

ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA NHIỆT ĐỘ VẬN HÀNH TỐI HIỆU QUẢ LÀM VIỆC CỦA PIN NHIÊN LIỆU TRANG BỊ TRÊN PHƯƠNG TIỆN GIAO THÔNG

EVALUATE THE EFFECTS OF OPERATING TEMPERATURES ON
PERFORMANCE OF FUEL CELL EQUIPPED ON VEHICLES

ĐỖ VĂN TRẦN

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông vận tải

Email liên hệ: dotran@utc.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo này tác giả trình bày kết quả nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ vận hành tới hiệu quả làm việc của pin nhiên liệu kiểu màng trao đổi. Trong nghiên cứu này mô hình 3-D tính toán pin được xây dựng và giải bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Điều kiện nhiệt độ vận hành được nghiên cứu điều tra ảnh hưởng đến tham số làm việc của pin. Kết quả chỉ ra rằng tại nhiệt độ cao có thể làm tăng thông lượng dòng điện và tăng được mật độ công suất của pin. Tuy nhiên, nếu nhiệt độ hoạt động của pin quá cao thì thông lượng mật độ dòng và mật độ công suất giảm. Khi tăng nhiệt độ vận hành thì độ dẫn điện của màng trao đổi và nồng độ các chất tham gia phản ứng điện hóa có xu hướng tăng dần, nhưng nếu nhiệt độ tăng quá cao cả hai tham số này lại có xu hướng giảm.

Từ khóa: PEMFCs, nhiệt độ vận hành pin nhiên liệu, mô hình 3-D pin nhiên liệu.

Abstract

This article presents the results of the research effect of operating temperatures on the performance of proton exchange membrane fuel cell. In this study, the 3-D fuel cell calculation model was created and solved using the extended finite element method. Effect operating temperatures on the parameters of the fuel cell were investigated. The results showed that the fuel cell operating at high temperature increases the current density flux on the plates and the power density. However, the operating temperature of the fuel cell is too high lead to the current density flux on the plates and the power density reduction. The fuel cell operates at a high temperature that the concentration of electrochemical reactants and protonic conductivity of the membrane increases. However, the operating temperature of the fuel

cell is too high lead to both these parameters reduction.

Keywords: PEMFCs, fuel cell operating temperatures, fuel cell model 3-D.

1. Mở đầu

Pin nhiên liệu kiểu màng trao đổi (PEMFCs) là công nghệ tiên tiến có thể thay thế cho các công nghệ chuyển đổi năng lượng truyền thống [1], do nhu cầu sử dụng năng lượng bền vững và sạch hơn trên thế giới ngày càng tăng [2], thêm vào đó hiệu suất chuyển đổi năng lượng cao hơn so với các loại pin nhiên liệu khác [3, 4]. Trong thời gian gần đây một số lượng lớn nghiên cứu đề cập đến việc thiết kế pin nhiên liệu kiểu màng trao đổi để giúp cải thiện hiệu suất, giảm chi phí và độ bền của chúng [5, 6]. Việc thiết kế và phát triển PEMFCs chủ yếu dựa trên điều tra số, vì thiết kế có thể giúp đưa pin vào thử nghiệm và ứng dụng nhanh hơn. Thêm vào đó, phương pháp điều tra số cho phép ta nghiên cứu nhiều cấu trúc phức tạp và các điều kiện hoạt động khác nhau của pin nhiên liệu. Với nhiều lợi thế vượt trội so với phương pháp thực nghiệm thì việc xây dựng mô hình lý thuyết và mô hình số là thực sự cần thiết [7].

Hiệu quả hoạt động của PEMFCs phụ thuộc nhiều yếu tố như cấu trúc hình học của pin (kích thước kênh dẫn, kiểu dáng và độ dày lớp chất khí khuếch tán, cấu trúc màng trao đổi,...), điều kiện vận hành (nhiệt độ, áp suất, độ ẩm chất phản ứng,...), vấn đề kiểm soát nước tạo ra và làm mát cho pin nhiên liệu,... Vì vậy, để khảo sát được sự ảnh hưởng của các yếu tố này chúng ta cần phải xây dựng một mô hình số để tính toán đánh giá ảnh hưởng của các tham số này đến sự vận hành của PEMFCs. Nhiệt độ vận hành là một trong nhiều yếu tố ảnh hưởng lớn đến hiệu quả hoạt động của PEMFCs, nên việc phải xác định được nhiệt độ vận hành tối ưu của pin nhiên liệu là rất cần thiết [8].

Trong nghiên cứu này tác giả xây dựng mô hình 3-D tính toán cho PEMFCs sử dụng phần mềm Ansys-CFD. Mô hình tính toán này cho phép đánh giá ảnh

hường của nhiệt độ đến khả năng vận hành của PEMFCs. Kết quả nghiên cứu là cơ sở để xác định khoảng nhiệt độ vận hành tối ưu cho PEMFCs.

2. Cơ sở lý thuyết tính toán pin nhiên liệu

2.1. Mô hình tính toán các phản ứng điện hóa trong pin nhiên liệu

Mô hình tính toán các phản ứng điện hóa là tính toán tốc độ của các phản ứng tại các cực Anode và Cathode. Động lực các phản ứng này là điện thế bề mặt, là sự khác biệt giữa điện thế của pha chất rắn và điện thế pha của chất điện phân hoặc màng. Mô hình điện hóa pin nhiên liệu được mô tả qua hai phương trình (1), (2) như sau [9-11]:

$$\nabla(\sigma_{sol} \cdot \nabla \phi_{sol}) + R_{sol} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla(\sigma_{mem} \cdot \nabla \phi_{mem}) + R_{mem} = 0 \quad (2)$$

Trong đó:

σ_{sol} , σ_{mem} : lần lượt là độ dẫn điện của pha rắn và màng [$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$].

ϕ_{sol} , ϕ_{mem} : lần lượt là điện thế điện tích tại pha rắn và màng [V].

R_{sol} , R_{mem} : lần lượt là dòng dịch chuyển thể tích của pha rắn và màng [A/m^3].

Mật độ dòng cục bộ bên trong lớp xúc tác được tính toán sử dụng công thức chung của Butler-Volmer dưới đây [9-11]:

$$R_{an} = J_{an}^{ref} \left(\frac{H_2}{H_{2,ref}} \right)^{\gamma_{an}} \left[\exp\left(\frac{\alpha_{an} F \eta_{an}}{RT} \right) - \exp\left(-\frac{\alpha_{cat} F \eta_{an}}{RT} \right) \right] \quad (3)$$

$$R_{cat} = J_{cat}^{ref} \left(\frac{O_2}{O_{2,ref}} \right)^{\gamma_{cat}} \left[-\exp\left(\frac{\alpha_{an} F \eta_{cat}}{RT} \right) + \exp\left(-\frac{\alpha_{cat} F \eta_{cat}}{RT} \right) \right] \quad (4)$$

Trong đó: $H_2/H_{2,ref}$ và $O_2/O_{2,ref}$ đại diện cho nồng độ loài tham chiếu trên cực dương và cực âm; J^{ref} là mật độ dòng trao đổi tham chiếu; α là hệ số dịch chuyển; γ là hệ số nồng độ; F là hằng số Faraday; η là vùng bề mặt quá thế, gây ra tổn thất cho kích hoạt.

Sự khác nhau giữa điện thế chất rắn và màng tại cực Anode được tính theo phương trình (5). Sự khác nhau điện thế pha rắn, màng và điện thế hở mạch V_{oc} được tính toán theo công thức (6) [9-11]:

$$\eta_{an} = \phi_{sol} - \phi_{mem} \quad (5)$$

$$\eta_{cat} = \phi_{sol} - \phi_{mem} - V_{oc} \quad (6)$$

Đối với màng được coi là vùng xốp, độ dẫn điện protonic được tính toán như sau [12]:

$$\sigma_{mem} = (0,514\lambda - 0,326) \cdot e^{1268 \cdot \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right)} \quad (7)$$

Trong đó:

λ : Lượng nước chứa trong màng trao đổi

Lượng nước chứa trong màng được tính toán theo công thức sau [12]:

$$\lambda = 0,043 + 17,8a - 39,85a^2 + 36a^3 \quad (a < 1) \quad (8)$$

$$\lambda = 14 + 1,4(a-1) \quad (a > 1) \quad (9)$$

$$a = \frac{P_{wv}}{P_{sat}} + 2s \quad (10)$$

Trong đó: s là phần trăm theo thể tích của nước ở dạng lỏng; a là nước hoạt động; P_{wv} là áp suất hóa hơi của nước; P_{sat} là áp suất bão hòa nước.

2.2. Định luật bảo toàn và các phương trình chủ đạo

Phương trình định luật bảo toàn khối lượng [13]:

$$\frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z} = S_m = 0 \quad (11)$$

Phương trình bảo toàn mô men [13]:

$$u \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z}) + S_x \quad (12)$$

$$u \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z}) + S_y \quad (13)$$

$$u \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial z}) + S_z \quad (14)$$

$$S_x = -\left(\frac{\mu \cdot u}{k_x} \right); S_y = -\left(\frac{\mu \cdot v}{k_y} \right); S_z = -\left(\frac{\mu \cdot w}{k_z} \right) \quad (15)$$

Trong đó: u, v, w lần lượt là vận tốc theo các phương x, y, z ; ρ là mật độ của khí; P là áp suất tĩnh; μ_{eff} là hệ số vận tốc; μ là vận tốc của khí; k_x, k_y, k_z lần lượt là độ thấm thấu của lớp xúc tác và lớp khí khuếch tán.

Phương trình nhiệt [13]:

$$u \frac{\partial(\rho \cdot c_p \cdot T)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho \cdot c_p \cdot T)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho \cdot c_p \cdot T)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial z}) + S_h \quad (16)$$

$$S_h = h_{react} - R_{an, cat} \cdot \eta_{an, cat} + I^2 R_{ohm} + h_L \quad (17)$$

Trong đó: S_h là tổng nguồn nhiệt; k_{eff} là điều kiện nguồn tương ứng với độ dẫn nhiệt hiệu dụng; h_{react} là sự thay đổi enthalpy do phản ứng điện hóa; $R_{an, cat}$ là dòng dịch chuyển; $\eta_{an, cat}$ là quá thế điện cực; R_{ohm} là điện trở thuần; h_L là thay đổi enthalpy do hóa hơi của nước.

Phương trình dịch chuyển các loài trong pin [13]:

$$u \frac{\partial \rho_i \gamma_i}{\partial x} + v \frac{\partial \rho_i \gamma_i}{\partial y} + w \frac{\partial \rho_i \gamma_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (\rho D_i \frac{\partial \gamma_i}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho D_i \frac{\partial \gamma_i}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho D_i \frac{\partial \gamma_i}{\partial z}) + S_i \quad (18)$$

Trong đó: D_i là độ khuếch tán của mỗi loài thứ i ; S_i là điều kiện nguồn cho mỗi loài được mô tả theo công thức dưới đây [13]:

$$S_{H_2} = -\frac{M_{W,H_2}}{2F} R_{an} < 0 \quad (19)$$

$$S_{O_2} = -\frac{M_{W,O_2}}{2F} R_{cat} < 0 \quad (20)$$

$$S_{H_2O} = -\frac{M_{W,H_2O}}{2F} R_{cat} > 0 \quad (21)$$

Sử dụng Định luật khuếch tán Fick dùng để phân tích tính toán lưu lượng khối lượng khuếch tán [13].

$$D_i = \varepsilon^{1.5} D_i^0 \left(\frac{p_0}{p}\right) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1.5} \quad (22)$$

Trong đó: D_i^0 là khối lượng khuếch tán của mỗi loài thứ i tại nhiệt độ và áp suất tham chiếu ($T_0 = 300K$, $P_0 = 101325Pa$).

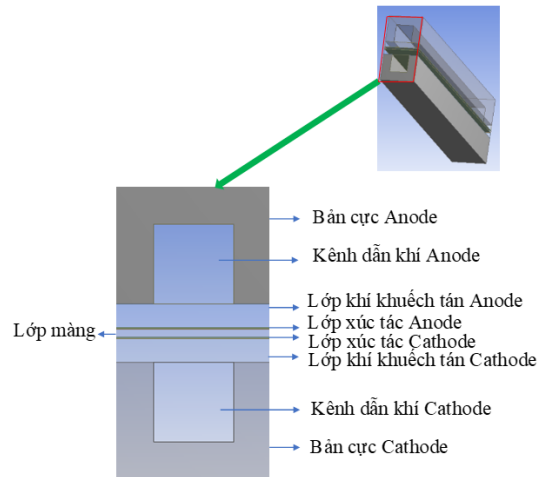
2.3. Thiết lập mô hình tính toán pin nhiên liệu

Mô hình tính toán pin nhiên liệu được xây dựng trên phần mềm Ansys, kết cấu mô hình tính pin được thể hiện ở Hình 1, các thông số về kích thước của pin được lựa chọn theo Bảng 1.

Bảng 1. Thông số cơ bản của pin nhiên liệu [14]

Tham số	Giá trị	Đơn vị
Chiều sâu kênh khí	50	mm
Chiều dài kênh khí	1	mm
Chiều rộng kênh khí	1	mm
Chiều dày lớp khuếch tán	0,3	mm
Chiều dày lớp xúc tác	0,0129	mm
Chiều dày lớp màng	0,108	mm
Độ xốp màng, ε_m	0,25	-
Điện áp mở mạch	0,96	V
Mật độ dòng tham chiếu Cathode	20	A/m ²
Mật độ dòng tham chiếu Anode	5000	A/m ²
Lưu lượng cấp khí H ₂	1,5.10 ⁻⁴	g.s ⁻¹
Lưu lượng cấp không khí	1.10 ⁻³	g.s ⁻¹
Độ ẩm của khí H ₂	20	%
Độ ẩm của không khí	15	%
Áp suất vận hành của pin	2	atm

Các chế độ tính toán trên mô hình: tính toán pin ở điều kiện nhiệt độ vận hành khác nhau để đánh giá ảnh hưởng của nó tới hiệu quả làm việc của pin. Tại mỗi chế độ nhiệt độ, pin được vận hành với nhiều mức điện áp khác nhau. Các thông số chính của pin được khảo sát gồm: dự đoán sự thay đổi đường cong phân cực, mật độ công suất của pin khi thay đổi áp suất vận hành. Đánh giá khả năng ngậm nước và độ dẫn điện của màng trao đổi. Phân tích quy luật phân bố mật độ dòng điện và sự phân bố trường nhiệt độ trong pin.



Hình 1. Mô hình tính toán PEMFCs trên phần mềm Ansys-CFD

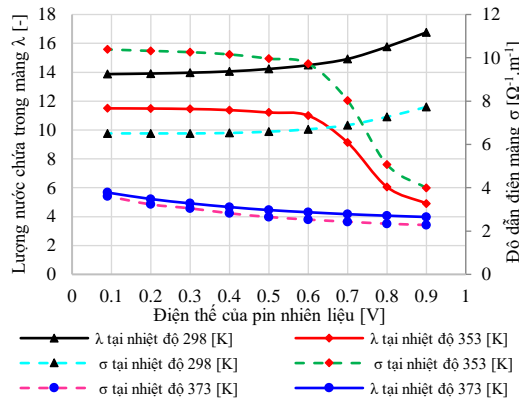
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Ảnh hưởng của nhiệt độ vận hành tới độ dẫn điện và lượng nước chứa trong màng

Độ dẫn điện (σ) và lượng nước chứa trong màng (λ) có mối quan hệ mật thiết với nhau. Khi màng chứa quá nhiều nước hoặc màng quá khô đều làm cho khả năng dẫn điện của màng kém, điều này làm tăng tổn thất điện áp của pin. Hình 2 chỉ ra rằng, tại nhiệt độ 298K thì λ lớn nhất và có xu hướng giảm dần khi tăng nhiệt độ, tại nhiệt độ 373K thì λ đạt giá trị nhỏ nhất. Quy luật này đúng cho toàn bộ dải điện áp hoạt động của pin.

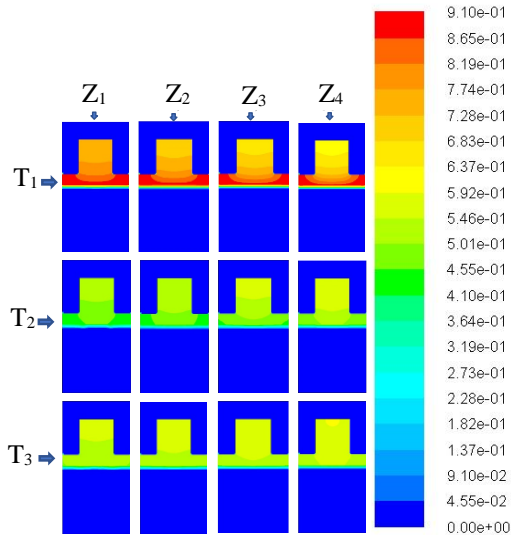
Trên toàn bộ dải điện áp vận hành của pin, độ dẫn điện của màng σ có xu hướng tăng khi tăng nhiệt độ và giảm dần khi nhiệt độ tăng quá giới hạn cho phép. Tại ba giá trị nhiệt độ tính toán là 298K, 353K và 373K thì σ đạt giá trị lớn nhất tại nhiệt độ 353K.

Khi pin vận hành ở dải điện áp trên 0,6V thì giá trị của λ và σ không ổn định và biến động mạnh. Ở dải điện áp dưới 0,6V thì giá trị λ và σ ít thay đổi và có xu hướng ổn định.

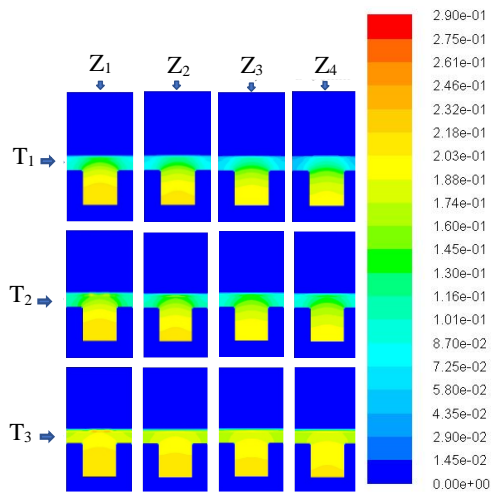


Hình 2. Ảnh hưởng của nhiệt độ tới độ dẫn điện và lượng nước chứa trong màng

3.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ vận hành tới tới nồng độ các chất phản ứng hóa học



Hình 3. Ảnh hưởng của nhiệt độ tới nồng độ H₂



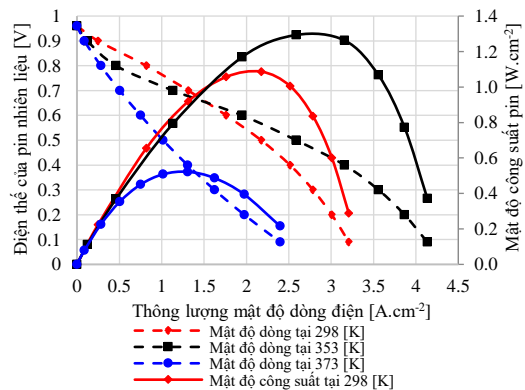
Hình 4. Ảnh hưởng của nhiệt độ tới nồng độ O₂

Kết quả trên Hình 3 và 4 được khảo sát tại 4 mặt cắt $Z_1=0\text{mm}$; $Z_2=16,7\text{mm}$; $Z_3=33,3\text{mm}$; $Z_4=50\text{mm}$. Tại 3 nhiệt độ $T_1=289\text{K}$; $T_2=353\text{K}$; $T_3=373\text{K}$.

Hình 3 và 4 thể hiện sự thay đổi nồng độ các chất phản ứng (H_2 , O_2) tại hai bản cực Anode và Cathode theo các nhiệt độ vận hành khác nhau. Kết quả tính toán chỉ ra rằng nhiệt độ vận hành của pin ảnh hưởng lớn đến nồng độ các chất tham gia phản ứng điện hóa. Cụ thể, tại nhiệt độ 353K thì H_2 và O_2 tham gia phản ứng nhiều nhất kết quả là nồng độ các chất này tại hai bản cực là nhỏ nhất so với trường hợp nhiệt độ vận hành là 298K và 373K.

Kết quả tính toán pin tại 3 giá trị nhiệt độ cũng chỉ ra rằng sự phân bố nồng độ các chất này không đều, tại vùng tiếp giáp với chất xúc tác nồng độ các chất này tập chung nhiều hơn. Như vậy, để tăng hiệu quả hoạt động của pin cần thiết phải thiết kế kênh dẫn khí sao cho chúng có khả năng tiếp xúc với lớp xúc tác nhiều nhất để các phản ứng điện hóa diễn ra mạnh nhất, điều này có thể làm tăng mật độ công suất của pin.

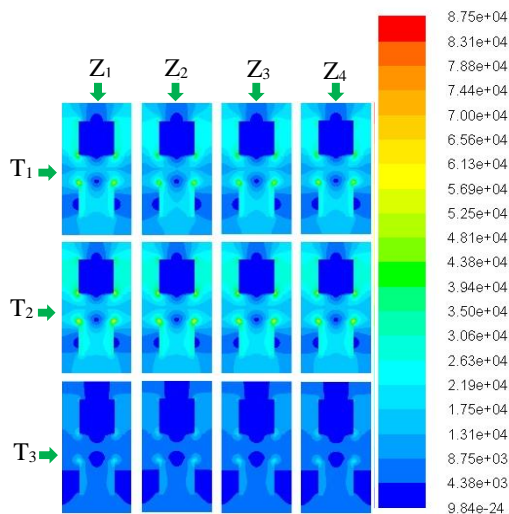
3.3. Ảnh hưởng của nhiệt độ vận hành tới thông lượng mật độ dòng điện, mật độ công suất của pin, sự phân bố mật độ dòng điện và phân bố trường nhiệt độ



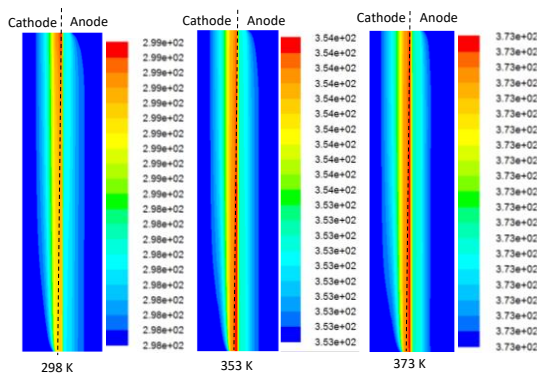
Hình 5. Ảnh hưởng của nhiệt độ đến thông lượng mật độ dòng điện và mật độ công suất của pin

Thông lượng mật độ dòng điện và mật độ công suất pin là hai thông số cơ bản, quyết định đến chỉ tiêu kỹ thuật của pin nhiên liệu cũng như kích thước cơ bản của pin. Hình 5 chỉ ra rằng khi nhiệt độ tăng thì thông lượng mật độ dòng điện và mật độ công suất có xu hướng tăng, tuy nhiên nếu nhiệt độ tăng quá mức thì cả hai giá trị này đều giảm. Tại 3 giá trị nhiệt độ tính toán là 298K, 353K và 373K thì thông lượng mật

độ dòng và mật độ công suất đạt giá trị lớn nhất tại nhiệt độ 353K. Nguyên nhân chính là tại hai giá trị nhiệt độ 298K và 373K có nồng độ các chất tham gia phản ứng điện hóa giảm và độ dẫn điện của màng giảm (điều này ngăn cản khả năng trao đổi proton qua màng), kết quả là thông lượng mật độ dòng điện và mật độ công suất pin giảm. Pin có thể phát huy mật độ công suất cao nhất tại điện áp vận hành khoảng 0,5V, ở các mức điện áp lớn hơn hoặc nhỏ hơn 0,5V mật độ công suất có xu hướng giảm và điều này đúng cho cả ba giá trị nhiệt độ vận hành của pin.



Hình 6. Ảnh hưởng của nhiệt độ vận hành tới sự phân bố mật độ dòng điện trên các bản cực



Hình 7. Ảnh hưởng của nhiệt độ đến sự phân bố trường nhiệt độ trong pin

Hình 7 thể hiện kết quả tính toán sự phân bố trường nhiệt độ của pin theo nhiệt độ khác nhau. Kết quả chỉ ra rằng trường nhiệt độ cao tập chung chủ yếu ở phần giữa của pin và tại màng trao đổi. Phía bản cực Cathode có nhiệt độ cao hơn phía bản cực Anode. Kết quả này có thể được lý giải là tại phần giữa của pin xảy ra các phản ứng điện hóa và các phản ứng này sinh

ra nhiệt. Các phản ứng điện hóa tại bản cực Cathode sinh ra nhiều nhiệt hơn so với phản ứng tại bản cực Anode.

4. Kết luận

Kết quả tính toán pin nhiên liệu theo các chế độ nhiệt độ vận hành khác nhau đưa ra một số kết luận như sau: cùng một kích thước của pin thì mật độ công suất có thể được nâng cao khi tăng nhiệt độ vận hành của chúng. Tuy nhiên, nhiệt độ tăng quá cao thì hiệu quả làm việc của pin giảm mạnh do tổn thất điện áp tăng.

Khi tăng nhiệt độ thì các phản ứng điện hóa xảy ra mạnh mẽ hơn, dẫn đến làm tăng được thông lượng mật độ dòng điện và mật độ công suất của pin. Tuy nhiên, nhiệt độ vận hành của pin không nên quá lớn vì khi đó các phản ứng hóa học trên bản cực diễn ra chậm hơn.

Khi tăng nhiệt độ làm cho lượng nước chứa trong màng giảm dần, do nhiệt độ của màng tăng lên dẫn đến màng bị khô. Tăng nhiệt độ thì độ dẫn điện của màng có xu hướng tăng, tuy nhiên nếu tăng quá cao độ dẫn điện của màng giảm do màng bị khô.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số **T2021-CK-008**. Tác giả xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Giao thông vận tải đã tài trợ kinh phí nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] A. Arvay, E. Yli-Rantala, C.H. Liu, X.H. Peng, P. Koski, L. Cindrella, et al, *Characterization techniques for gas diffusion layers for proton exchange membrane fuel cells - A review*, Journal of Power Sources, Vol.213, pp.317-337, 2012.

[2] L. Cindrella, A.M. Kannan, J.F. Lin, K. Saminathan, Y. Ho, C.W. Lin, et al, *Gas diffusion layer for proton exchange membrane fuel cells - A review*, Journal of Power Sources, Vol.194, pp.146-160, 2009.

[3] D.M. Fadzillah, M.I. Rosli, M.Z.M. Talib, S.K. Kamarudin, W.R.W. Daud, *Review on microstructure modelling of a gas diffusion layer for proton exchange membrane fuel cells*, Renewable Sustainable Energy Rev, Vol.77, pp.1001-1009, 2017.

[4] A.P. Manso, F.F. Marzo, J. Barranco, X. Garikano, M. Garmendia Mujika, *Influence of geometric parameters of the flow fields on the performance of a PEM fuel cell. A review*, Int. J. Hydrogen Energy, Vol.37, pp.15256-15287, 2012.

[5] C. Siegel, *Review of computational heat and mass transfer modeling in polymer-electrolyte-membrane (PEM) fuel cells*, Energy, Vol.33, pp.1331-1352, 2008.

- [6] J. Mahmoudimehr, A. Daryadel, *Influences of feeding conditions and objective function on the optimal design of gas flow channel of a PEM fuel cell*, Int. J. Hydrogen Energy, Vol.42, pp.23141-23159, 2017.
- [7] A. Biyikoglu, *RETRACTED: Review of proton exchange membrane fuel cell models*, Int. J. Hydrogen Energy, Vol.30, pp.1181-1212, 2005.
- [8] F. Barbir, *PEM fuel cells: Theory and Practice, Second edition*, Academic Press, 2012.
- [9] A. Kulikovskiy, J. Divisek, A. Kornyshev, *Modeling the Cathode Compartment of Polymer Electrolyte Fuel Cells: Dead and Active Reaction Zones*, Electrochemical Society, Vol.146, pp.3981-3991, 1999.
- [10] S. Mazumder, J. V. Cole, *Rigorous 3-D Mathematical Modeling of PEM Fuel Cells II. Model Predictions with Liquid Water Transport*, Electrochemical Society, Vol.150, pp.1510-1517, 2003.
- [11] Sukkee Um, C. Y. Wang, K. S. Chen, *Computational Fluid Dynamics Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells*, Electrochemical Society, Vol.147, pp.4485-4493, 2000.
- [12] T.E. Springer, T.A. Zawodzinski, and S. Gottesfeld, *Polymer Electrolyte Fuel Cell Model*, Journal, Electrochemical Society, Vol.138, pp.2334-2342, 1991.
- [13] Abdallah Mohammedia, Youcef Sahlib, and Hocine Ben Moussaa, *Optimization study of the produced electric power by planar PEMFC-SCG*, Renewable Energy Focus, Vol.35, pp.72-83, 2020.
- [14] Lin Wang, Attila Husar, Tianhong Zhou, Hongtan Liu, *A parametric study of PEM fuel cell performances*, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.28, pp.1263-1272, 2003.

Ngày nhận bài:	29/6/2021
Ngày nhận bản sửa:	07/8/2021
Ngày duyệt đăng:	18/8/2021