

NGHIÊN CỨU HIỆN TƯỢNG NGẬP ĐIỆN CỰC TRÊN XE ĐIỆN CHẠY PIN NHIÊN LIỆU HYDRO SỬ DỤNG MÔ HÌNH MẠNG LỖ RỒNG

INVESTIGATION OF FLOODING IN HYDROGEN FUEL CELL ELECTRODES USING A PORE NETWORK MODEL

Nguyễn Văn Lập*, Nguyễn Thị Kim Hiền
Khoa Cơ khí, Trường Đại học Thủy lợi

*Email: lap@tlu.edu.vn

TÓM TẮT

Pin nhiên liệu hydro màng điện phân (PEFCs) là một trong những công nghệ tiềm năng cho phương tiện giao thông do mật độ công suất cao và không phát thải khí nhà kính. Tuy nhiên, hiệu suất và độ ổn định làm việc của hệ thống phụ thuộc mạnh vào khả năng quản lý nước trong điện cực cathode. Nước lỏng tích tụ trong lớp khuếch tán khí (GDL) có thể che lấp đường khuếch tán O_2 , làm tăng trở kháng truyền khối và gây ngập điện cực. Nghiên cứu này sử dụng mô hình mạng lỗ rồng (Pore Network Model – PNM) hai pha để khảo sát sự xâm lấn của nước trong GDL có phân bố tính thấm ướt không đồng nhất. Ba cấu hình được xem xét gồm GDL đồng nhất ưa nước, GDL hybrid chia đôi ưa nước/kị nước và GDL đồng nhất kị nước. Kết quả cho thấy cấu trúc hybrid có thể định hướng nước tập trung về vùng ưa nước, trong khi vùng kị nước vẫn duy trì được các đường dẫn khí. Trong điều kiện khảo sát, dải độ xốp trung bình $\varepsilon = 0.5$ đến 0.6 cho thấy sự cân bằng tốt giữa thoát nước và cấp khí. Kết quả này cho thấy thiết kế phân bố tính thấm ướt theo không gian là một hướng tiềm năng để nâng cao khả năng chống ngập của GDL trong PEFC.

Từ khóa: PEFC; Lớp khuếch tán khí; Ngập điện cực; Mô hình mạng lỗ rồng; Hai pha.

ABSTRACT

Polymer electrolyte fuel cells (PEFCs) are promising clean-energy devices, but their performance is highly sensitive to water management in the cathode electrode. Excess liquid water in the gas diffusion layer (GDL) blocks O_2 transport pathways, increases mass-transfer resistance, and leads to flooding. In this study, a two-phase pore network model (PNM) is used to examine liquid-water invasion in a GDL with non-uniform in-plane wettability. Three configurations are considered: a uniformly hydrophilic GDL, a hybrid GDL with hydrophilic and hydrophobic halves, and a uniformly hydrophobic GDL. The results show that the hybrid structure guides water preferentially toward the hydrophilic region while preserving gas pathways in the hydrophobic region. Under the investigated conditions, a moderate porosity range of $\varepsilon = 0.5$ - 0.6 provides the best balance between water drainage and gas access. These findings suggest that spatially tailored wettability is a promising strategy for improving flooding tolerance in PEFC gas diffusion layers.

Keywords: Polymer electrolyte fuel cell; Gas diffusion layer; Flooding; Pore network model; Two-phase transport; Water management.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

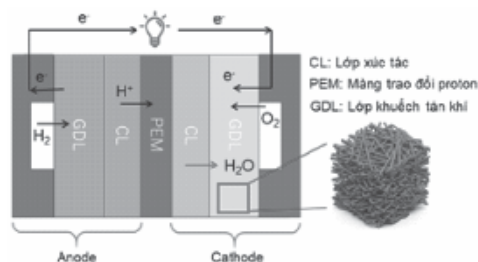
Trong bối cảnh biến đổi khí hậu ngày càng nghiêm trọng và nguồn cung năng lượng hóa thạch chịu nhiều biến động do tình hình chính trị quốc tế, nhu cầu phát triển các công nghệ năng lượng sạch đang trở nên cấp thiết. Trong số đó, pin nhiên liệu màng điện phân polymer (polymer electrolyte fuel cell – PEFC) được xem là một giải pháp tiềm năng cho các ứng dụng giao thông nhờ khả năng chuyển đổi trực tiếp năng lượng hóa học thành điện năng mà không phát thải khí nhà kính [1]. Hiện nay, một số mẫu xe chạy pin nhiên liệu hydro như Toyota Mirai và Hyundai Nexo đã được thương mại hóa, cho thấy tiềm năng ứng dụng thực tế của công nghệ này.

Về nguyên lý hoạt động, khí hydro được cấp vào phía anode, trong khi oxy hoặc không khí được cấp vào phía cathode; proton được dẫn qua màng điện phân, còn electron di chuyển qua mạch ngoài để tạo thành dòng điện. Cấu tạo cơ bản và cơ chế làm việc của PEFC được minh họa ở Hình 1. Trong cấu trúc PEFC, lớp khuếch tán khí (gas diffusion layer – GDL) là một thành phần có vai trò đặc biệt quan trọng, vì không chỉ phân phối khí phản ứng tới lớp xúc tác mà còn tham gia dẫn điện, dẫn nhiệt và tạo đường thoát cho nước sinh ra trong phản ứng điện hóa [2, 3]. Nếu màng điện phân và lớp xúc tác thiếu ẩm, điện trở proton tăng lên, làm suy giảm hiệu suất của pin. Ngược lại, khi nước lỏng tích tụ quá mức trong GDL hoặc tại giao diện giữa GDL và kênh khí, các lỗ rỗng dẫn khí có thể bị bít kín, làm cản trở quá trình khuếch tán oxy tới cathode, gia tăng phân cực truyền khối và gây ra hiện tượng ngập điện cực [1-3]. Đối với các phương tiện vận tải, vấn đề này càng trở nên đáng chú ý do hệ thống thường xuyên vận hành ở chế độ tải cao, chẳng hạn khi tăng tốc hoặc leo dốc, khiến lượng nước sinh ra tại cathode tăng nhanh và làm gia tăng nguy cơ ngập điện cực. Vì vậy, việc hiểu rõ cơ

chế xâm lấn, phân bố và thoát nước trong GDL có ý nghĩa nền tảng đối với việc tối ưu vật liệu và thiết kế cấu trúc điện cực cho các thế hệ pin nhiên liệu mới.

Một hướng thiết kế đang nhận được nhiều quan tâm là tạo phân bố tính ưa nước/kỵ nước có chủ đích trong GDL nhằm định hướng đường đi của nước lỏng, thay vì chỉ tăng hoặc giảm đồng đều độ kỵ nước trên toàn lớp vật liệu. Các nghiên cứu gần đây cho thấy phân bố tính thấm ướt theo vùng có thể tạo ra sự phân tách chức năng giữa vùng thoát nước và vùng cấp khí, từ đó cải thiện khả năng quản lý nước của pin [4-7]. Tuy nhiên, ảnh hưởng phối hợp giữa cấu hình hình học, mật độ dòng điện và độ xốp đối với cơ chế ngập trong hybrid-GDL vẫn cần được làm rõ hơn, đặc biệt ở góc nhìn cấp độ lỗ rỗng.

Theo dõi trực tiếp sự phân bố nước trong GDL bằng thực nghiệm là rất khó khăn do bề dày lớp vật liệu chỉ ở mức vài trăm micromet, cấu trúc sợi carbon phức tạp và quá trình hai pha diễn ra đồng thời ở nhiều thang kích thước. Do đó, mô phỏng số ở cấp độ lỗ rỗng đã trở thành công cụ quan trọng để nghiên cứu hiện tượng này. Trong số các phương pháp hiện nay, mô hình mạng lỗ rỗng (PNM) là cách tiếp cận hiệu quả vì vừa bảo toàn được bản chất mao dẫn của môi trường xốp, vừa có chi phí tính toán thấp hơn so với các mô hình hình học đầy đủ hoặc mô phỏng lưới Boltzmann kích thước lớn [8-12].



Hình 1. Cấu tạo và nguyên lý hoạt động của pin nhiên liệu hydro (PEFC).

Trong nghiên cứu này, chúng tôi xây dựng mô hình mạng lỗ rỗng 2D nhằm khảo sát hiện tượng ngập nước trong lớp khuếch tán khí của pin nhiên liệu màng điện phân polymer, hướng tới điều kiện làm việc ở tải cao thường xuất hiện trên xe điện chạy pin nhiên liệu hydro. Ba cấu hình cơ sở được so sánh gồm GDL đồng nhất ưa nước, GDL hybrid chia đôi ưa nước/kị nước và GDL đồng nhất kị nước. Tiếp theo, ảnh hưởng của mật độ dòng điện và độ xốp đến độ bão hòa nước và sự phân bố nước trong từng vùng của GDL được đánh giá một cách có hệ thống. Thông qua đó, nghiên cứu hướng tới việc làm rõ vai trò của phân bố tính thấm ướt theo không gian trong việc điều tiết đường đi của nước, đồng thời đề xuất dải thông số phù hợp để nâng cao khả năng chống ngập điện cực mà vẫn duy trì hiệu quả cấp oxy cho cathode.

2. MÔ HÌNH MẠNG LỖ RỖNG VÀ PHƯƠNG TRÌNH CHỦ ĐẠO

Trong PNM, không gian rỗng của GDL được thay thế bằng một tập hợp các lỗ rỗng nối với nhau bởi các cổ họng như thể hiện trong Hình 2. Mỗi lỗ rỗng và cổ họng được đặc trưng bởi kích thước hình học, thể tích và tính chất bề mặt. Nhờ cách rời rạc hóa này, PNM cho phép mô tả chuyển động của nước lỏng trong môi trường xốp với số bậc tự do nhỏ, nhưng vẫn phản ánh được vai trò của áp suất mao dẫn, tính thấm ướt và mạng liên thông của lỗ rỗng [8-12].



Hình 2. Minh họa chuyển đổi từ hình học thực sang mạng lỗ rỗng.

Đối với dòng hai pha khí-lỏng trong GDL, quá trình xâm lấn của nước được chi phối trước hết bởi điều kiện cân bằng mao dẫn tại mặt phân cách khí-lỏng. Áp suất mao dẫn được xác định theo phương trình Young-Laplace:

$$P_c = \frac{2\sigma \cos\theta}{r} \quad (1)$$

Trong đó, P_c là áp suất mao dẫn; σ là sức căng bề mặt; θ là góc tiếp xúc; và r là bán kính mao dẫn của cổ họng.

Lưu lượng nước qua cổ họng nối giữa hai lỗ rỗng i và j được diễn tả dưới dạng Hagen-Poiseuille hiệu dụng:

$$q_{w,ij} = \frac{\pi r_{ij}^4}{8\mu_{ij}^{eff}} \frac{(p_i - p_j - \Delta p_{c,ij})}{l_{ij}} \quad (2)$$

Với: r_{ij} và l_{ij} lần lượt là bán kính và chiều dài cổ họng nối lỗ rỗng i tới lỗ rỗng j ; $\Delta p_{c,ij}$ là độ chênh áp mao dẫn tại mặt thoáng lỏng-khí; μ_{ij}^{eff} là độ nhớt hiệu dụng vì trong lỗ rỗng và cổ họng tồn tại đồng thời cả khí và lỏng, đại lượng này phụ thuộc vào phần chiều dài (x) mà pha lỏng chiếm chỗ được xác định như sau:

$$\mu_{ij}^{eff} = x\mu_1 + (1-x)\mu_2 \quad (3)$$

Tại mỗi nút lỗ rỗng, tổng lưu lượng đi vào và đi ra phải thỏa mãn điều kiện bảo toàn khối lượng:

$$\sum_j q_{ij} = 0 \quad (4)$$

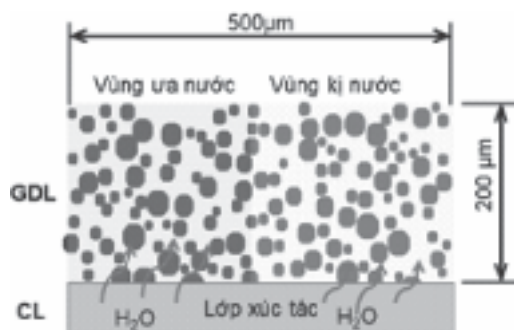
3. HÌNH HỌC VÀ ĐIỀU KIỆN BIÊN

3.1. Xây dựng hình học của GDL

Miền tính toán được xây dựng dưới dạng mặt cắt 2D của GDL với kích thước đặc trưng xấp xỉ $500 \times 200 \mu\text{m}$, phù hợp với cỡ

hình học điển hình của carbon paper. Pha rắn được biểu diễn bằng các đĩa không chồng lấn có bán kính ngẫu nhiên trong khoảng 5-14 μm nhằm mô tả phân bố kích thước của mạng sợi carbon. Độ xốp của miền được điều chỉnh bằng cách thay đổi số lượng phần tử rắn, nhờ đó có thể khảo sát ảnh hưởng của cấu trúc hình học tới sự xâm lấn của nước.

Điểm mới của nghiên cứu là GDL không được giả thiết có tính thấm ướt đồng nhất. Thay vào đó, miền được chia thành hai: vùng ưa nước và vùng kỵ nước (hybrid-GDL). Với cách xử lý bề mặt này, vùng ưa nước đóng vai trò “đường thoát nước ưu tiên”, trong khi vùng kỵ nước có xu hướng duy trì thông thoáng cho quá trình cấp oxy. Trong phạm vi bài báo, cặp góc tiếp xúc đại diện được dùng để so sánh là $\theta = 60^\circ$ cho vùng ưa nước và $\theta = 120^\circ$ cho vùng kỵ nước.



Hình 3. Miền tính toán 2D và điều kiện biên của hybrid-GDL

3.2. Điều kiện biên và đại lượng đánh giá

Trong mô hình hiện tại, lớp xúc tác (CL) không được mô phỏng tường minh; thay vào đó, nước được giả thiết sinh ra từ biên dưới tại giao diện CL/GDL. Lưu lượng nước được tạo ra ở CL được liên hệ với mật độ dòng điện, do đó mật độ dòng điện (i) được sử dụng như một tham số đại diện cho mức độ tải của pin như sau:

$$Q = \frac{iA}{2F} \frac{M_w}{\rho_w} \quad (5)$$

Trong đó: A là diện tích điện cực, F là hằng số Faraday ($96485 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$), M_w là khối lượng mol của nước ($18.01 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$) và ρ_w là khối lượng riêng của nước ($998 \text{ kg}/\text{m}^3$).

Để đánh giá tỉ lệ nước xâm nhập vào GDL, chúng tôi đánh giá thông qua độ bão hòa nước tổng cộng S của toàn miền GDL và độ bão hòa riêng tại vùng ưa nước và vùng kỵ nước. Về mặt vật lý, độ bão hòa được định nghĩa là tỷ số giữa thể tích nước lỏng và tổng thể tích lỗ rỗng:

$$S = \frac{V_w}{V_{GDL}} \quad (6)$$

Giá trị S càng lớn thì mức độ ngập càng nghiêm trọng. Tuy nhiên, đối với GDL hybrid, không chỉ độ lớn của S mà cả phân bố không gian của nước cũng quan trọng, vì mục tiêu của thiết kế là dồn nước vào vùng ưa nước và bảo toàn đường dẫn khí ở vùng kỵ nước.

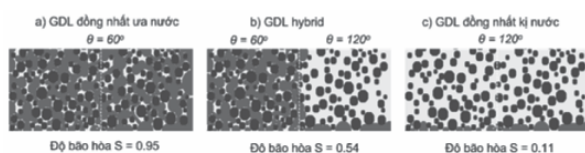
4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Đặc điểm phân bố nước trong GDL

Hình 4 so sánh ba trường hợp cơ sở: GDL đồng nhất ưa nước, GDL hybrid và GDL đồng nhất kỵ nước. Kết quả cho thấy cấu hình bề mặt chi phối rất mạnh hình thái xâm lấn của nước. Với GDL đồng nhất ưa nước ($\theta = 60^\circ$), nước dễ dàng xâm nhập vào hầu hết các cụm lỗ rỗng, làm độ bão hòa tăng tới $S = 0.95$. Điều này phản ánh áp suất vào mao dẫn nhỏ, nước nhanh chóng lan rộng trong toàn miền và gây mất gần như hoàn toàn các đường dẫn khí. Ở chiều ngược lại, GDL đồng nhất kỵ nước ($\theta = 120^\circ$) có độ bão hòa chỉ $S = 0.11$. Nước bị cản mạnh ở giai đoạn đầu xâm lấn và chủ yếu

bám gần biên CL. Cấu hình này giúp GDL nhìn chung thông thoáng, nhưng đồng nghĩa với việc nước khó được rút khỏi CL và sẽ làm ngập chính vùng này. Nói cách khác, độ bão hòa thấp của toàn GDL không đồng nghĩa với quản lý nước tốt nếu nước bị “kẹt” ở trong lớp xúc tác.

Cấu hình hybrid cho giá trị $S = 0.54$, nằm giữa hai trường hợp đồng nhất. Điểm quan trọng không nằm ở việc giảm tối đa độ bão hòa tổng, mà ở khả năng tái phân bố nước. Nước tập trung chủ yếu ở nửa trái ưa nước, trong khi nửa phải kỵ nước vẫn duy trì tỷ lệ lấp đầy thấp hơn rõ rệt. Cơ chế này tạo ra sự phân tách chức năng: vùng ưa nước đóng vai trò kênh dẫn thoát nước, còn vùng kỵ nước duy trì đường khuếch tán oxy. Đây chính là ưu thế cốt lõi của hybrid-GDL so với hai cấu hình đồng nhất.



Hình 4. So sánh phân bố nước trong ba cấu hình GDL: (a) đồng nhất ưa nước, (b) hybrid-GDL và (c) đồng nhất kỵ nước.

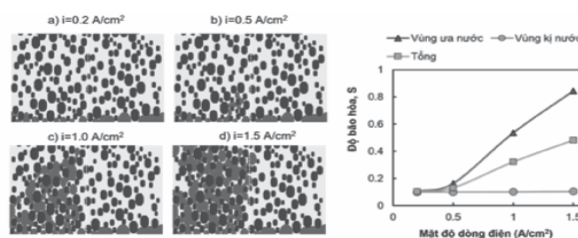
4.2. Ảnh hưởng của mật độ dòng điện

Trong phần này, chúng tôi sẽ đánh giá khả năng hoạt động của GDL hybrid ở các mật độ dòng điện từ 0.2 đến 1.5 A/cm². Qua kết quả từ Hình 5 ta thấy rằng, độ bão hòa tổng trong hybrid-GDL tăng dần khi mật độ dòng điện tăng cao. Xu hướng này phù hợp với cơ chế vật lý của PEFC: khi tải tăng, tốc độ tạo nước ở cathode tăng, làm lưu lượng nước đi vào GDL lớn hơn và xác suất hình thành các cụm nước liên thông tăng lên.

Ở vùng tải thấp (0.2-0.5 A/cm²), nước chủ yếu hiện diện gần biên dưới, nơi tiếp giáp với CL và tập trung về phía ưa nước. Độ bão

hòa bên phải kỵ nước gần như không thay đổi, duy trì xấp xỉ 0.10. Điều đó cho thấy rào cản mao dẫn của vùng kỵ nước vẫn đủ lớn để ngăn nước vượt qua biên phân chia, nhờ vậy các đường dẫn khí ở bên phải vẫn được bảo toàn. Khi mật độ dòng điện tăng lên 1.0 A/cm², vùng trái ưa nước bị lấp đầy nhanh và độ bão hòa bên trái tăng mạnh, đạt xấp xỉ 0.53. Trong khi đó, vùng phải vẫn gần như không đổi. Kết quả này đặc biệt quan trọng vì nó cho thấy hybrid-GDL vẫn giữ được cơ chế phân tách khí-nước trong phần lớn dải tải khảo sát; nghĩa là nước được hướng ưu tiên về vùng ưa nước thay vì lan tràn đồng đều trong toàn bộ lớp GDL.

Tại $i = 1.5$ A/cm², độ bão hòa vùng phải tăng nhẹ lên 0.11, và trên kết quả mô phỏng đã xuất hiện hiện tượng nước xâm lấn sang phần kỵ nước. Đây có thể xem là ngưỡng mà khả năng “chứa” của vùng ưa nước bắt đầu bão hòa và nước buộc phải tìm các đường xâm nhập mới sang vùng lân cận. Về ý nghĩa thiết kế, kết quả này hàm ý hybrid-GDL không loại bỏ hoàn toàn ngập điện cực ở tải cực cao, nhưng có khả năng trì hoãn đáng kể thời điểm nước tràn sang vùng cấp khí. Vì vậy, nếu mục tiêu là vận hành dài ở mật độ dòng rất lớn, cần đồng thời tối ưu góc tiếp xúc, tỷ lệ diện tích hai vùng và cấu trúc hình học của mạng lỗ rỗng.



Hình 5. Phân bố nước và độ bão hòa trong hybrid-GDL dưới các tải khác nhau

4.3. Ảnh hưởng của độ xốp của GDL

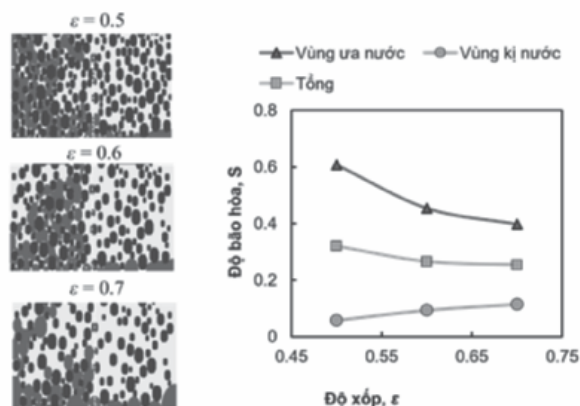
Kích thước lỗ rỗng của GDL bị chi phối trực tiếp bởi độ xốp (ϵ) của GDL. Độ xốp

càng cao thì độ rỗng càng lớn, cho phép oxy di chuyển dễ dàng hơn. Trong phần này, chúng tôi sẽ khảo sát ảnh hưởng của độ xốp tới khả năng điều hướng nước của GDL. Hình 6 so sánh phân bố nước trong GDL ở ba mức độ xốp $\varepsilon = 0.5, 0.6$ và 0.7 với cùng mật độ dòng $i = 1.0 \text{ A/cm}^2$. Khi độ xốp tăng từ $\varepsilon = 0.5$ lên 0.6 , độ bão hòa nước tổng cộng giảm từ khoảng 0.32 xuống còn xấp xỉ 0.26 , trong khi độ bão hòa ở vùng ưa nước giảm từ khoảng 0.60 xuống 0.45 . Xu hướng này cho thấy khi cấu trúc GDL trở nên xốp hơn, thể tích lỗ rỗng khả dụng tăng lên, làm cho cùng một lượng nước sinh ra được phân bố trên một không gian rỗng lớn hơn, do đó độ bão hòa trung bình của miền giảm xuống. Đồng thời, ở độ xốp thấp, các lỗ rỗng nhỏ và liên kết chặt làm cho lực mao dẫn chiếm ưu thế, khiến nước dễ bị giữ lại và tích tụ mạnh trong vùng ưa nước. Điều này thể hiện rõ qua các ảnh mô phỏng khi pha nước chiếm gần kín nửa trái của miền. Ngược lại, khi độ xốp tăng, mạng lỗ rỗng trở nên thông thoáng hơn, tạo điều kiện cho nước phân bố phân tán hơn và giảm mức độ ngập cục bộ.

Khi độ xốp tiếp tục tăng lên $\varepsilon = 0.7$, độ bão hòa tổng chỉ còn giảm nhẹ và gần như đạt trạng thái ít biến thiên, trong khi độ bão hòa vùng ưa nước tiếp tục giảm xuống khoảng 0.40 . Trái lại, độ bão hòa ở vùng kỵ nước lại tăng từ khoảng 0.05 lên gần 0.11 . Điều này cho thấy khi mạng lỗ rỗng quá mở, hiệu quả “gom nước” của vùng ưa nước bắt đầu suy giảm, vì nước không còn bị dẫn ưu tiên quá mạnh vào nửa trái mà có xu hướng lan sang cả vùng kỵ nước thông qua các đường liên thông ngang. Nói cách khác, tăng độ xốp giúp giảm mức độ ngập tổng thể, nhưng nếu độ xốp quá lớn thì khả năng tách chức năng giữa hai vùng ưa nước và kỵ nước lại kém đi. Đây là một kết quả quan trọng, vì mục tiêu của GDL dạng hybrid không chỉ là giảm độ bão hòa tổng, mà còn phải duy trì được sự phân bố bất đối xứng của nước: vùng ưa nước

đóng vai trò thoát nước, còn vùng kỵ nước cần giữ được độ thông thoáng cho quá trình khuếch tán oxy.

Từ các kết quả trên có thể thấy rằng độ xốp của GDL cần được lựa chọn theo hướng tối ưu thay vì chỉ tăng càng lớn càng tốt. Ở độ xốp thấp, nước bị giữ lại quá nhiều và gây ngập mạnh trong vùng ưa nước; ở độ xốp quá cao, nước lại có xu hướng lan sang vùng kỵ nước và làm suy giảm chức năng phân tách pha của cấu trúc hybrid. Vì vậy, một dải độ xốp trung bình là phù hợp hơn, do vừa hạn chế được mức độ ngập tổng thể, vừa duy trì được vai trò định hướng nước của vùng ưa nước và bảo toàn các đường dẫn khí ở vùng kỵ nước.



Hình 6. Ảnh hưởng của độ xốp đến độ bão hòa nước trong hybrid-GDL.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã sử dụng mô hình mạng lỗ rỗng 2D để khảo sát hiện tượng ngập nước trong lớp khuếch tán khí của pin nhiên liệu hydro với cấu trúc hybrid. Kết quả cho thấy cấu trúc này giúp định hướng nước ưu tiên về vùng ưa nước, trong khi vùng kỵ nước vẫn duy trì các đường dẫn khí, từ đó cải thiện khả năng quản lý nước so với cấu trúc đồng nhất. Khi mật độ dòng điện tăng, độ bão hòa nước tăng rõ rệt và ở điều kiện tải cao nước bắt đầu xâm lấn sang

vùng kỵ nước, cho thấy giới hạn của cấu trúc hybrid. Ngoài ra, độ xốp có ảnh hưởng đáng kể đến quá trình vận chuyển hai pha, trong đó dải độ xốp trung bình cho thấy hiệu quả cân bằng tốt hơn giữa thoát nước và cấp khí. Kết quả nghiên cứu cho thấy thiết kế GDL bất đối xứng là một hướng tiềm năng để nâng cao hiệu quả làm việc của pin nhiên liệu. ❖

Ngày nhận bài: **28/5/2026**

Ngày phản biện: **09/6/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Wang, Y., Chen, K.S., Mishler, J., Cho, S.C., Adroher, X.C., “A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research”. *Applied Energy*, 88(4), 981-1007, 2011. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.09.030.
- [2]. Cindrella, L., Kannan, A.M., Lin, J.F., Saminathan, K., Ho, Y., Lin, C.W., Wertz, J., “Gas diffusion layer for proton exchange membrane fuel cells – A review”. *Journal of Power Sources*, 194(1), 146–160, 2009. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2009.04.005.
- [3]. Guo, H., Chen, L., Ismail, S.A., Jiang, L., Guo, S., Gu, J., Zhang, X., Li, Y., Zhu, Y., Zhang, Z., Han, D., “Gas Diffusion Layer for Proton Exchange Membrane Fuel Cells: A Review”. *Materials*, 15(24), 8800, 2022. DOI: 10.3390/ma15248800.
- [4]. Dujc, J., Forner-Cuenca, A., Marmet, P., Cochet, M., Vetter, R., Schumacher, J.O., “Boillat, P. Modeling the effects of using gas diffusion layers with patterned wettability for advanced water management in proton exchange membrane fuel cells”. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 15(2), 021001, 2018. DOI: 10.1115/1.4038626.
- [5]. Niu, Z., Bao, Z., Wu, J., Wang, Y., Jiao, K., “Two-phase flow in the mixed-wettability gas diffusion layer of proton exchange membrane fuel cells”. *Applied Energy*, 232, 443–450, 2018. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.09.209.
- [6]. Utaka, Y., Koresawa, R., “Effect of wettability-distribution pattern of the gas diffusion layer with a microgrooved separator on polymer electrolyte fuel cell performance”. *Journal of Power Sources*, 363, 227–233, 2017. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.07.095.
- [7]. Lim, I.S., Lee, Y.H., Lee, Y.I., Kang, B., Park, J.Y., Kim, M.S., “In-plane design strategy of gas diffusion layer and optimization to improve performance and current distribution uniformity in polymer electrolyte membrane fuel cell”. *Renewable Energy*, 215, 2023. DOI: 10.1016/j.renene.2023.05.123.
- [8]. Gostick, J.T., Ioannidis, M.A., Fowler, M.W., Pritzker, M.D., “Pore network modeling of fibrous gas diffusion layers for polymer electrolyte membrane fuel cells”. *Journal of Power Sources*, 173(1), 277–290, 2007. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2007.04.059.
- [9]. Sinha, P.K., Wang, C.-Y., “Pore-network modeling of liquid water transport in gas diffusion layer of a polymer electrolyte fuel cell”. *Electrochimica Acta*, 52(28), 7936–7945, 2007. DOI: 10.1016/j.electacta.2007.06.061.
- [10]. Alink, R., Gerteisen, D., “Modeling the Liquid Water Transport in the Gas Diffusion Layer for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells Using a Water Path Network”. *Energies*, 6(9), 4508–4530, 2013. DOI: 10.3390/en6094508.
- [11]. Straubhaar, B., Pauchet, J., Prat, M., “Pore network modelling of condensation in gas diffusion layers of proton exchange membrane fuel cells”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 102, 891–901, 2016. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.078.
- [12]. Zhan, N., Wu, W., Wang, S., “Pore network modeling of liquid water and oxygen transport through the porosity-graded bilayer gas diffusion layer of polymer electrolyte membrane fuel cells”. *Electrochimica Acta*, 306, 264–276, 2019. DOI: 10.1016/j.electacta.2019.03.115.