مجله مهندسی مکانیک مدرس، خرداد 1395، دوره 16، شماره 3، ص‌ص 105-111

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی آزمایشگاهی جریان الکترو-اسمز در اثر جریان و رطوبت گازهای ورودی به پیل سوختی تک‌سلولی غشاء پلیمری

محمد قلیزاده[1]، محسن قاضی خانی[2*]، ایمان خزایی[3]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی، مشهد
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
*مشهد، صندوق پستی 91779-48944، ghazikhani@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 12 بهمن 1394
پذیرش: 18 بهمن 1394
ارائه در سایت: 08 اسفند 1394

کلید واژگان:
پیل سوختی
رطوبت نسبی
تعادل آب
جریان الکترو-اسمز
درگ خالص

چکیده

در پژوهش حاضر، رطوبت نسبی گازها در یک پیل سوختی با غشاء مبادله کننده پروتون تغییر داده شد و اثر آن بر جریان الکترو-اسمز بررسی گردید. با تغییر رطوبت در دو طرف پیل سوختی و استفاده از معادلات تعادل آب، مقادیر جریان الکترو-اسمز، ضریب الکترو-اسمز و درگ خالص در رطوبت‌های مختلف به دست آمد. نتایج نشان داد که تغییرات الکترو-اسمز بر حسب رطوبت آند و کاتد تا یک رطوبت خاص به صورت خطی تغییر می‌کرد و بعد از آن تغییر زیادی مشاهده نگردید. همچنین نتایج نشان داد که تغییر رطوبت آند اثر مطلوب‌تری نسبت به تغییر رطوبت کاتد داشت. برای مثال، در رطوبت 70 درصد آند و 35 درصد کاتد با جریان 5 آمپر مقدار جریان الکترو-اسمز برابر با 2.66639×10^{-6} مول بر سانتی‌متر مربع بر ثانیه به دست آمد، درحالی‌که در رطوبت 70 درصد کاتد و 35 درصد آند با همان جریان برابر با 2.56418×10^{-6} مول بر سانتی‌متر مربع بر ثانیه ثبت شد. نتایج نشان داد که تغییرات ضریب الکترو-اسمز بر حسب رطوبت نیز به صورت خطی تغییر می‌کرد. همچنین معلوم شد که تغییر جریان پیل سوختی اثر چندانی بر نمودارهای ضریب الکترو-اسمز ندارد. محدوده تغییرات ضریب الکترو-اسمز بین 0.636001 تا 1.632476 به دست آمد که با اعداد موجود در مقالاتی که در این زمینه ارائه شده است، مطابقت خوبی داشت. همچنین، تغییرات درگ خالص برحسب رطوبت بررسی شد و مشخص گردید که درگ خالص برحسب رطوبت کاتد به صورت خطی با شیب مثبت تغییر می‌کرد اما تغییرات برحسب رطوبت کاتد به صورت خطی با شیب منفی بود.

Experimental investigation of electro-osmotic flow in effect of current and humidity of inlet gases into the single PEM fuel cell

Mohammad Gholizadeh[1], Mohsen Ghazikhani[1*], Iman Khazaee[2]

1- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Shahid-Beheshti University, Tehran, Iran
*P.O.B. 9177948944, Mashhad, Iran, ghazikhani@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 01 February 2016
Accepted 01 February 2016
Available Online 27 February 2016

Keywords:
Fuel cell
Relative humidity
Water balance
Electro-osmotic flow
Net drag

ABSTRACT

In this study, the relative humidity of the gases in the PEM fuel cell was changed and its effect on electro-osmotic flow was investigated. By changing the humidity on both sides of the fuel cell and using the water balance equations, the values of the electro-osmotic flow, electro-osmotic coefficient and net drag in different humidity levels were found. Results showed that variations of the electro-osmotic flow changed linearly by anode and cathode humidity to the special humidity and after that little variation was observed. In addition, the results revealed that humidity change at anode had a more desirable effect than the cathode. For example, at 70% anode humidity and 35% cathode humidity with the current of 5A, the value of electro-osmotic flow was obtained as 2.66639E-06 mol/cm^2.s, while in the former 35% and the latter 70% with the same current, this value was recorded as 2.56418E-06 mol/cm^2.s. In addition, results showed that the variations of the electro-osmotic coefficient changed linearly by humidity. It was determined the current change of fuel cell does not have a good effect on the curves of electro-osmotic coefficient. The electro-osmotic coefficients varied between 0.636001 and 1.632476, which were in good agreement with the values obtained in other related papers. In addition, the variations of the net drag with respect to humidity were investigated, too. It was determined that the net drag changed linearly by the cathode humidity with positive slope, but its variations by the anode humidity were linear with negative slope.

1- مقدمه

مرطوب بودن غشاء در پیل سوختی یکی از مسائل مهم است که در پیل سوختی غشاء پلیمری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مرطوب بودن غشاء باعث افزایش قابلیت هدایت پروتون از آند به کاتد می‌شود و کم بودن آب در غشاء پیل سوختی، هدایت پروتون را با مشکل مواجه می‌کند. در پیل سوختی غشا پلیمری، پروتون ضمن حرکت از آند به کاتد ملکول‌های آب را نیز با خود

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M. Gholizadeh, M. Ghazikhani, I. Khazaee, Experimental investigation of electro-osmotic flow in effect of current and humidity of inlet gases into the single PEM fuel cell, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 105-111, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.24.1]

حرکت می‌دهد، در اثر این کار از میزان آب آند کاسته شده و حالت خشکی را در سمت آند ایجاد می‌کند. از آنجاییکه در انتقال پروتون از سمت آند به سمت کاتد رطوبت غشا نقش تعیین کننده‌ای ایفا می‌کند، لذا با خشک شدن غشا راندمان پیل سوختی به شدت کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، آبی که از سمت آند به سمت کاتد می‌آید با آبی که در سمت کاتد در اثر واکنش شیمیایی تولید می‌شود با هم جمع شده و یک حالت شناوری را در سمت کاتد ایجاد می‌کنند. مقدار زیاد آب در سمت کاتد باعث بسته شدن منافذ مربوط به لایه نفوذ گاز آند شده و در اثر آن عملکرد پیل سوختی با مشکل روبرو شده و باعث افت کارایی پیل سوختی می‌شود. لازم به ذکر است که افزایش مقدار آب در سمت کاتد پیل سوختی سبب افزایش غلظت آب نسبت به سمت آند شده و در اثر این اختلاف غلظت مقداری از آب به سمت آند برمی‌گردد. این فرایند که به فرایند نفوذ معکوس معروف است می‌تواند کارایی پیل سوختی را افزایش دهد.

با توجه به نکات گفته شده در پاراگراف قبل، برای بهبود کارایی پیل سوختی لازم است که حالت تعادلی در میزان آب موجود در غشا پیل سوختی ایجاد گردد. مرطوب کردن گازهای ورودی به پیل سوختی و کنترل رطوبت آن‌ها یکی از راهکارهای مناسب جهت ایجاد تعادل آب در غشا پیل سوختی می‌باشد. از آنجاییکه بررسی تعادل آب در قسمت‌های مختلف پیل سوختی مساله بسیار مهم و اساسی است، تحقیقات، آزمایشات و مدلسازی-های مختلفی هم راجع به آن انجام شده است. البته مشخص است که پژوهش‌ها و آزمایش‌های انجام گرفته در این زمینه کافی نبوده و مطمئنا تحقیق‌ها و بررسی‌های بیشتری در این زمینه مورد نیاز می‌باشد.

کریمی و لی در سال 2005، جریان الکترو-اسمز در غشاهای پلیمری را به همراه اثر الکتروسنیتیک مدل کردند و پارامترهای کلیدی موثر بر عملکرد پیل سوختی غشاء پلیمری را تعیین نمودند [1]. یان و همکارانش تعادل آب در پیل سوختی غشاء پلیمری را با استفاده از اندازه‌گیری ضرایب درگ خالص تحت شرایط مختلف بررسی کردند. همچنین، اثرات تعادل آب در غشاء روی عملکرد پیل سوختی را نیز در شرایط مختلف کاری بررسی نمودند [2]. یان و همکارانش در سال 2006، به صورت نظری پدیده انتقال آب را در پیل‌های سوختی غشاء پلیمری در حالت گذرا در لایه نفوذ گاز ،لایه کاتالیست و غشاء مبادله کننده پروتون بررسی نمودند. در غشاء، هر دو فرایند الکترو-اسمز و نفوذ در نظر گرفته شد، در صورتیکه در لایه کاتالیست و لایه نفوذ گاز تنها فرایند نفوذ لحاظ گردید [3]. کای و همکارانش مقاومت غشاء پیل سوختی غشاء پلیمری را اندازه گرفته و آزمایش تعادل آب را انجام دادند. آن‌ها برای اینکار قابلیت انجام کار یک پیل سوختی با هیدروژن خشک را مورد بررسی قرار دادند [4]. هوسار و همکارانش در سال 2008، پدیده انتقال آب از طریق غشاء پیل سوختی را با توجه به مکانیزم‌های جداگانه موجود در یک پیل سوختی غشاء پلیمری به‌صورت درجا اندازه گرفتند [5]. پارک و کاتن با استفاده از آزمایش تعادل آب ضرایب الکترو-اسمز در غشاء نفیونی 115 را تحت شرایط مختلف کاری به‌صورت تابعی از درصد رطوبت و شرایط ترمودینامیکی به دست آوردند [6]. داس و همکارانش در سال 2010، برای بررسی انتقال آب در لایه کاتالیست کاتد یک پیل سوختی غشاء پلیمری، حل تحلیلی انتقال آب را به صورت یک بعدی در عرض لایه کاتالیست کاتد با استفاده از معادلات انتقال بنیادی انجام دادند [7]. میسران و همکارانش در سال 2013، اثر مقدار آب را در غشاء پیل سوختی غشاء پلیمری، در حالت غشاء خشک و غشاء با رطوبت 100% در دماهای مختلف برحسب ضریب الکترو-اسمز، ضریب نفوذ معکوس و غیره به‌طور آزمایشگاهی بررسی کردند [8].

در این کار، رطوبت گازهای ورودی به پیل سوختی تغییر داده شد و تاثیر آن بر روی جریان الکترو-اسمز و ضریب الکترو-اسمز و همچنین درگ خالص به‌دست آمد. همچنین روابط مربوط به موازنه جرم آب مورد تحلیل و بررسی واقع شد. در بستر آزمایش پژوهش حاضر، تغییر رطوبت غشاء به وسیله تغییر رطوبت در گازهای ورودی بخش آند و کاتد انجام شد و رطوبت-های هر دو طرف بین حالت خشک و حالت 100% تغییر داده شدند. با تغییر رطوبت و ثبت داده‌های آزمایشگاهی در قسمت‌های مختلف پیل سوختی و همچنین با استفاده از روابط تجربی و ترمودینامیکی موجود، مقادیر مربوط به ضرایب الکترو-اسمز و جریان الکترو-اسمز و درگ خالص در حالت‌های مختلف محاسبه شده و مورد تجزیه و تحلیل واقع شدند.

2- بستر آزمون

سطح فعال پیل سوختی تک سلولی غشاء پلیمری 25 سانتی‌متر مربع می-باشد. جنس غشای پلیمری از نفیون 117 و جنس لایه نفوذ گاز از پوشش کربنی با ضخامت 0.33 میلی‌متر است. همچنین جنس لایه کاتالیست از پلاتینیوم با مقدار 4 میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع و ضخامتی در حدود 0.01 میلی‌متر است. ضخامت صفحات دوقطبی نیز برابر 5 میلی‌متراست. شکل کانال‌ها در این پیل سوختی به‌صورت مارپیچ چهارتایی بوده و سطح مقطع آن بیضوی می‌باشد. همچنین طول هر کانال برابر 4.8 سانتی‌متر و فاصله بین هر کانال برابر 1 میلی‌متر می‌باشد. در بستر آزمایش پروژه حاضر، برای دستیابی به داده‌های موردنظر علاوه بر پیل سوختی منفرد تجهیزاتی مانند دبی‌سنج مدل VFA-SSV برای گاز هیدروژن و دبی سنج مدل LZB-4WB برای گاز اکسیژن، مانومتر مدل یونیما، رطوبت‌زن، ترمومتر مدل PT100، رطوبت‌سنج مدل SU-503B ، وات متر مدل Fuel Cell Testing - ELB 350 ، ترازوی دیجیتال مدل EK-600H، کنداسور و کپسول گاز نیز نیاز بود که تمامی آنها در یک میز کار مورد استفاده قرار گرفتند. در شکل 1 شماتیکی از بستر تست قابل مشاهده است.

در این‌جا به جای استفاده از هوا در سمت کاتد از اکسیژن خالص استفاده گردید. فشار هیدروژن و اکسیژن در تمامی آزمایشات در سر کپسول ها برابر با فشار پیمانه‌ای 2 بار در نظر گرفته شد و دمای پیل سوختی نیز در تمام آزمایشات برابر با 55 درجه سلسیوس لحاظ گردید. همچنین، رطوبت نسبی گازهای ورودی در هر دو طرف آند و کاتد با استفاده از روش حبابی از صفر تا 100 درصد تغییر داده شد و مقدار دبی گازهای ورودی به پیل سوختی نیز اندازه‌گیری شد. در خروجی‌های آند و کاتد پیل سوختی نیز به ترتیب از یک کندانسور، دماسنج، دبی‌سنج و رطوبت‌سنج استفاده گردید که مقدار داده‌های لازم را ثبت می‌کردند. در تمامی محاسبات ریاضی مربوط به بحث الکترو-اسمز که در بخش 3 به آن پرداخته می‌شود، گازهای هیدروژن و اکسیژن به صورت گاز ایده‌ال فرض گردید. از آنجاییکه در تعادل آب یک پیل سوختی غشاء پلیمری سه بحث الکترو-اسمز، نفوذ معکوس و جابجایی نقش آفرینی می‌کنند و با توجه به اینکه در اینجا بیشتر بحث روی جریان الکترو-اسمز می‌باشد، لذا با یکسان گرفتن فشار در دو طرف آند و کاتد به نوعی از اثر جابجایی نیز صرف‌نظر گردید. در شکل 2 بستر آزمایش پژوهش حاضر با جزئیات آن قابل مشاهده است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.24.1]

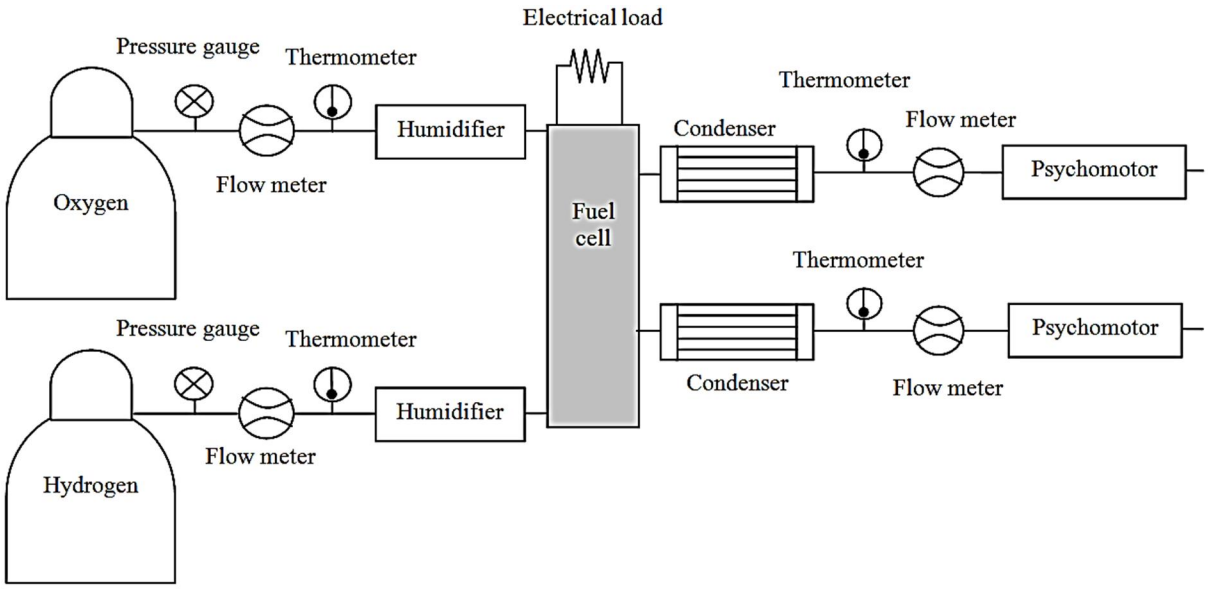

Fig. 1 schematic of test set-up

شکل 1 شماتیکی از بستر آزمایش

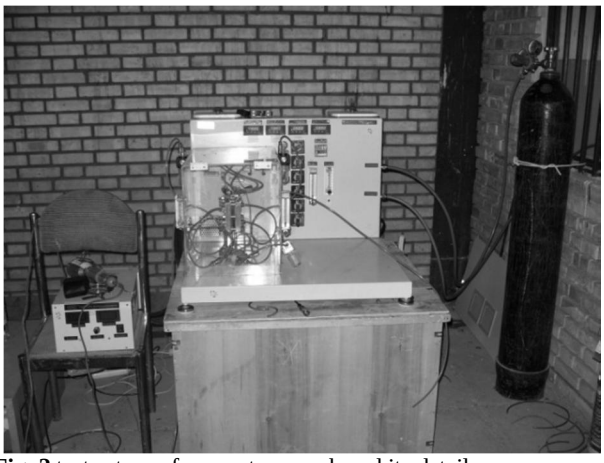

Fig. 2 test set-up of present research and its details

شکل 2 بستر آزمایش پژوهش حاضر و جزئیات آن

3- محاسبات تئوری تعادل آب در غشاء

برای بررسی تعادل آب در یک پیل سوختی غشاء پلیمری، نیاز به استفاده از برخی معادلات ریاضی بود که در این‌جا به آن‌ها اشاره می‌شود. معادله تعادلی آب برحسب نرخ مولی در یک پیل سوختی غشاء پلیمری، در قسمت کاتد و آند به صورت رابطه (1) و (2) نوشته می‌شود:

$$\text{Anode}: \quad \dot{N}_{\mathrm{v,a}}^{\mathrm{out}} + \dot{N}_{\mathrm{Condense,a}} = \dot{N}_{\mathrm{v,a}}^{\mathrm{in}} - \dot{N}_{\mathrm{v}}^{\mathrm{EOF}} + \dot{N}_{\mathrm{v}}^{\mathrm{B.D}} \tag{1}$$

$$\text{Cathode}: \dot{N}_{\mathrm{v,c}}^{\mathrm{out}} + \dot{N}_{\mathrm{Condense,c}} = \dot{N}_{\mathrm{v,c}}^{\mathrm{in}} + \dot{N}_{\mathrm{v}}^{\mathrm{P}} + \dot{N}_{\mathrm{v}}^{\mathrm{EOF}} - \dot{N}_{\mathrm{v}}^{\mathrm{B.D}} \tag{2}$$

در روابط فوق $\dot{N}_{\mathrm{v,a}}^{\mathrm{in}}$ و $\dot{N}_{\mathrm{v,c}}^{\mathrm{in}}$ به ترتیب نرخ مولی بخار آب ورودی در سمت آند و کاتد هستند و $\dot{N}_{\mathrm{v,a}}^{\mathrm{out}}$ و $\dot{N}_{\mathrm{v,c}}^{\mathrm{out}}$ به ترتیب نرخ مولی بخار آب خروجی سمت آند و کاتد می‌باشند که مقدار آنها از رابطه (3) قابل محاسبه می‌باشد:

$$\dot{N}_{\mathrm{v}} = \frac{P_{\mathrm{v}}\,\dot{V}}{\bar{R}\,T} \tag{3}$$

که در این رابطه P_{v}، $\dot{V}$ و T به ترتیب فشار جزیی بخار آب، دبی حجمی مخلوط و دمای مخلوط می‌باشند. مقدار P_{v} را می‌توان از رابطه (4) محاسبه نمود [9]:

$$P_{\mathrm{v}} = \emptyset \times P_{\mathrm{sat|T}} \tag{4}$$

در این رابطه $\emptyset$ رطوبت نسبی و $P_{\mathrm{sat|T}}$ فشار بخار اشباع در دمای مورد نظر می‌باشد. مقدار $P_{\mathrm{sat|T}}$ را می‌توان از رابطه (5) بدست آورد[9]:

$$P_{\mathrm{sat|T}} = 6.02724 \times 10^{-3} + 4.38484 \times 10^{-4} \times T + 1.39844 \times 10^{(-5)} \times T^2 + 2.71166 \times 10^{(-7)} \times T^3 + 2.57731 \times 10^{(-9)} \times T^4 + 2.82254 \times 10^{(-11)} \times T^5 \tag{5}$$

در روابط (1) و (2) جمله $\dot{N}_{\mathrm{Condense}}$ بیانگر نرخ مولی آب چگالیده شده در گازهای خروجی از پیل سوختی می‌باشد که در یک رطوبت‌گیر ذخیره شده و توسط ترازوی دیجیتال مقدار آن مشخص می‌شود. همچنین در روابط مذکور عبارات $\dot{N}_{\mathrm{v}}^{\mathrm{P}}$ و $\dot{N}_{\mathrm{v}}^{\mathrm{EOF}}$ به ترتیب نرخ مولی آب تولید شده در سمت کاتد و نرخ مولی مربوط به فرایند الکترو-اسمز می‌باشند که مقدار آنها از روابط (6) و (7) بدست می‌آید [11,10]:

$$\dot{N}_{\mathrm{v}}^{\mathrm{P}} = \frac{I}{2F} \tag{6}$$

$$\dot{N}_{\mathrm{v}}^{\mathrm{EOF}} = n_{\mathrm{d}}\frac{I}{F} \tag{7}$$

در این روابط I بیانگر دانسیته جریان پیل سوختی، F عدد فارادی که مقدار آن برابر است با $96487\ C/mol$ و n_{d} ضریب الکترو-اسمز می‌باشد. مقدار n_{d} از رابطه (8) به دست می‌آید [10]:

$$n_{\mathrm{d}} = \begin{cases} 0.0049 + 2.02a - 4.53a^2 + 4.09a^3 : 0 < a \le 1 \\ 1.5849 + 0.159(a-1) \quad : \quad a > 1 \end{cases} \tag{8}$$

در رابطه فوق a مقدار فعالیت بخار آب غشاء می‌باشد که مقدار آن را می‌توان از رابطه (9) بدست آورد:

$$a_{\mathrm{j}} = y_{\mathrm{i}}\frac{P_{\mathrm{j}}}{P_{\mathrm{sat,j}}} \tag{9}$$

در این رابطه y_{i} کسر مولی بخار آب در مخلوط می‌باشد و اندیس j آند یا کاتد را نشان می‌دهد.

با توجه به این‌که مقدار فعالیت بخار آب غشاء ناشی از فعالیت بخار آب سمت آند و کاتد می‌باشد، لذا با داشتن فعالیت بخار آب آند و کاتد می‌توان فعالیت بخار آب غشاء را به صورت میانگین این مقادیر تخمین زد، یعنی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.24.1]

داریم [12]:

$$a = \frac{a_{\text{anode}} + a_{\text{cathode}}}{2} \quad (10)$$

دراین مقاله، مقدار فعالیت بخار آب درسمت آند و کاتد به صورت میانگین جریان ورودی و خروجی لحاظ گردید. با داشتن مقادیر مربوط به جملات مختلف در روابط (1) یا (2) مقدار نرخ مولی نفوذ معکوس $\dot{N}_{\text{v}}^{\text{B.D}}$ قابل محاسبه می‌باشد.

با توجه به مطالب گفته شده و همچنین با در نظر گرفتن داده‌های آزمایشگاهی در رطوبت‌ها و جریان‌های مختلف، مقدار جریان الکترو-اسمز، ضریب الکترو-اسمز و نفوذ معکوس بدست آمد و نمودارهای مربوط به آنها بر حسب رطوبت آند و کاتد در جریان‌های مختلف در هر آزمایش رسم و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

4- نتایج و بحث

در این قسمت از مقاله به بررسی نتایج بدست آمده از آزمایشات انجام شده پرداخته می‌شود. بررسی‌های انجام شده در سه بخش تحلیل شد که این سه بخش شامل جریان الکترو-اسمز، ضریب الکترو-اسمز و درگ خالص الکترو-اسمز می‌باشند. در ادامه به بررسی این پارامترها می‌پردازیم.

4-1- اثرات تغییر رطوبت بر جریان الکترو -اسمز

4-1-1- اثر تغییر رطوبت کاتد

در این قسمت، به بررسی اثر رطوبت کاتد بر جریان الکترو-اسمز پرداخته می‌شود. در شکل 3 نمودار جریان الکترو-اسمز برحسب رطوبت کاتد در جریان‌های مختلف ترسیم شده است. در تمام این آزمایش‌ها مقدار نرخ حجمی گازهای آند و کاتد برابر با 0.5 لیتر بر دقیقه لحاظ گردید. همانطور که از نمودارهای شکل 3 مشخص است، مقدار جریان الکترو-اسمز با افزایش رطوبت کاتد افزایش می‌یابد. البته بایستی توجه داشته باشیم که نرخ افزایش مقدار جریان الکترو-اسمز برحسب رطوبت کاتد در جریان‌های بالاتر به مراتب بیشتر از جریان‌های پایین‌تر می‌باشد. مطابق شکل 3 در جریان‌های بالاتر و در رطوبت‌های کمتر از 70 درصد تغییرات جریان الکترو-اسمز تقریبا به صورت خطی می‌باشد و برای رطوبت‌های بالای 70 درصد تغییرات محسوسی دیده نمی‌شود. در واقع، با توجه به این مطلب می‌توان نتیجه گرفت که یک حالت بهینه‌ای برای رطوبت سمت کاتد وجود دارد که بعد از این رطوبت مقدار جریان الکترو-اسمز تقریبا ثابت خواهد ماند.

همان‌گونه که از نمودارهای شکل 3 مشخص است در جریان‌های پایین میزان تغییرات جریان الکترو-اسمز برحسب رطوبت کاتد خیلی زیاد نیست. در حقیقت، هرچند در جریان‌های پایین‌تر نیز همانند جریان‌های بالا با افزایش رطوبت کاتد مقدار جریان الکترو-اسمز افزایش می‌یابد، اما میزان تغییرات در این جریان‌ها نسبت به جریان‌های بالاتر بسیار کمتر است. در حالت کلی، می‌توان گفت که مقدار جریان الکترو-اسمز با رطوبت سمت کاتد نسبت مستقیم دارد و با افزایش آن زیاد شده و با کاهش آن کاهش می‌یابد.

4-1-2- اثر تغییر رطوبت آند

بعد از بررسی اثر تغییر رطوبت کاتد بر جریان الکترو-اسمز، اثر تغییر رطوبت آند را بررسی می‌کنیم. در این حالت، مشاهده می‌شود که نمودارهای به دست آمده که در شکل 4 ترسیم شده است بسیار شبیه به نمودارهای شکل 3 است. در واقع، طبق نمودارهای شکل 4 نیز با افزایش رطوبت آند مقدار جریان الکترو-اسمز تقریبا به صورت خطی افزایش یافته و بعد از یک رطوبت خاص تغییر زیادی در مقدار جریان الکترو-اسمز مشاهده نمی‌گردد. به عبارت دیگر، در این‌جا نیز می‌توان گفت که حالت بهینه‌ای برای رطوبت آند وجود دارد. همچنین طبق این نمودارها با افزایش جریان پیل سوختی میزان شیب نمودارهای جریان الکترو-اسمز برحسب رطوبت آند افزایش می‌یابد. البته با مقایسه نمودارهای شکل 3 و 4 به یک تفاوت مهم پی می‌بریم و آن اینکه نمودارهای مربوط به رطوبت آند دارای مقدار شیب بیشتری نسبت به نمودارهای رطوبت کاتد است. به عنوان مثال، در جریان 2.5 آمپر پیل سوختی زمانیکه رطوبت آند از 0 به 35 درصد تغییر کرد، مقدار جریان الکترو-اسمز از مقدار 6.6×10^{-7} به 1.3×10^{-6} مول بر سانتی‌متر مربع بر ثانیه افزایش می‌یافت؛ این درحالی بود که مقدار جریان الکترو-اسمز در جریان 2.5 آمپر و تغییر رطوبت کاتد از صفر به 35 درصد از 8.8×10^{-7} به 1.4×10^{-6} مول بر سانتی‌متر مربع بر ثانیه تغییر نمود. دلیل این امر را شاید بتوان به جهت حرکت جریان الکترو-اسمز مربوط دانست. به عبارتی، چون حرکت جریان الکترو-اسمز از سمت آند به سمت کاتد است، لذا با افزایش رطوبت آند منطقی است که نرخ تغییرات جریان الکترو-اسمز افزایش یابد. البته اینکه با افزایش جریان شیب نمودارها افزایش می‌یابد نیز ناشی از این نکته است که افزایش مقدار جریان سرعت واکنش‌های آند و کاتد را افزایش داده و حرکت پروتون‌ها از غشاء به سمت کاتد نیز افزایش می‌یابد. لذا، حرکت پروتون‌ها که عامل جریان الکترو-اسمز است باعث افزایش مقدار جریان الکترو-اسمز می‌گردد.

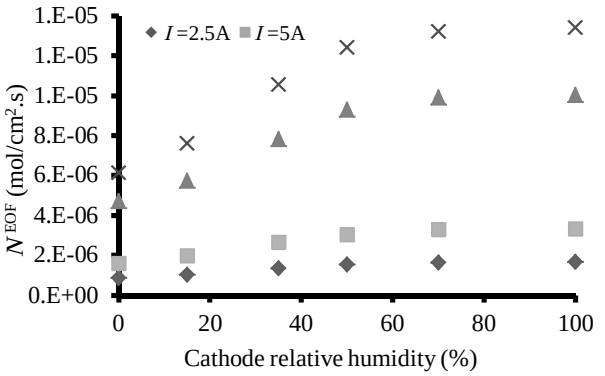

Fig. 3 variations of electro-osmotic flow by cathode humidity in 70% anode humidity

شکل 3 تغییرات جریان الکترو-اسمز برحسب رطوبت کاتد در رطوبت آند 70 درصد

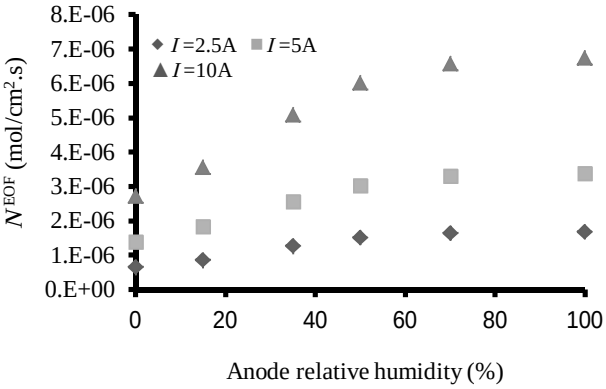

Fig. 4 variations of electro-osmotic flow by anode humidity in 70% cathode humidity

شکل 4 تغییرات جریان الکترو-اسمز برحسب رطوبت آند در رطوبت کاتد 70 درصد

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.24.1]

4-2- اثرات تغییر رطوبت بر ضریب الکترو -اسمز

4-2-1- اثر تغییر رطوبت کاتد

شکل 5 تغییرات ضریب الکترو-اسمز را در جریان‌های مختلف پیل سوختی موردآزمایش برحسب رطوبت کاتد نشان می‌دهد. طبق نمودارهای شکل 5 مشخص است که هر چقدر رطوبت سمت کاتد افزایش می‌یابد تغییرات ضریب الکترو-اسمز برحسب رطوبت کاتد نیز به یک حالت پایدار و ثابت می-رسد. به عبارت دیگر می‌توان گفت تغییرات ضریب الکترو-اسمز برحسب رطوبت کاتد تا یک رطوبت خاص به صورت خطی است، اما از یک نقطه به بعد با افزایش رطوبت کاتد تغییر چندانی در مقدار ضریب الکترو-اسمز مشاهده نمی‌شود. همچنین با توجه به نمودارهای شکل 5 می‌توان گفت افزایش جریان پیل سوختی در رطوبت‌های کمتر از حدود 60 درصد سبب کاهش مقدار ضریب الکترو-اسمز می‌گردد و در مقادیر بیش از این رطوبت ضریب الکترو-اسمز تغییر چندانی نخواهد داشت. علت اینکه در رطوبتهای بالا تغییرات چندانی در ضریب الکترو-اسمز مشاهده نمی‌شود را شاید بتوان این گونه بیان کرد که افزایش جریان پیل سوختی علاوه بر اینکه باعث افزایش حرکت پرتون از سمت آند به سمت کاتد می شود، باعث افزایش تولید آب در سمت کاتد نیز می‌گردد. می‌دانیم که تولید آب در سمت کاتد باعث برگشت جریان آب به سمت آند می‌شود و این عمل مخالف جریان آبی است که توسط پروتون‌ها از سمت آند به سمت کاتد می‌آید، لذا یک حالت تعادل در ضریب الکترو-اسمز ایجاد می‌گردد.

4-2-2- اثر تغییر رطوبت آند

شکل 6 ضرایب الکترو-اسمز را در رطوبت‌های مختلف آند نشان می‌دهد. در این شکل نیز نمودارهایی مشابه با نمودارهای شکل 5 مشاهده می‌شود. در واقع، در شکل 6 نمودارهای رسم شده در جریان‌های مختلف شکل مشابهی دارند. تمام این نمودارها به دوقسمت تقسیم می‌شوند؛ یک بخش از هر نمودار تغییرات خطی ضرایب الکترو-اسمز برحسب رطوبت آند را نشان می‌دهد و بخش دیگر تغییرات چندانی را برای ضرایب الکترو-اسمز برحسب رطوبت آند نشان نمی‌دهد و تقریبا به صورت یک خط مستقیم است. در شکل 6 نیز نمودارها این نکته را القاء می‌کنند که از یک رطوبت خاص آند به بعد تغییرات چندانی در ضریب الکترو-اسمز وجود ندارد.

با توجه به نمودارهای شکل 6 مشاهده می‌گردد تغییرات ضرایب الکترو-اسمز برحسب جریان پیل سوختی تقریبا ثابت است و با افزایش رطوبت آند

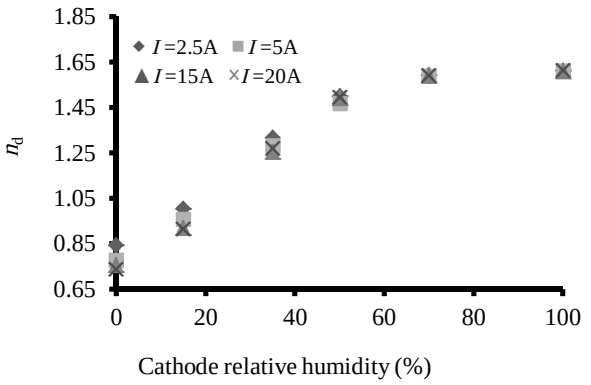

Fig. 5 variations of electro-osmotic coefficient by cathode humidity in 70% anode humidity

شکل 5 تغییرات ضریب الکترو-اسمز بر حسب رطوبت کاتد در رطوبت آند 70 درصد

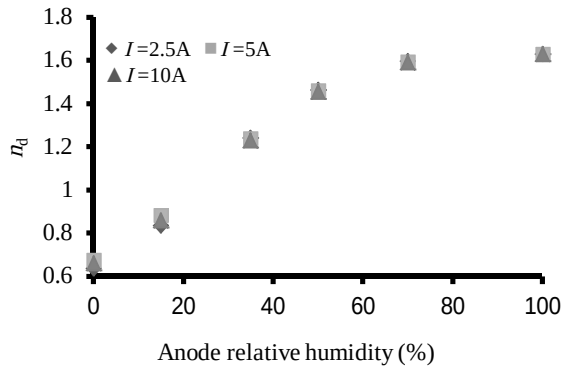

Fig. 6 variations of electro-osmotic coefficient by anode humidity in 70% cathode humidity

شکل 6 تغییرات ضریب الکترو-اسمز برحسب رطوبت آند در رطوبت کاتد 70 درصد

مقدار ضریب الکترو-اسمز افزایش پیدا می‌کند. با توجه به وابستگی ضریب الکترو-اسمز به فعالیت آب در غشاء انتظار می‌رود که نمودارهای ضریب الکترو-اسمز در سمت آند و کاتد با اندکی تفاوت تقریبا مشابه یکدیگر باشند. در واقع، چون مقدار فعالیت آب در غشاء به‌صورت مقدار میانگین رطوبت‌های ورودی و خروجی آند و کاتد تقریب زده می‌شود، لذا با توجه به یکسان بودن مقدار میانگین رطوبت‌های ورودی و خروجی در شکل‌های 5 و 6 می‌توان نتیجه گرفت که نمودارها بایستی حالت مشابهی داشته باشند. البته همانطور که از روی نمودارها نیز مشخص است در رطوبت‌های کم اندکی نوسان در جریان‌های اولیه وجود دارد ولی با افزایش رطوبت این نوسانات از بین رفته و نمودارها حالت ثابتی به خود می‌گیرند.

4-3- اثرات تغییر رطوبت بر درگ خالص

4-3-1- اثر تغییر رطوبت کاتد

مطابق شکل 7 مشاهده می‌شود که با افزایش رطوبت کاتد درگ خالص کاهش می‌یابد. اما همان‌طور که از نمودارهای شکل 7 مشخص است مقدار درگ خالص در یک محدوده از رطوبت کاتد به‌صورت خطی شیب‌دار رسم شده است و در محدوده‌ای دیگر به‌صورت یک خط مستقیم می‌باشد. به عبارت دیگر مقدار درگ خالص برحسب رطوبت کاتد تا یک رطوبت خاص به صورت خطی با افزایش رطوبت کاهش می‌یابد و بعد از این مقدار تغییر چندانی در مقدار آن مشاهده نمی‌گردد. دلیل کاهش مقدار درگ خالص را شاید بتوان این گونه بیان کرد که با افزایش رطوبت در سمت کاتد مقدار نفوذ معکوس آب بیشتر شده و اینکار باعث کاهش مقدار درگ خالصی خواهد شد که اختلاف بین جریان نفوذ معکوس آب و جریان الکترو-اسمز است. نکته دیگری که از نمودارهای شکل 7 نتیجه می‌شود مربوط به تغییرات درگ خالص برحسب جریان پیل سوختی غشاء پلیمری است. با توجه به نمودارها مشخص است که افزایش جریان پیل سوختی باعث کاهش مقدار درگ خالص در پیل سوختی می‌شود. از آن‌جائی‌که افزایش جریان پیل سوختی سبب تولید آب بیشتر در سمت کاتد می‌گردد، لذا این امر منجر به برگشت بیشتر جریان از سمت کاتد به سمت آند شده و در نتیجه آن مقدار درگ خالص کاهش می‌یابد.

4-3-2- اثر تغییر رطوبت آند

در شکل 8 نمودارهای مربوط به تغییرات درگ خالص برحسب رطوبت آند ترسیم شده است. با توجه به نمودارهای شکل 8 مشاهده می‌شود که با

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.24.1]

افزایش مقدار رطوبت آند میزان درگ خالص نیز افزایش می‌یابد. در حقیقت، با افزایش رطوبت در سمت آند مقدار جریان الکترو-اسمز افزایش یافته و در نتیجه آن مقدار درگ خالص که اختلاف بین نفوذ معکوس و جریان الکترو-اسمز است نیز افزایش می‌یابد. با توجه به شکل 8 می‌توان گفت که در نمودارهای این شکل نیز افزایش درگ خالص تا یک رطوبت خاص اتفاق می‌افتد و بعد از آن تغییرات درگ خالص برحسب رطوبت آند بسیار ناچیز می‌شود. به عبارت دیگر، در این قسمت نیز می‌توان حالت بهینه‌ای را برای رطوبت به دست آورد. در نمودارهای شکل 8 همانند نمودارهای شکل 7 می‌توان به این نکته اشاره کرد که مقدار تغییرات درگ خالص برحسب رطوبت آند با افزایش جریان پیل سوختی کاهش می‌یابد. علت این امر همان‌گونه که در بخش قبل نیز گفته شد به افزایش تولید آب در سمت کاتد بر می‌گردد. در واقع، افزایش جریان پیل سوختی باعث افزایش تولید آب در سمت کاتد شده و باعث برگشت بیشتر جریان از کاتد به آند می‌شود و در نتیجه این‌کار مقدار درگ خالص کاهش می‌یابد.

5- نتیجه گیری

در این پژوهش، بررسی آزمایشگاهی تغییر رطوبت در گازهای ورودی به پیل سوختی تک سلولی غشاء پلیمری با مقطع بیضوی انجام گرفت و تاثیر آن بر جریان الکترو-اسمز و ضریب آن مورد بررسی واقع گردید. با توجه به مقادیر به دست آمده مشاهده شد که تغییرات جریان الکترو-اسمز برحسب رطوبت آند و کاتد تقریبا به‌طور خطی بود و افزایش مقدار رطوبت باعث افزایش مقدار جریان الکترو-اسمز می‌شد. همچنین از روی نمودارها و نتایج مشخص شد که از یک رطوبت به بعد تغییرات خیلی کم شده و حالت بهینه‌ای برای رطوبت آند و کاتد قابل محاسبه بود.

همچنین، با توجه به نمودارهای مربوط به رطوبت کاتد و آند می‌توان این تفاوت را مشاهده کرد که مقادیر جریان الکترو-اسمز در حالتی که رطوبت آند بیشتر از رطوبت کاتد است عدد بزرگتری را نشان می‌دهد. به طور مثال، در رطوبت 70 درصد آند و 35 درصد کاتد و جریان 5 آمپر مقدار جریان الکترو-اسمز برابر با 2.66639×10^{-6} مول بر سانتی‌متر مربع بر ثانیه ثبت شد، در حالیکه این عدد در رطوبت 70 درصد کاتد و 35 درصد آند در همان جریان برابر با 2.56418×10^{-6} مول بر سانتی‌متر مربع بر ثانیه بود. با توجه مقادیر به دست آمده برای ضرایب الکترو-اسمز نیز مشخص شد که تغییرات این پارامتر برحسب رطوبت کاتد و آند به‌صورت خطی با شیب مثبت است. البته این تغییرات تا یک رطوبت خاص وجود داشت و بعد از آن تغییرات ناچیزی در مقدار ضریب الکترو-اسمز مشاهده گردید. همچنین نتایج نشان داد که تاثیر جریان پیل سوختی بر ضریب الکترو-اسمز بیشتر در رطوبت‌های کم اتفاق می‌افتاد و با افزایش مقدار رطوبت اثر جریان پیل سوختی بر ضریب الکترو-اسمز کاهش می‌یافت. با بررسی نتایج مربوط به درگ خالص معلوم شد که تغییرات درگ خالص برحسب رطوبت کاتد به‌صورت خطی با شیب منفی بود، اما نمودار این تغییرات برحسب رطوبت آند دارای شیب مثبت بود. البته نکته مشترکی در این نمودارها مشاهده گردید و آن این بود که در نمودارهای به‌دست آمده برای هر دو حالت رطوبت کاتد و آند با افزایش جریان پیل سوختی نمودارها دچار افت می‌شدند. نکته مهمی دیگری که در آزمایش‌ها حاصل گردید این بود که در رطوبت کاتد صفر و رطوبت آند 70 درصد، بیشترین جریانی که از پیل سوختی غشاء پلیمری کشیده شد برابر با 0.86 آمپر بر سانتی‌متر مربع بود اما این مقدار در رطوبت صفر آند و 70 درصد کاتد برابر با 0.512 آمپر بر سانتی‌متر مربع به دست آمد. به عبارت دیگر، می‌توان گفت در بحث رطوبت‌زنی گازهای پیل سوختی غشاء پلیمری، هر چند مرطوب بودن هر دو سمت آند و کاتد دارای اهمیت ویژه‌ای است، اما اهمیت رطوبت‌زنی در سمت آند نسبت به رطوبت‌زنی در سمت کاتد از اهمیت خاص‌تری برخوردار است که بایستی حتما مورد توجه واقع شود.

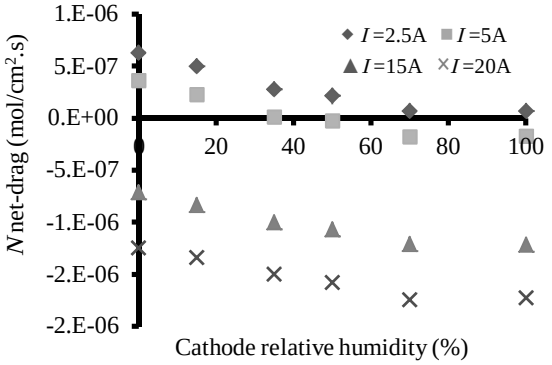

Fig. 7 variations of net drag by cathode humidity in 70% anode humidity

شکل 7 تغییرات درگ خالص برحسب رطوبت کاتد در رطوبت آند 70 درصد

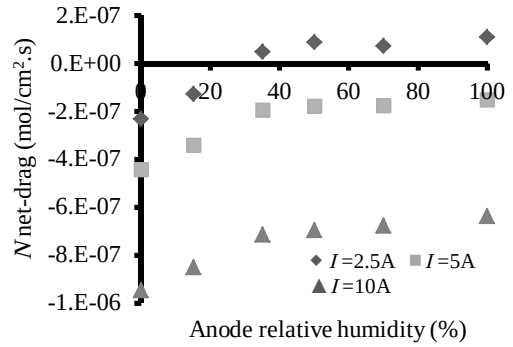

Fig. 8 variations of net drag by anode humidity in 70% cathode humidity

شکل 8 تغییرات درگ خالص برحسب رطوبت آند در رطوبت کاتد 70 درصد

6- مراجع

[1] G. Karimi, X. Li, Electroosmotic flow through polymer electrolyte membranes in PEM fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 140, No. 1, pp. 1-11, 2005.

[2] Q. Yan, H. Toghiani, J. Wu, Investigation of water transport through membrane in a PEM fuel cell by water balance experiments, *Journal of Power Sources*, Vol. 158, No. 1, pp. 316-325, 2006.

[3] W.-M. Yan, H.-S. Chu, J.-Y. Chen, C.-Y. Soong, F. Chen, Transient analysis of water transport in PEM fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 162, No. 2, pp. 1147-1156, 2006.

[4] Y. Cai, J. Hu, H. Ma, B. Yi, H. Zhang, Effect of water transport properties on a PEM fuel cell operating with dry hydrogen, *Electrochimica Acta*, Vol. 51, No. 28, pp. 6361-6366, 2006.

[5] A. Husar, A. Higier, H. Liu, In situ measurements of water transfer due to different mechanisms in a proton exchange membrane fuel cell, *Journal of Power Sources*, Vol. 183, No. 1, pp. 240-246, 2008.

[6] Y. H. Park, J. A. Caton, An experimental investigation of electro-osmotic drag coefficients in a polymer electrolyte membrane fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, No. 24, pp. 7513-7520, 2008.

[7] P. K. Das, X. Li, Z.-S. Liu, Analysis of liquid water transport in cathode catalyst layer of PEM fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, No. 6, pp. 2403-2416, 2010.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.24.1]

[8] E. Misran, N. S. M. Hassan, W. R. W. Daud, E. H. Majlan, M. I. Rosli, Water transport characteristics of a PEM fuel cell at various operating pressures and temperatures, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, No. 22, pp. 9401-9408, 2013.

[9] J. Zhang, Y. Tang, C. Song, Z. Xia, H. Li, H. Wang, J. Zhang, PEM fuel cell relative humidity (RH) and its effect on performance at high temperatures, *Electrochimica Acta*, Vol. 53, No. 16, pp. 5315-5321, 2008.

[10] T. V. Nguyen, R. E. White, A water and heat management model for Proton-Exchange-Membrane fuel cells, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 140, No. 8, pp. 2178-2186, 1993.

[11] B. Zhou, W. Huang, Y. Zong, A. Sobiesiak, Water and pressure effects on a single PEM fuel cell, *Journal of Power Sources*, Vol. 155, No. 2, pp. 190-202, 2006.

[12] N. Mulyazmi, W. Daud, E. Majlan, M. Rosli, Water balance for the design of a PEM fuel cell system, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, No. 22, pp. 9409-9420, 2013.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.3.24.1]