấy sự khác biệt đáng chú ý giữa hai chế độ dòng điện cao, đặc biệt về thời gian tiến đến áp suất mục tiêu và mức gia tăng nhiệt độ. Khi dòng điện tăng từ 20 A lên 25 A, điện áp stack chuyển từ khoảng 5,5–5,7 V lên 5,8–6,0 V, trong khi công suất đại diện tăng từ 112 W lên 147,5 W, tương đương 31,7%. Sự gia tăng công suất đi kèm với việc rút ngắn thời gian quan sát để áp suất tiến gần 1 MPa từ khoảng 115–118 phút xuống 70–74 phút. Khi sử dụng các mốc 118 phút và 74 phút, thời gian này giảm khoảng 37,3%. Kết quả thể hiện lợi thế về tốc độ đạt vùng áp suất mục tiêu ở chế độ 25 A, nhưng chưa đủ để khẳng định quan hệ tỷ lệ nghịch giữa thời gian nạp và dòng điện do khác biệt về điều kiện đầu và trạng thái nhiệt.

Phản ứng nhiệt của hệ thống ở hai mức dòng điện cao thể hiện xu hướng tăng rõ rệt. Tại 20 A, nhiệt độ tăng từ khoảng 25,2 °C lên 34,0–34,2 °C, tương đương mức tăng gần 9 °C. Trong khi đó, ở 25 A, nhiệt độ tăng từ 27,5 °C lên khoảng 37 °C chỉ sau 74 phút, với mức chênh lệch khoảng 9,5 °C. Mặc dù thời gian vận hành tại 25 A ngắn hơn, nhiệt độ cuối vẫn cao hơn chế độ 20 A. Điều này cho thấy yêu cầu nạp khí nhanh ở dòng điện cao đi kèm với mức gia tăng nhiệt đáng kể, cần được xem xét khi lựa chọn chế độ vận hành. Tuy nhiên, do nhiệt độ ban đầu không đồng

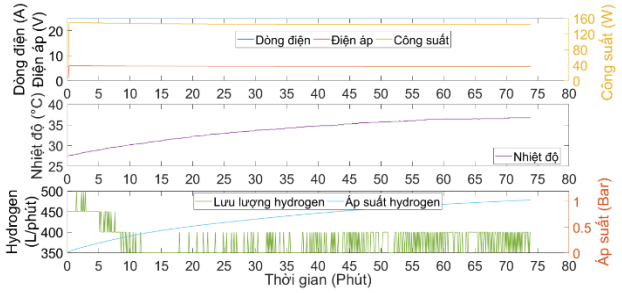
nhất, kết quả không cho phép suy ra trực tiếp công suất tổn hao nhiệt hay hiệu quả làm mát của hệ thống.

Một khác biệt khác được ghi nhận ở trạng thái điện gần cuối quá trình. Tại 20 A, sau khi áp suất tiến sát 1 MPa, điện áp và công suất xuất hiện một số lần sụt giảm ngắn, trong khi tín hiệu dòng điện vẫn duy trì gần mức cài đặt. Trái lại, chế độ 25 A không xuất hiện các biến động công suất tương tự trong thời gian ghi nhận. Hiện tượng tại 20 A có thể liên quan đến thay đổi trạng thái điều khiển, cấp điện hoặc đường khí, song dữ liệu hiện tại chưa đủ để nhận diện cơ chế. Đáng chú ý, lưu lượng hydrogen hiển thị tại cả hai chế độ vẫn chủ yếu dao động quanh 350–400 mL/phút, không phản ánh trực tiếp mức tăng dòng điện theo tỷ lệ dự kiến từ định luật Faraday. Do đó, việc đánh giá sản lượng hydrogen thực tế cần được đối chiếu với điện lượng tích lũy và điều kiện đo lưu lượng.

Nhìn chung, chế độ 25 A đạt vùng áp suất 1 MPa trong thời gian ngắn nhất trong các thí nghiệm, nhưng đòi hỏi công suất lớn nhất và có mức tăng nhiệt đáng kể. So với 20 A, sự cải thiện về thời gian nạp cần được xem xét đồng thời với mức tăng công suất và trạng thái nhiệt, thay vì chỉ dựa trên tốc độ tăng áp suất. Kết quả này cung cấp cơ sở thực nghiệm cho việc lựa chọn chế độ vận hành theo yêu cầu thời gian nạp hydrogen, đồng thời nhấn mạnh sự cần thiết của việc chuẩn hóa điều kiện ban đầu và xác định điện năng tiêu thụ riêng trước khi đánh giá chế độ vận hành tối ưu.



Hình 3. *d)Ảnh hưởng nhiệt độ, lưu lượng và áp suất hydrogen của hệ điện phân PEM tại dòng điện 20 A*



Hình 3. *e)Ảnh hưởng nhiệt độ, lưu lượng và áp suất hydrogen của hệ điện phân PEM tại dòng điện 25 A*

3.4. So sánh công suất, sản lượng hydrogen và thời gian tạo khí hydrogen

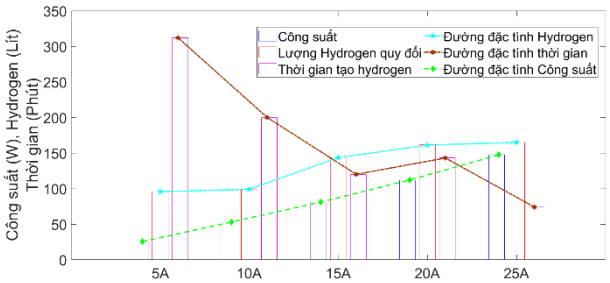
Hình 4 và Bảng 1 trình bày ảnh hưởng của dòng điện đến công suất tiêu thụ, áp suất lưu trữ hydrogen và thời gian vận hành của hệ điện phân PEM ba cell. Tại các mức dòng điện 5, 10, 15, 20 và 25 A, công suất tương ứng là 25,5; 53; 81; 112 và 147,5 W, trong khi thời gian khảo sát lần lượt là 312, 200, 120, 118 và 74 phút. Ở nhóm dòng điện thấp (5 A), áp suất lưu trữ chỉ đạt khoảng 0,58 MPa sau 312 phút, cho thấy khả năng tăng áp suất còn hạn chế. Khi tăng lên nhóm dòng trung bình (10–15 A), áp suất đạt khoảng 0,86–0,87 MPa sau 120–200 phút, tiến gần nhưng chưa đạt mục tiêu 1 MPa. Ngược lại, ở nhóm dòng cao (20–25 A), áp suất tiến gần 1 MPa sau khoảng 118 phút tại 20 A và 74 phút tại 25 A. Khi tăng dòng điện từ 20 A lên 25 A, thời gian tiến gần áp suất mục tiêu giảm khoảng 37,3%, trong khi công suất điện tăng 31,7%.

Theo định luật Faraday, việc tăng dòng điện làm tăng tốc độ hình thành hydrogen lý thuyết, góp phần thúc đẩy quá trình tích lũy khí và tăng áp suất trong bình chứa. Kết quả cho thấy nhóm dòng điện cao có ưu thế về thời gian tiến đến áp suất mục tiêu nhưng đòi hỏi công suất lớn hơn. Tuy nhiên, việc so sánh khả năng nạp khí giữa các chế độ cần xem xét sự khác biệt về áp suất ban đầu, nhiệt độ và điều kiện vận hành thực tế.

Bảng 1.

Công suất, lượng hydrogen tạo ra và thời gian vận hành tại các mức dòng điện

STT	Dòng điện (A)	Công suất (W)	ÁP suất (Mpa)	Hydrogen Quy đổi theo thời gian (L)	Thời gian tạo Hydrogen (phút)
1	5	25,5	≈ 0,58	95.7	312
2	10	53	≈ 0,86	99	200
3	15	81	≈ 0,87	143,6	120
4	20	112	≈ 1,00	161,7	118
5	25	147,5	≈ 1,00	165	74



Hình 4. *So sánh công suất, hydrogen tạo ra và thời gian điện phân*

4. Kết luận

Trên cơ sở thực nghiệm hệ điện phân nước PEM ba cell tại năm mức dòng điện 5, 10, 15, 20 và 25 A, nghiên cứu rút ra bốn kết luận chính:

- Thứ nhất, dòng điện vận hành ảnh hưởng rõ rệt đến công suất tiêu thụ và khả năng tăng áp suất lưu trữ hydrogen. Khi

dòng điện tăng từ 5 A lên 25 A, công suất điện tăng từ 25,5 W lên 147,5 W, tương đương 5,78 lần.

- **T**hứ hai, ở nhóm dòng điện thấp (5 A), áp suất lưu trữ chỉ đạt khoảng 0,58 MPa sau 312 phút. Nhóm dòng trung bình (10–15 A) đạt khoảng 0,86–0,87 MPa sau 120–200 phút, chưa đạt áp suất mục tiêu 1 MPa. Trong khi đó, nhóm dòng cao (20–25 A) tiến gần 1 MPa, cho thấy khả năng tăng áp suất tốt hơn trong phạm vi điều kiện khảo sát.

- Thứ ba, tại 20 A, áp suất tiến gần 1 MPa sau khoảng 118 phút, trong khi chế độ 25 A cần khoảng 74 phút. Thời gian tương ứng giảm 37,3%, đồng thời công suất tăng 31,7%. Theo định luật Faraday, dòng điện cao làm tăng tốc độ tạo hydrogen lý thuyết, góp phần thúc đẩy quá trình tích lũy khí và tăng áp suất bình chứa. Tuy nhiên, thời gian nạp còn phụ thuộc vào áp suất ban đầu, nhiệt độ và điều kiện vận hành thực tế.

- Thứ tư, kết quả cho thấy việc lựa chọn dòng điện cần cân nhắc giữa khả năng tăng áp suất, thời gian vận hành và nhu cầu công suất điện. Nhóm dòng cao có lợi thế về thời gian tiến đến áp suất mục tiêu nhưng đi kèm công suất tiêu thụ và mức tăng nhiệt lớn hơn. Nghiên cứu cung cấp cơ sở thực nghiệm cho việc lựa chọn chế độ vận hành phù hợp đối với hệ thống sản xuất và lưu trữ hydrogen PEM quy mô nhỏ.

Lời cám ơn

Nghiên cứu này được hỗ trợ và thực hiện tại Trường Đại học Lạc Hồng.

Xung đột lợi ích

Các tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích trong bài báo này.

Tuyên bố dữ liệu sẵn có

Dữ liệu hỗ trợ cho các khám phá của nghiên cứu này khi độc giả yêu cầu một cách hợp lý sẽ được tác giả liên hệ cung cấp.

5. Tài liệu tham khảo

[1] S. P. S. Badwal, S. Giddey, and F. T. Ciacchi, "Hydrogen and oxygen generation with polymer electrolyte membrane (PEM)-based electrolytic technology," Ionics, vol. 12, pp. 7–14, 2006, doi: 10.1007/s11581-006-0002-x.

[2] A. H. Abdol Rahim, A. S. Tijani, S. K. Kamarudin, and S. Hanapi, "An overview of polymer electrolyte membrane electrolyzer for hydrogen production: Modeling and mass transport," Journal of Power Sources, vol. 309, pp. 56–65, 2016, doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.01.012.

[3] H. Sayed-Ahmed, Á. I. Toldy, and A. Santasalo-Aarnio, "Dynamic operation of proton exchange membrane electrolyzers—Critical review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 189, Art. no. 113883, 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.113883.

[4] K. Mazloomi, N. B. Sulaiman, and H. Moayedi, "Electrical efficiency of electrolytic hydrogen production," International Journal of Electrochemical Science, vol. 7, no. 4, pp. 3314–3326, 2012, doi: 10.1016/S1452-3981(23)13957-5.

[5] S. Alkhaldi, M. Aziz, A. Amrite, and A. K. Prasad, "Parametric study of PEM water electrolyzer performance," Journal of Applied Electrochemistry, vol. 55, pp. 327–343, 2025, doi: 10.1007/s10800-024-02187-9.

[6] S. Ma, L. Li, R. Kohama, H. Nakajima, and K. Ito, "Effects of temperature and pressure on the limiting current density of PEM electrolysis cells based on a theoretical prediction model and experiments," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 71, pp. 1428–1441, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.05.345.

[7] M. Sartory, E. Wallnöfer-Ogris, P. Salman, T. Fellinger, M. Justl, A. Trattner, and M. Klell, "Theoretical and experimental analysis of an asymmetric high pressure PEM water electrolyser up to 155 bar," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 42, no. 52, pp. 30493–30508, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.10.112.

[8] Q. Zeng, X. Yang, Z. Liu, F. Ji, F. Yuan, and Y. Jin, "Experimental study on dynamic response characteristics of PEMWE based on fluctuating power supply," Acta Energiae Solaris Sinica, vol. 47, no. 5, pp. 579–587, 2026, doi: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2024-2389.

[9] G. Liu et al., "Experimental Study on Dynamic Performance of a 50 kW PEM Water Electrolysis System for Hydrogen Production," Energies, vol. 19, no. 16, Art. no. 3844, 2026, doi: 10.3390/en19163844.

[10] R. Alleori, M. A. Ancona, M. Bianchi, F. Falcetelli, F. Ferrari, F. Melino, P. Pilati, and M. Ricco, "Experimental analysis on a Power-to-Hydrogen system based on PEM electrolysis and metal hydrides: Empirical correlations for optimal system design and performance improvement," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 128, pp. 306–318, 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.04.201.

[11] S. Shiva Kumar and V. Himabindu, "Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review," Materials Science for Energy Technologies, vol. 2, no. 3, pp. 442–454, 2019, doi: 10.1016/j.mset.2019.03.002.

[12] Á. Hernández-Gómez, V. Ramirez, and D. Guilbert, "Investigation of PEM electrolyzer modeling: Electrical domain, efficiency, and specific energy consumption," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 45, no. 29, pp. 14625–14639, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.03.195.

[13] N. Sezer, S. Bayhan, U. Fesli, and A. Sanfilippo, "A comprehensive review of the state-of-the-art of proton exchange membrane water electrolysis," Materials Science for Energy Technologies, vol. 8, pp. 44–65, 2025, doi: 10.1016/j.mset.2024.07.006.