



بررسی عملکرد یک مرطوب‌ساز غشایی آب-گاز قابل استفاده در سیستم پیل سوختی پلیمری

درنا خوشنویس¹، سعید اصغری^{2*}، فریبرز جهان‌شاه³

- 1- کارشناسی ارشد، مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه اصفهان، اصفهان
 2- استادیار، مهندسی مکانیک، پژوهشگاه فضاپیما، انرژی، پژوهشگاه فضایی ایران، اصفهان
 3- استادیار، مهندسی مکانیک، مجتمع عالی آموزشی و پژوهشی صنعت آب و برق، اصفهان
 * اصفهان، صندوق پستی 81955-174، s.asghari@isrc.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 06 بهمن 1394
 پذیرش: 11 بهمن 1394
 ارائه در سایت: 26 بهمن 1394

کلید واژگان:

پیل سوختی غشا پلیمری
 مرطوب‌ساز غشایی
 نقطه شبنم
 رطوبت نسبی
 مدل تحلیلی

چکیده

گازهای واکنشگر در هنگام ورود به توده پیل سوختی غشاء پلیمری بایستی دارای رطوبت بهینه باشند. مرطوب‌سازی این گازها به کمک یک مرطوب‌ساز غشایی صورت می‌پذیرد. در مطالعه حاضر یک مدل تحلیلی برای بررسی عملکرد یک مرطوب‌ساز غشایی آب-گاز مورد استفاده در پیل سوختی ارائه شده است. در ابتدا روابط بقای جرم و انرژی را برای سمت گاز مرطوب‌ساز اعمال نموده که در نتیجه آن یک دستگاه معادله غیرخطی بر حسب دما و نسبت رطوبت گاز خروجی از مرطوب‌ساز حاصل می‌شود. با حل دستگاه معادله حاصل، می‌توان به ارزیابی عملکرد مرطوب‌ساز از نقطه نظر دما و نقطه شبنم گاز خروجی از آن پرداخت. به کمک مدل توسعه داده شده، تأثیر عواملی نظیر دبی گاز، طول کانال، دما و فشار گاز ورودی به مرطوب‌ساز و عمق کانال گاز بر رطوبت نسبی، دمای خروجی و نیز نقطه شبنم گاز خروجی از مرطوب‌ساز بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که عمق کانال اثری بر دما و رطوبت گاز مرطوب‌ساز ندارد. همچنین افزایش طول کانال سبب افزایش نقطه شبنم گاز خروجی از مرطوب‌ساز می‌شود اما رطوبت نسبی ورودی تأثیر چندانی بر روی نقطه شبنم گاز مرطوب‌ساز ندارد. افزایش دمای هوای ورودی به مرطوب‌ساز نیز عملکرد مرطوب‌ساز را بهتر نمی‌کند. همچنین نتایج حاصل از مدل نشان می‌دهد که با افزایش فشار ورودی و استفاده از دبی هوای کمتر، عملکرد مرطوب‌ساز ارتقا می‌یابد.

An investigation of the performance of a water-gas membrane humidifier for polymer electrolyte membrane fuel cell systems

Dorna Khoshnevis¹, Saeed Asghari^{2*}, Fariborz Jahanshah³

- 1- Faculty of New Science and Technology, Isfahan, Iran
 2- Institute of Materials and Energy, Iranian Space Research Center, Isfahan, Iran
 3- Water and Electricity Higher Education and Research Institute, Isfahan, Iran
 * P.O.B. 81955-174 Isfahan, Iran, s.asghari@isrc.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 26 January 2016
 Accepted 31 January 2016
 Available Online 15 February 2016

Keywords:

Polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell
 Membrane humidifier
 Dew point
 Relative humidity
 Analytical model

ABSTRACT

Reactant gases should be humidified before entering a polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell stack. Humidification of the gases can be performed by a membrane humidifier. In the present study, an analytical model has been proposed to investigate the performance of a water-gas membrane humidifier which is used in the fuel cell systems. At first, a set of nonlinear equations was obtained by applying the mass and energy conservation laws on the gas side of the humidifier. The temperature and the humidity ratio of the outlet gases from the humidifier are the unknowns of these nonlinear equations. The proposed model can evaluate the performance of the humidifier based on the temperature and relative humidity of the outlet gases from the humidifier. The effects of different parameters like: gas flow rate, length and depth of channel, temperature and pressure of the inlet gases on the performance of the humidifier were studied by the developed model. The results show that the channel depth does not have an effect on the temperature and humidity of the humidified outlet gases. In addition, increasing the channel length causes an increase on the dew point of the outlet gases but the relative humidity of the dry inlet gas does not have a noticeable effect on the dew point of the outlet gases. Increasing the temperature of the inlet gases does not improve the humidifier performance, considerably. The results of the model show that increasing the inlet pressure and using less air flow improves the humidifier performance.

1- مقدمه

سوختی می‌تواند در دمای پایین مورد استفاده قرار گرفته و چگالی توان به حجم و توان به جرم بالاتری را نسبت به انواع دیگر پیل سوختی داشته باشند [1]. پیل سوختی پلیمری (PEMFC) دارای الکترولیت پلیمری به شکل یک

پیل سوختی غشاء پلیمری به عنوان مبدل انرژی در کاربردهای کوچک و نیز در مقیاس‌های بزرگ مورد توجه محققان قرار دارد زیرا این نوع پیل‌های

Please cite this article using:

D. Khoshnevis, S. Asghari, F. Jahanshah, An investigation of the performance of a water-gas membrane humidifier for polymer electrolyte membrane fuel cell systems, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 292-300, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ورقه نازک انعطاف‌پذیر است که هادی یون هیدروژن (پروتون) می‌باشد. متداول‌ترین نوع غشاء، پلیمری با نام تجاری نفیون است. هدایت پروتونی این نوع از غشاء شدیداً به محتوی آب آن بستگی دارد. برای کارایی مطلوب لازم است الکترولیت، از آب اشباع باشد. با این حال آب تولید شده در سمت کاتد و رطوبت هوا نمی‌وانند در حین کارکرد پیل سوختی، غشاء را به درستی مرطوب نگه دارند [2]. کارکرد بهینه توده پیل سوختی در دامنه محدودی از رطوبت اتفاق می‌افتد. اگر غشاء میزان رطوبت کمتری از حالت هیدراته کامل داشته باشد، هدایت پروتونی کاهش خواهد یافت که خود منجر به افزایش افت اهمی [3]. کاهش توان خالص توده پیل سوختی و احتمالاً تشکیل نقاط داغ محلی می‌شود که می‌تواند به طور چشمگیری طول عمر غشاء را کاهش دهد. با این حال زمانی که آب اضافی در غشاء، در لایه نفوذ گازی (GDL)، الکترودها و کانال‌های جریان وجود داشته باشد، می‌تواند اثرات منفی بر عملکرد پیل داشته باشد زیرا ممکن است مانع انتقال مؤثر گازهای واکنش-دهنده به سایت‌های کاتالیستی شده و پدیده غرقایی ایجاد شود. زمانی که پدیده غرقایی اتفاق می‌افتد آب در لایه متخلخل نفوذ گازی باقی مانده و مسیر گازهای واکنش‌دهنده به سایت‌های کاتالیستی را مسدود می‌کند که باعث می‌شود نرخ انتقال گازهای واکنش‌دهنده به سایت‌های کاتالیستی کاهش یافته و در نتیجه نرخ واکنش شیمیایی کاهش می‌یابد که این خود باعث افت ولتاژ می‌شود [4]. به منظور نگه‌داری غشاء در شرایط اشباع، گازهای واکنش‌دهنده معمولاً قبل از ورود به پیل مرطوب می‌شوند. مرطوب-کننده غشایی وسیله‌ای است که رطوبت را از خروجی کاتد یا جریان آب بازبایی کرده و به جریان گاز خشک ورودی به توده پیل منتقل می‌کند. به طور ساده، مرطوب‌کننده غشایی از دو کانال که توسط یک غشاء پلیمری از هم جدا شده‌اند، تشکیل شده است [5].

به طور کلی در سیستم‌های پیل سوختی از دو نوع مرطوب‌ساز گاز-گاز و یا آب-گاز استفاده می‌شود. در یک مرطوب‌کننده گاز-گاز، جریان گاز خشک در یک طرف غشاء توسط آب موجود در گاز مرطوب که در سمت دیگر غشاء جریان دارد، مرطوب می‌شود. محتوی بخار آب جریان خشک در طول سطح مشترک غشاء از ورودی تا خروجی مرطوب‌ساز افزایش می‌یابد [2]. در واقع بخار آب با فرایند نفوذ و در نتیجه اختلاف فشار موجود بین سمت گاز خشک و مرطوب از غشاء عبور می‌کند. عملکرد مرطوب‌کننده معمولاً بر اساس مقدار آب منتقل شده ارزیابی می‌شود. عملکرد مطلوب مرطوب‌کننده زمانی اتفاق می‌افتد که نرخ بخار آب جابجا شده حداکثر باشد و یا به عبارت دیگر، نقطه شبنم گاز خروجی از سمت خشک به نقطه شبنم گاز ورودی به سمت مرطوب برسد [6].

در مرطوب‌کننده آب-گاز، آب مایع در یک سمت غشاء و گاز واکنش-دهنده خشک در سمت دیگر غشاء جریان دارد. در نتیجه اختلاف غلظت موجود، آب در غشاء نفوذ کرده و در فصل مشترک غشاء با جریان گاز تبخیر شده و گاز خشک را مرطوب می‌کند [1].

اگر چه مرطوب‌کننده‌ها در بهبود عملکرد PEMFC تعیین‌کننده هستند ولی مطالعات زیادی بر روی سیستم‌های مرطوب‌کننده PEMFC انجام نشده است. کیو و مریدا یک مرطوب‌کننده غشایی تک کاناله و مستقیم را ساخته و اثر دبی گاز سمت خشک و مرطوب را بر عملکرد مرطوب‌کننده غشایی در مرطوب‌کننده گاز-گاز بررسی کردند. آنها نشان دادند که انتقال رطوبت به شدت تحت تأثیر دبی سمت گیرنده رطوبت قرار دارد و با کاهش نرخ جریان سمت خشک، نقطه شبنم افزایش می‌یابد [5]. یک مدل ترمودینامیکی از یک مرطوب‌کننده غشایی که از گاز خروجی از پیل برای مرطوب کردن گاز

خشک ورودی به آن استفاده می‌کند، توسط چن و همکاران توسعه داده شد [7]. در این مدل علاوه بر کانال‌های ورودی گازهای مرطوب و خشک، برای کنترل رطوبت یا گرما، یک کانال فرعی نیز که عبور جریان از آن به‌وسیله یک صفحه‌ی لغزان قابل تنظیم است، تعبیه شده است. افشاری و بهارلو یک مدل تحلیلی از مرطوب‌کننده غشاء مسطح برای پیل سوختی غشاء پلیمری ارائه دادند. آنها اثر پارامترهای ابعادی مانند ضخامت غشا و مساحت و قطر هیدرولیکی کانال را بر روی عملکرد مرطوب‌ساز بررسی کردند [8]. در تحقیق دیگری، افشاری و بهارلو یک مدل عددی سه بعدی برای مرطوب‌کننده غشایی مسطح ارائه داده و عملکرد دو مرطوب‌کننده با جریان متقابل و موازی را با هم مقایسه کردند [9]. رامیا و همکاران [1] عملکرد یک مرطوب‌کننده غشایی آب-گاز را با یک مرطوب‌کننده خارجی مقایسه کردند. او و پارک یک مدل تحلیلی یک بعدی ساده برای ارزیابی عملکرد مرطوب‌کننده آب-گاز با غشاء نفیون توسعه دادند. آنها در این کار از یک مدل ساده استفاده کردند. آنها اثرات ابعاد کانال جریان گاز مانند طول و عمق کانال و دمای نزدیکی نقطه شبنم¹ را بر ظرفیت مرطوب‌کردن غشاء مرطوب‌کننده با فرض ثابت بودن دما در طول کانال ارزیابی کردند [10]. از آنجا که غشاء علاوه بر تبادل رطوبت، کار تبادل گرما از طرف آب به طرف جریان گاز خشک را نیز انجام داده و همچنین طبق اصول ترمودینامیک، دمای گاز با جذب رطوبت کاهش می‌یابد، بنابراین دمای گاز در طول کانال ثابت نبوده و تغییر می‌یابد. کار حاضر در تکمیل کار او و پارک با در نظر گرفتن مبحث موازنه انرژی، تغییر دمای گاز در طول کانال نیز به مجموعه فرضیه‌ها اضافه شده است. فرض تغییرات دما از آنجا اهمیت می‌یابد که در طول کانال از یک طرف دما نقش مهمی در انتقال آب از طریق غشاء داشته و از طرف دیگر به دلیل تبادل انرژی در دو سمت غشاء، دمای گاز در هنگام عبور از مرطوب‌ساز تغییر می‌کند.

در مقاله حاضر با در نظر گرفتن یک مرطوب‌کننده غشایی تک کاناله و مستقیم (شکل 1) و با حل همزمان معادلات حاصل از موازنه جرم و انرژی در یک کانال مسطح، تغییرات دما و رطوبت جریان گاز خشک در طی حرکت در طول کانال بررسی می‌شود. همچنین وابستگی تغییرات نقطه شبنم گاز خروجی به تغییر ابعاد کانال و پارامترهای عملکردی دیگری نظیر سرعت، دما، فشار و رطوبت نسبی گاز ورودی بررسی خواهد شد.

2- مدل تحلیلی

همان‌گونه که از شکل 1 مشاهده می‌شود، برای توسعه مدل، یک مرطوب-کننده مسطح تک کاناله در نظر گرفته شده است. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود، غشاء نفیون بین کانال جریان گاز خشک (که باید مرطوب شود) و کانال جریان آب قرار می‌گیرد. آب در نتیجه اختلاف غلظت موجود در دو طرف غشاء، در غشاء نفوذ کرده و در جریان گاز خشک تبخیر می‌شود. بدین ترتیب هوای ورودی به پیل سوختی مرطوب می‌گردد. چون نفوذ در جهت x صورت می‌گیرد و گاز در راستای y حرکت می‌کند، می‌توان سطح مقطع دوبعدی ($abdc$) را در نظر گرفت.

برای بررسی روند تغییرات خواص فیزیکی گاز خشک (نظیر دما و رطوبت نسبی) در طی عبور از کانال مرطوب‌ساز، یک المان حجمی از کانال را به صورتی که در شکل 1 نشان داده شده است، انتخاب شده و روابط موازنه جرم و انرژی برای گاز عبوری از این المان استخراج می‌شود. لازم به ذکر است که شرایط گاز ورودی به المان نظیر دما و رطوبت آن معلوم بوده و هدف،

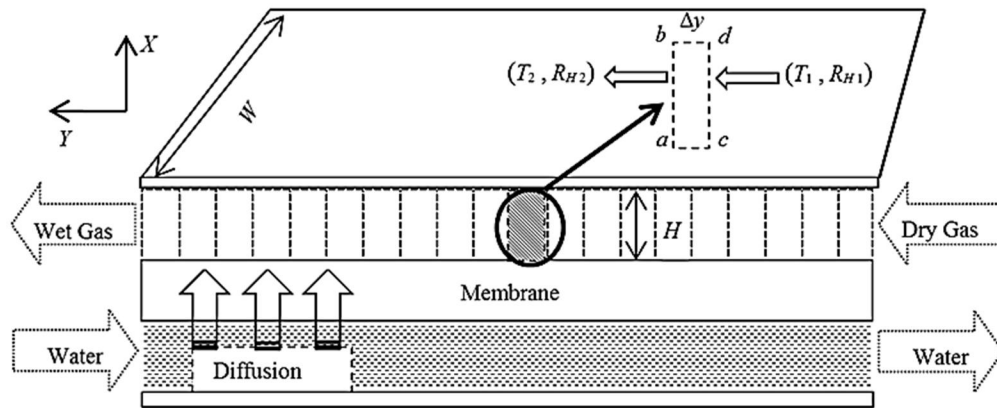


Fig. 1 The schematic view of the membrane humidifier

شکل 1 نحوه عملکرد مرطوب ساز غشایی

شار جرمی آب خروجی از حجم کنترل از مرز ab می‌باشد و ترم آخر معادله (2) مربوط به شار پخش آب از سمت غشاء (مرز ac) می‌باشد. $\Delta y, H, W$ ، طول حجم کنترل، عمق کانال، به ترتیب عرض کانال، ضریب نفوذپذیری غشاء، فشار بخار اشباع و فشار بخار آب می‌باشد. با تقسیم معادله (2) بر پارامتر HW می‌توان به معادله (3) رسید:

$$N_{w|1} - N_{w|2} = -K_w(P_w^{\text{sat}} - P_w)\Delta y/H \quad (3)$$

با فرض این که تغییرات فشار جزئی آب در جهت x ناچیز است و ترم جابجایی بر ترم پخش در کانال غالب است، می‌توان نوشت [11]:

$$N_w \approx C_w V \quad (4)$$

$$C_w = P_w/RT \quad (5)$$

C_w غلظت بخار آب و V سرعت گاز می‌باشد. با جایگذاری این مقادیر در معادله (3) می‌توان به معادله (6) رسید:

$$\frac{P_{w1}V}{RT_1} - \frac{P_{w2}V}{RT_2} = -\frac{K_w(P_w^{\text{sat}} - P_w)\Delta y}{H} \quad (6)$$

فشار جزئی آب را می‌توان به عنوان یک تقریب اولیه برابر میانگین فشار جزئی آب در مقاطع 1 و 2 دانست.

$$P_w = \frac{P_{w1} + P_{w2}}{2} \quad (7)$$

با در نظر گرفتن روابط بین فشار جزئی بخار آب، رطوبت نسبی (R_H) و رطوبت مطلق (w) برای مخلوط آب و هوا [12] و با استفاده از رابطه (7)، رابطه (6) به صورت معادله (8) بازنویسی می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{P_{w1}^{\text{sat}}}{P_{w2}^{\text{sat}}} R_{H1} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{K_w R \Delta y}{2VH} \right) \\ = -\frac{K_w R \Delta y}{V H P_{w2}^{\text{sat}}} P_w^{\text{sat}} + R_{H2} \left(\frac{1}{T_2} + \frac{K_w R \Delta y}{2VH} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

که P_w^{sat} در دمای متوسط گاز ورودی به و خروجی از آلان در نظر گرفته شده محاسبه می‌شود. P_{w1}^{sat} و P_{w2}^{sat} به ترتیب در دمای ورودی به و خروجی از آلان محاسبه می‌شوند. از رابطه هایلند و وکسلر جهت استخراج تابعیت فشارهای اشباع بر حسب دما استفاده کرد [5]:

$$\ln P_w^{\text{sat}} = \frac{C_1}{T} + C_2 + C_3 T + C_4 T^2 + C_5 T^3 + C_6 \ln(T) \quad (9)$$

ضرایب مربوط به رابطه (9) در جدول 1 نشان داده شده‌اند.

در نهایت با ساده‌سازی معادله (8) و دانستن اینکه P_w^{sat} از رابطه (9) به دست می‌آید، رابطه (10) حاصل می‌شود که دارای 2 مجهول w_2 و T_2 می‌باشد.

استخراج دما و رطوبت گاز خروجی از آلان است. به عبارت دیگر، در طی فرایند حل مساله، ورودی اولین آلان فرضی بر ورودی کانال طرف گاز منطبق بوده و بنابراین شرایط دما و رطوبت گاز ورودی به این آلان کاملاً مشخص است. از حل معادلات مربوط به موازنه جرم و انرژی برای این آلان، دما و رطوبت گاز خروجی از این آلان که همان شرایط گاز ورودی به دومین آلان است، مشخص خواهد شد. با اعمال و حل معادلات مربوطه برای آلان-هایی که به ترتیب در راستای کانال قرار گرفته‌اند، شرایط دما و رطوبت گاز در طول کانال و در نهایت در خروجی کانال گاز مرطوب‌ساز مشخص خواهد شد.

به دلیل بالاتر بودن ظرفیت گرمایی ویژه آب نسبت به گاز، آب عبوری از مرطوب‌ساز، تغییرات دمای چندانی نداشته و بنابراین دمای آن در طی عبور از کانال ثابت فرض می‌شود. پس در تحقیق حاضر تمرکز، تنها بر روی طرف گاز بوده و روابط موازنه جرم و انرژی برای سمت گاز استخراج می‌شود.

فرضیه‌های در نظر گرفته شده در مدل شامل موارد زیر است:

1) رفتار گاز و بخار به صورت رفتار گاز ایده‌آل است. 2) افت فشار در طول کانال ناچیز بوده و فشار سمت گاز ثابت است. 3) فشار جزئی بخار فقط در راستای y تغییر می‌کند. 4) جریان گاز کاملاً فراگیر است. 5) مرطوب‌کننده به خوبی از محیط اطراف عایق شده و انتقال گرما تنها در طول غشاء اتفاق می‌افتد. 6) کار خارجی روی سیستم انجام نمی‌شود. 7) ضریب گرمای ویژه گاز و ضریب انتقال حرارت همرفتی ثابت هستند. 8) ضریب نفوذپذیری غشاء ثابت بوده و تابعیتی از دما و سایر شرایط کاری ندارد.

2-1- موازنه جرم

به دلیل اینکه در کانال‌ها ترم جابجایی بر پخش غالب است، موازنه جرم بخار آب برای یک حجم کنترل در کانال گاز (حجم کنترل $abcd$) به صورت یک بعدی است. رابطه موازنه جرم آب را می‌توان به صورت معادله (1) نوشت:

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a (w_2 - w_1) \quad (1)$$

که \dot{m}_a جرم هوای خشک، \dot{m}_w جرم آب نفوذی از سمت غشاء به داخل آلان حجم کنترل، w_1 و w_2 به ترتیب رطوبت مطلق یا نسبت رطوبت هوای ورودی به و خروجی از آلان می‌باشد.

معادله (1) را می‌توان برحسب شار جرمی به شکل معادله (2) بازنویسی کرد:

$$N_{w|1} \cdot W \cdot H - N_{w|2} \cdot W \cdot H + K_w (P_w^{\text{sat}} - P_w) W \Delta y = 0 \quad (2)$$

که $N_{w|1}$ و $N_{w|2}$ به ترتیب شار جرمی آب ورودی به حجم کنترل از مرز cd و

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \text{Nu}_D = 3.54 & ; \text{Re} < 2300 \\ \text{Nu}_D = 0.023 \times \text{Re}^{\frac{4}{5}} \times \text{Pr}^{\frac{1}{3}} & ; \text{Re} \geq 2300 \end{cases} \quad (18)$$

معادله‌های (10) و (13) تشکیل یک دستگاه دو معادله و دو مجهول (مجهولات ω_2 و T_2) غیرخطی را می‌دهند. در تحقیق حاضر برنامه‌ای به کمک نرم‌افزار تجاری متلب جهت حل دستگاه معادلات توسعه داده شد. بایستی توجه داشت که مسلماً هر چه طول در نظر گرفته شده برای المان در راستای کانال (Δy) کاهش یابد، دقت پیش‌بینی مدل برای خواص گاز خروجی از مرطوب‌ساز افزایش خواهد یافت. البته این امر منجر به افزایش زمان حل مساله خواهد شد. در طی تحقیق حاضر، آنالیز استقلال حل از اندازه طول المان صورت پذیرفت و مشخص شد که برای ابعاد عرض و ارتفاع در نظر گرفته شده در این تحقیق، طول یک سانتیمتر برای هر المان کافی بوده و در نظر گرفتن طول‌های کوچکتر، تأثیری در توزیع دما و رطوبت حاصل در طول کانال و همچنین در خروجی از مرطوب‌ساز نخواهد داشت.

برای تحلیل نتایج، برنامه‌هایی برای رسم گراف‌های تغییرات دما و رطوبت نسبی گاز خروجی از مرطوب‌ساز برحسب تغییرات ابعاد کانال و پارامترهای دیگر نظیر دبی، دما و فشار ورودی گاز توسعه داده شد.

برای تعیین تغییرات نقطه شبنم که یک ویژگی سیستم مرطوب‌ساز محسوب می‌شود از معادله مگنوس [16,15] استفاده شده که دارای دقت $\pm 0.4^\circ\text{C}$ بوده و در دامنه دمایی 0 تا 60°C درجه سانتی‌گراد معتبر می‌باشد. در معادله (20)، T_{dp} نقطه شبنم می‌باشد.

$$\gamma_m(T, R_H) = \ln\left(\frac{R_H}{100}\right) + \frac{bT}{c + T} \quad (19)$$

$$T_{dp} = \frac{c\gamma_m(T, R_H)}{b - \gamma_m(T, R_H)} \quad (20)$$

$$b=17.27, c=237.7^\circ\text{C}$$

3- نتایج و بحث

در ابتدا به منظور بررسی و صحت‌گذاری مدل ارائه شده در پیش‌بینی شرایط هوای خروجی از یک مرطوب‌ساز، نتایج حاصل از مدل در پیش‌بینی رطوبت هوای خروجی از یک مرطوب‌ساز با نتایج آزمایشگاهی دیگر محققان [17] با مشخصات هندسی و عملکردی مرطوب‌ساز یکسان، در شکل 2 نشان داده شده است. در این نمودار روند تغییرات رطوبت هوای خروجی از مرطوب‌ساز بر حسب سرعت هوا، که در حقیقت به نوعی بیانگر دبی هوای عبوری می‌باشد، نشان داده شده است. همان‌گونه که از این شکل مشاهده می‌شود، نتایج مدل حاضر در پیش‌بینی رطوبت نسبی هوای خروجی دارای تطابق نسبی خوبی با نتایج آزمایشگاهی است.

برای بررسی و تحلیل عملکرد مرطوب‌ساز به کمک مدل توسعه داده شده، مقادیر عددی نشان داده شده در جدول 2 برای برخی از پارامترهای مدل در نظر گرفته شد. در همه تحلیل‌ها و بررسی‌ها صورت پذیرفته در تحقیق حاضر، مقادیر این پارامترها ثابت و برابر مقادیر نشان داده شده در جدول 2 است مگر بر خلاف آن موردی ذکر شده باشد.

3-1- بررسی تأثیر طول کانال بر رطوبت نسبی و دما و نقطه شبنم گاز خروجی از مرطوب‌ساز

با توجه به مشاهده‌های تجربی و مقادیر دبی مورد نیاز برای یک پیل سوختی با توان پایین، فرض می‌شود که هوای خشک با سرعت 0.5 متر بر ثانیه وارد کانال شده و در حین عبور از کانال، رطوبت لازم را از سمت آب از طریق

جدول 1 ضرایب فشار بخار اشباع در معادله هایلند و وکسلر [5]

Table 1 Coefficients in Hyland and Wexler saturation vapor pressure equation [5]

ضریب	مقدار
C_1	-0.58002206×10^4
C_2	0.13914993×10^1
C_3	$-0.48640239 \times 10^{-1}$
C_4	$0.41764768 \times 10^{-4}$
C_5	$-0.14452093 \times 10^{-7}$
C_6	0.65459673×10^1

$$\begin{aligned} & \frac{\omega_1 P}{\omega_1 + 0.622} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{K_w R \Delta y}{2VH} \right) \\ & = - \frac{K_w R \Delta y}{VH} P_w^{\text{sat}} (10^{-5}) + \frac{\omega_2 P}{\omega_2 + 0.622} \left(\frac{1}{T_2} + \frac{K_w R \Delta y}{2VH} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

معادله (10) دارای دو مجهول دمای خروجی و رطوبت مطلق خروجی می‌باشد که برای به دست آوردن مقادیر آنها باید معادله دیگری تعریف شود.

2-2- موازنه انرژی

به دلیل وجود تبادل حرارتی بین گاز و غشاء در المان در نظر گرفته شده و همچنین جذب رطوبت توسط گاز، دمای گاز در طول کانال تغییر می‌کند. برای محاسبه چگونگی این تغییرات باید معادله موازنه انرژی را بر المان نشان داده شده در شکل 1 اعمال نمود. معادله (11) از برقراری موازنه انرژی برای حجم کنترل $abcd$ حاصل می‌شود:

$$\sum \dot{m}_i h_i = \sum \dot{m}_e h_e \quad (11)$$

از آنجا که جریان گاز در ورودی و خروجی از المان، مخلوطی از هوا و آب می‌باشد، بنابراین رابطه (11) را می‌توان به صورت رابطه (12) بسط داد:

$$\dot{m}_{a1} h_{a1} + \dot{m}_{v1} h_{v1} + \dot{m}_w h_w + \bar{h} \Delta T = \dot{m}_{a2} h_{a2} + \dot{m}_{v2} h_{v2} \quad (12)$$

با تقسیم طرفین معادله بر \dot{m}_a و با دانستن اینکه جرم هوای خشک در طول المان ثابت است و با جایگذاری روابط آنتالپی مخلوط آب و هوا [13] در معادله (12)، می‌توان به معادله (13) رسید:

$$1.006 (T_2 - T_1) + 1998.68 (\omega_2 - \omega_1) + 1.84 (\omega_2 T_2 - \omega_1 T_1) - \frac{\bar{h} \Delta T}{\dot{m}_a} = (\omega_2 - \omega_1) h_w \quad (13)$$

همان‌گونه که مشاهده می‌شود این معادله نیز همانند معادله (10) دارای دو مجهول دمای خروجی و رطوبت نسبی خروجی (T_2 و ω_2) می‌باشد. همچنین معادله (13) شامل پارامترهای ΔT و \bar{h} بوده که می‌توان آنها را از روابط (14) و (15) به دست آورد.

$$\Delta T = T_w - \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (14)$$

که ΔT اختلاف دمای بین آب و میانگین دمای هوا در المان است. میانگین دمای هوا در المان از میانگین‌گیری دمای هوا در ورودی و به خروجی از المان به دست می‌آید.

$$\bar{h} = \frac{K \text{Nu}_D}{D_h} \quad (15)$$

با توجه به رژیم جریان که توسط عدد رینولدز تعیین می‌شود و با در نظر گرفتن سطح مقطع غیر دایره‌ای، Nu_D از روابط (16) و (17) و (18) به دست می‌آید [14].

$$\text{Re} = \frac{D_h V}{\nu} \quad (16)$$

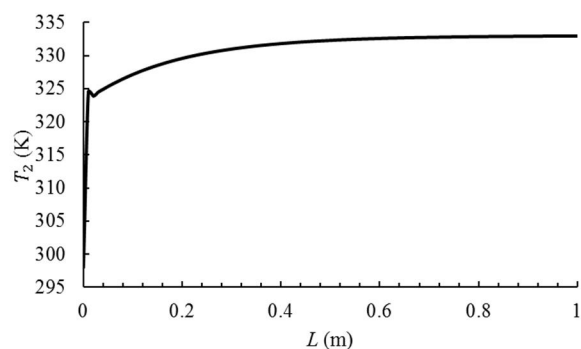


Fig. 4 Graph of gas temperature variations along the channel

شکل 4 نمودار تغییرات دمای گاز در طول کانال

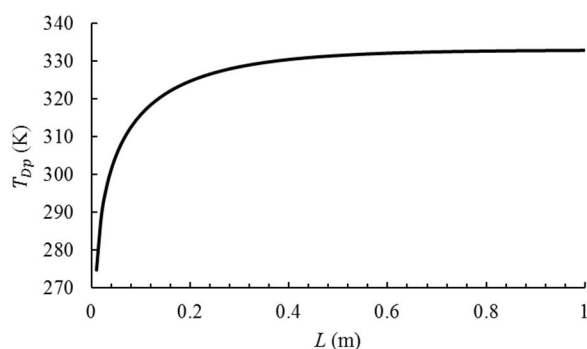


Fig. 5 Graph of dew point variations along the length of channel

شکل 5 نمودار تغییرات نقطه شبنم در طول کانال

همان‌گونه که از نمودار تغییرات دما در طول کانال مشاهده می‌شود (شکل 4)، دمای گاز در ابتدا یک افزایش ناگهانی داشته و سپس با یک کاهش کوچک مواجه شده و پس از آن دمای گاز شروع به افزایش ملایم می‌کند. افزایش اولیه مربوط به انتقال حرارت از آب گرم به گاز از طریق غشاء است. در حقیقت نرخ انتقال حرارت بسیار بالاتر از نرخ انتقال جرم آب بوده و در نتیجه افزایش دمای ناشی از انتقال حرارت بر کاهش دمای ناشی از انتقال جرم و افزایش رطوبت گاز غلبه نموده و در نتیجه گاز با افزایش دمای ناگهانی مواجه می‌شود ولی پس از یک افزایش نسبی، دمای گاز به دلیل جذب رطوبت اندکی کاهش می‌یابد. سپس با انتقال حرارت از آب به گاز در طول کانال، دمای گاز مجدداً افزایش می‌یابد.

به منظور مقایسه نتایج مدل حاضر با نتایج حاصل از مدل پارک [10]، روند تغییرات رطوبت نسبی و دمای شبنم در طول کانال برای هوایی که با سرعت 1 متر بر ثانیه و دمای 25 درجه سانتیگراد به مرطوب‌ساز وارد شده است، به ترتیب در شکل‌های 6 و 7 نشان داده شده است. همان‌گونه که از نمودار شکل 6 مشاهده می‌شود، مدل حاضر در قسمتی از طول کانال، رطوبت نسبی کمتری برای گاز پیش‌بینی می‌کند که دلیل آن افزایش دمای گاز در طول کانال در مدل حاضر بوده که به نوعی باعث می‌شود رطوبت نسبی نسبت به مدل پارک و همکاران [10] که در آن تغییر دما اعمال نمی‌شود، کمتر باشد. برای درک بهتر موضوع می‌توان به نمودار تغییرات نقطه شبنم در طول کانال رجوع نمود (شکل 7). همان‌گونه که از این شکل مشاهده می‌شود، در مدل حاضر تبادل گرما با سمت کانال آب باعث افزایش نقطه شبنم و نزدیکی آن به دمای آب شده است در صورتی که به کمک مدل پارک [10]، تغییرات نقطه شبنم به دلیل انتقال گرما لحاظ نشده و این تغییرات صرفاً ناشی از افزایش رطوبت نسبی گاز بوده است.

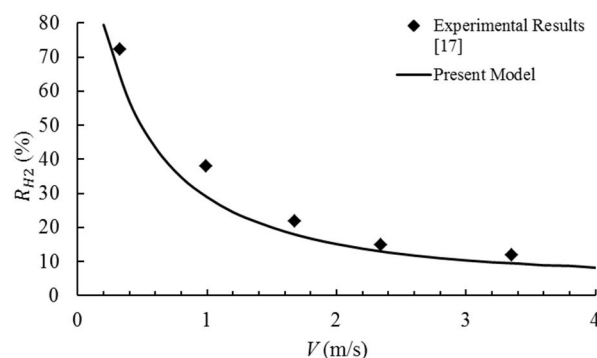


Fig. 2 Graph of relative humidity of the outlet gas versus gas velocity

شکل 2 نمودار تغییرات رطوبت نسبی هوای خروجی از مرطوب‌ساز با سرعت هوا

جدول 2 پارامترهای ثابت و مقدار آنها در برنامه

Table 2 Constant parameters and their values used in the program

پارامتر	واحد	مقدار
عرض کانال	میلیمتر	1
عمق کانال	میلیمتر	1
ضریب نفوذ نفیون 115 [10]	کیلوگرم بر مترمربع ثانیه، اتمسفر	5.3×10^{-5}
دمای هوای ورودی	کلوین	298
دمای آب	کلوین	333
طول کانال	متر	1

غشاء نفیون 115 دریافت کند. رطوبت گاز با حرکت در راستای کانال افزایش می‌یابد. نمودار تغییرات رطوبت در راستای طول کانال در شکل 3 نشان داده شده است. همچنین نمودار تغییرات دمای گاز و نقطه شبنم در طول کانال در شکل‌های 4 و 5 نشان داده شده است. با عبور آب از غشاء و تبخیر در سمت هوا، رطوبت هوا افزایش می‌یابد. همان‌گونه که از شکل 3 مشاهده می‌شود طول کانال به اندازه‌ای بلند است که در اواسط طول کانال، رطوبت گاز نزدیک به 100% می‌رسد. همچنین با توجه به شکل‌های 4 و 5، دمای هوا و نقطه شبنم نیز با افزایش طول کانال افزایش می‌یابد. نقطه شبنم گاز تا دمای نزدیک به دمای آب ورودی به مرطوب‌ساز افزایش می‌یابد و افزایش بیشتر طول کانال اثری در افزایش نقطه شبنم ندارد.

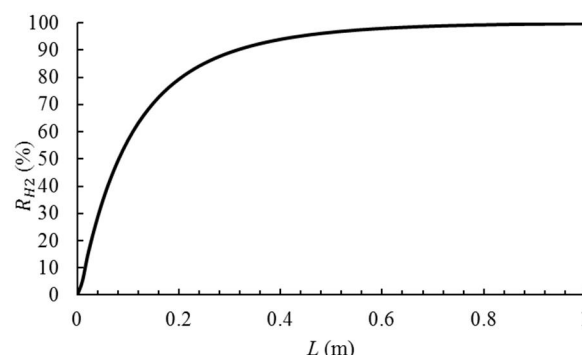


Fig. 3 Graph of gas humidity variations along the channel

شکل 3 نمودار تغییرات رطوبت گاز در طول کانال

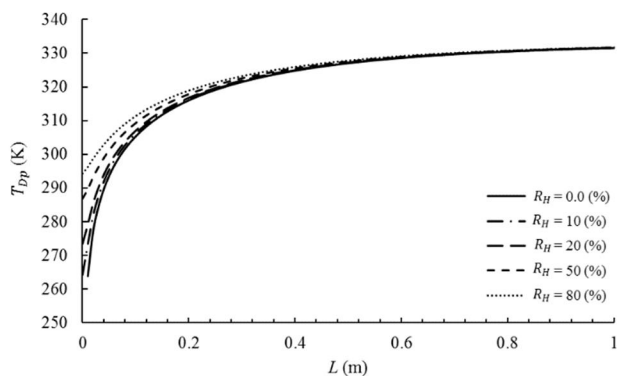


Fig. 8 Graph of dew point variations versus channel length in different inlet relative humidities

شکل 8 نمودار تغییرات نقطه بنم در طول کانال و در رطوبت‌های ورودی مختلف

3-3- بررسی اثر سرعت گاز ورودی بر روی شرایط هوای خروجی از مرطوب‌ساز

معمولاً یک سیستم پیل سوختی برای یک توان نامی طراحی و ساخته می‌شود ولی همیشه توان درخواستی از آن برابر توان نامی نمی‌باشد. در پاره‌ای از زمان‌ها توان درخواستی بسیار کمتر از توان نامی است. بنابراین توده پیل سوختی به همراه سیستم‌های جانبی که مرطوب‌ساز نیز از جمله آنها است، بایستی دامنه‌ای از توان درخواستی تا حداکثر توان نامی را جابجگو باشند. دبی هوای مورد نیاز توده پیل که از مرطوب‌ساز عبور می‌کند، تابعی از توان درخواستی از توده پیل می‌باشد. بنابراین مرطوب‌ساز در یک سیستم پیل سوختی بایستی دارای عملکرد مطلوبی در دامنه‌ای از سرعت هوای عبوری از آن باشد. به منظور بررسی اثر تغییر سرعت گاز خشک ورودی به مرطوب‌ساز بر روی دما، نقطه شبنم و رطوبت خروجی گاز خروجی از مرطوب‌ساز، سرعت گاز خشک ورودی در دامنه 1 تا 9 متر بر ثانیه تغییر داده شد. نمودار تغییرات دما و نقطه شبنم گاز در طول کانال در سرعت‌های مختلف گاز ورودی به ترتیب در شکل‌های 9 و 10 نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل‌های 9 و 10 مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت گاز ورودی، مقدار دما و نقطه شبنم در کلیه نقاط کانال، کاهش می‌یابد زیرا ظرفیت انتقال بخار آب در طول غشاء بستگی به تراوایی غشاء و سطح نفوذ غشاء دارد. از طرف دیگر، سطح مرطوب‌کننده را می‌توان از طریق افزایش طول، افزایش داده و با این کار می‌توان دمای خروجی گاز را حتی در سرعت‌های بالا بهبود بخشید.

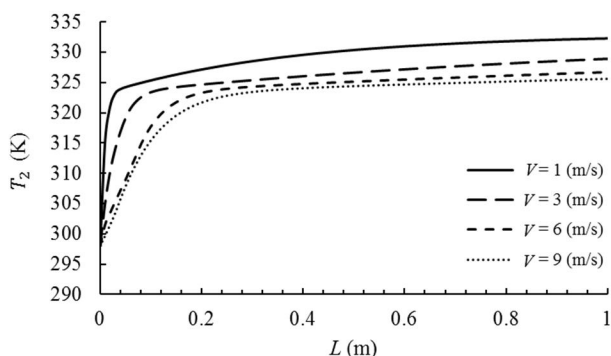


Fig. 9 Graph of gas temperature variations along the channel in different inlet gas velocity

شکل 9 نمودار تغییرات دمای گاز در طول کانال در سرعت‌های مختلف گاز

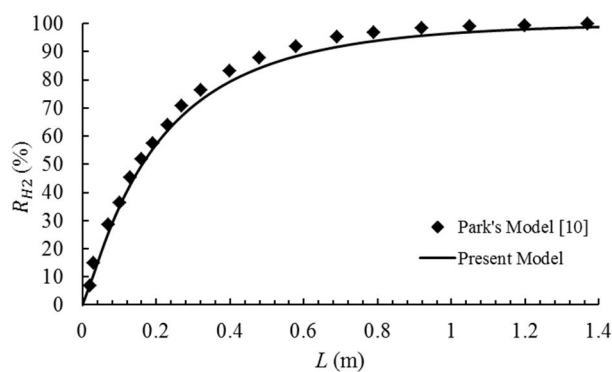


Fig. 6 Graph of gas humidity variations along the channel

شکل 6 نمودار تغییرات رطوبت گاز در طول کانال

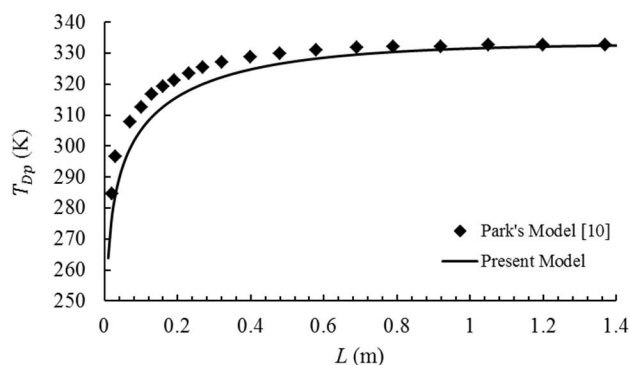


Fig. 7 Graph of dew point variations along the channel

شکل 7 نمودار تغییرات نقطه شبنم در طول کانال

3-2- بررسی تأثیر رطوبت نسبی ورودی بر نقطه شبنم هوای خروجی از مرطوب‌ساز

از آنجا که ممکن است یک سیستم پیل سوختی پلیمری در شرایط محیطی و آب و هوایی مختلفی کار کند، بنابراین این امکان وجود دارد که هوای ورودی به سیستم پیل سوختی، در زمان‌ها و محیط‌های متفاوت، دارای درصد رطوبت‌های مختلفی باشد. بنابراین مجموعه مرطوب‌ساز سیستم پیل سوختی بایستی به گونه‌ای طراحی شده باشد که بتواند فارغ از شرایط محیطی و هوای ورودی به سیستم پیل سوختی، جابجگوی میزان رطوبت مورد نیاز توده پیل سوختی باشد.

برای بررسی تأثیر رطوبت گاز خشک ورودی به مرطوب‌ساز بر نقطه شبنم گاز خروجی، ضمن ثابت نگه داشتن کلیه پارامترهای هندسی و عملکردی مرطوب‌ساز، رطوبت گاز ورودی در محدوده 0 تا 80 درصد تغییر داده شد. روند تغییرات نقطه شبنم گاز در راستای طول لوله در رطوبت‌های نسبی مختلف گاز ورودی به مرطوب‌ساز در شکل 8 نشان داده شده است. همان‌گونه که از این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش رطوبت نسبی گاز ورودی در نقاط ابتدایی کانال، افزایش نقطه شبنم گاز مشاهده می‌شود. هرچند که به طرف انتهای کانال، تأثیر میزان رطوبت نسبی گاز ورودی بر نقطه شبنم گاز خروجی کاهش می‌یابد. بنابراین در صورتی که طول کانال مرطوب‌ساز به اندازه کافی بلند باشد، عملاً میزان رطوبت نسبی گاز ورودی تأثیری بر عملکرد مرطوب‌ساز نخواهد داشت هرچند که این امر باعث افزایش هزینه ساخت مرطوب‌ساز و همچنین افزایش ابعاد و حجم آن خواهد شد.

در شکل 12 مشاهده می‌شود که نقطه شبنم نیز با افزایش سرعت به شدت افت می‌کند. با افزایش سرعت جریان گاز، مدت زمان اقامت گاز در مرطوب‌ساز کاهش پیدا کرده و گاز فرصت کافی برای جذب رطوبت را ندارد.

4-3- بررسی تأثیر تغییر عمق کانال بر رطوبت نسبی گاز خروجی از مرطوب‌ساز

برای بررسی اثر عمق کانال بر روی عملکرد مرطوب‌ساز، ضمن ثابت نگه داشتن کلیه پارامترها، کانال‌هایی با عمق‌های متفاوت در نظر گرفته شده و معادلات برای آنها حل شد. نمودار تغییرات رطوبت نسبی گاز خروجی از مرطوب‌ساز بر حسب عمق کانال در شکل 13 نشان داده شده است. همان‌گونه که از این شکل مشاهده می‌شود، با توجه به فرضیه‌های در نظر گرفته شده در مدل حاضر مبنی بر صرف‌نظر کردن از افت فشار گاز ناشی از حرکت در طول کانال، عمق کانال تأثیری بر عملکرد مرطوب‌ساز ندارد. البته در صورتی که افت فشار گاز به گونه‌ای در توسعه معادلات منظور می‌شد، آنگاه با کم نمودن عمق کانال گاز، افت فشار گاز هنگام عبور از مرطوب‌ساز افزایش یافته و این کاهش فشار ممکن بود بر روی رطوبت نسبی گاز خروجی از مرطوب‌ساز تأثیرگذار باشد. جهت مقایسه نتایج مدل حاضر برای تغییرات رطوبت نسبی با عمق کانال با نتایج حاصل از کار او و پارک [10]، نتایج حاصل از کار او و پارک [10] نیز در شکل 13 نشان داده شده است. همان‌گونه که از این شکل مشاهده می‌شود، تحقیق آنها حاکی از آن است که رطوبت نسبی گاز خروجی تابعی از عمق کانال است که دقیقاً برخلاف نتایج حاصل از تحقیق حاضر است. بررسی بیشتر نتایج آنها نشان داد که در همه حالات با وجود تغییر عمق کانال، سرعت گاز ورودی ثابت در نظر گرفته شده است. افزایش عمق کانال با فرض ثابت نگه داشتن سرعت ورودی باعث افزایش دبی گاز ورودی به کانال شده و در نتیجه همان‌گونه که در بالا اشاره شد، افزایش دبی باعث کاهش رطوبت و نقطه شبنم گاز خروجی می‌شود. به عبارت دیگر، رفتار تغییر رطوبت و نقطه شبنم با تغییر عمق کانال که در مطالعه او و پارک [10] مشاهده شده است، ناشی از تغییر دبی گاز ورودی بوده است. تغییر عمق کانال به تنهایی در حالی که سرعت گاز ورودی به نحوی تغییر یابد که دبی گاز ورودی ثابت باشد، تأثیری بر روی رطوبت و نقطه شبنم گاز خروجی ندارد.

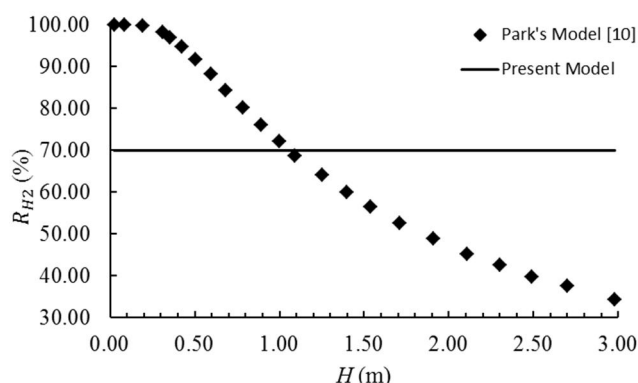


Fig. 13 Graph of relative humidity of the outlet gas versus height of channel

شکل 13 نمودار تغییر رطوبت نسبی خروجی بر حسب عمق کانال

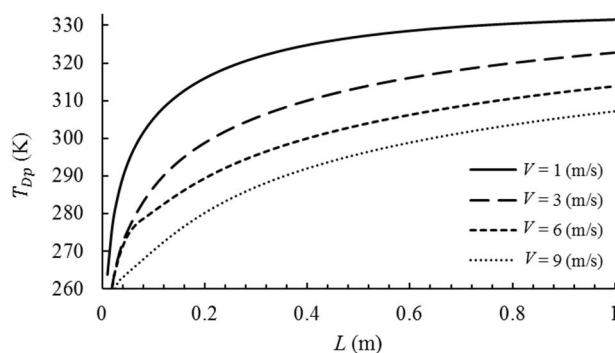


Fig. 10 Graph of dew point variations along the channel in different gas velocities

شکل 10 نمودار تغییرات نقطه شبنم گاز در طول کانال در سرعت‌های مختلف گاز

در سرعت‌های بالاتر، رطوبت نسبی به آرامی افزایش می‌یابد زیرا گاز حامل زمان اقامت کوتاهی داشته و فرصت کافی برای جذب رطوبت ندارد. همچنین از این نمودارها مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت گاز دمای نقطه شبنم گاز کاهش یافته و حتی نرخ افزایش آن در طول کانال هم کاهش می‌یابد. شکل‌های 11 و 12 به منظور بررسی اثر سرعت گاز ورودی به کانال بر روی نقطه شبنم و رطوبت نسبی خروجی ترسیم شده‌اند. همان‌گونه که از این شکل‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت گاز در ورودی به مرطوب‌ساز، رطوبت نسبی گاز خروجی کاهش می‌یابد (شکل 11).

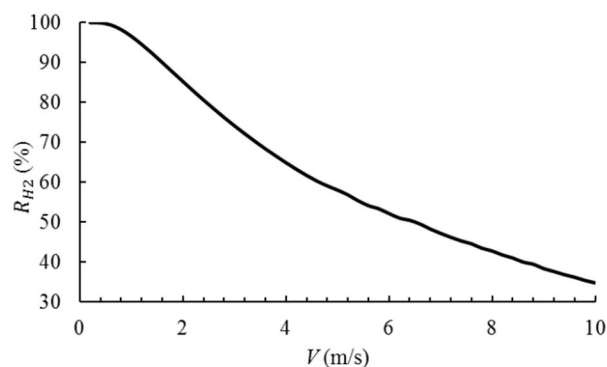


Fig. 11 Graph of relative humidity of the outlet gas versus gas velocity

شکل 11 نمودار تغییرات رطوبت نسبی گاز خروجی بر حسب سرعت گاز

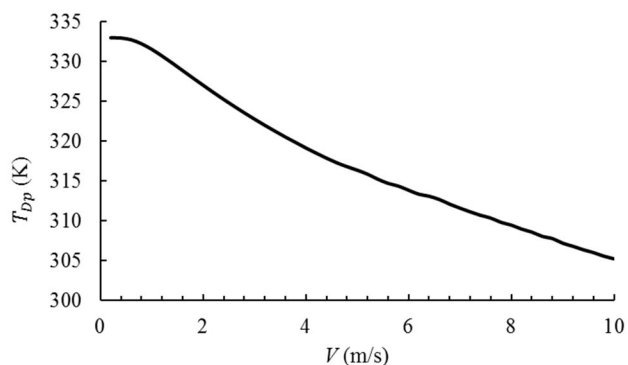


Fig. 12 Graph of dew point of the outlet gas versus gas velocity

شکل 12 نمودار تغییرات نقطه شبنم گاز خروجی بر حسب سرعت گاز

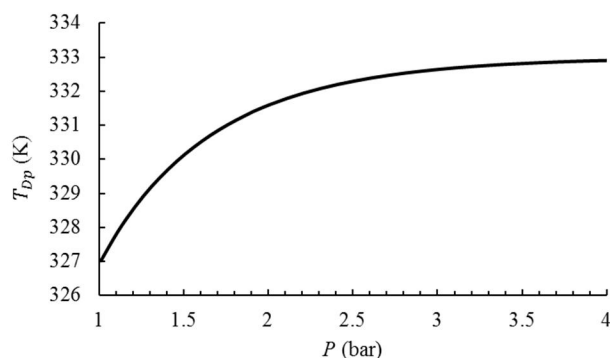


Fig. 14 Graph of dew point of exhaust gas variations versus the inlet gas pressure

شکل 14 نمودار تغییرات نقطه شبنم گاز خروجی بر حسب فشار گاز ورودی

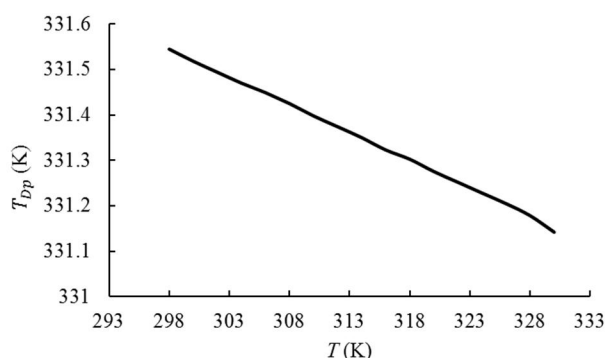


Fig. 15 Variation of dew point of the outlet gas versus the inlet gas temperature

شکل 15 تغییرات نقطه شبنم گاز خروجی بر حسب دمای گاز ورودی

بین نقطه شبنم گازهای خروجی از مرطوب‌ساز که در هنگام ورود به مرطوب‌ساز دماهای مختلفی داشته‌اند، افزایش چشمگیری خواهد داشت.

4- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر با ارائه یک مدل تحلیلی، عملکرد مرطوب‌ساز غشایی آب-گاز مورد استفاده در پیل سوختی بررسی شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد:

- رطوبت نسبی، دمای هوا و نقطه شبنم خروجی با افزایش طول کانال افزایش می‌یابد. نقطه شبنم گاز تا دمای نزدیک به دمای آب ورودی به مرطوب‌ساز افزایش می‌یابد و افزایش بیشتر طول کانال اثری در افزایش نقطه شبنم ندارد.

- در صورتی که طول کانال مرطوب‌ساز به اندازه کافی بلند باشد، عملاً میزان رطوبت نسبی گاز ورودی تأثیری بر عملکرد مرطوب‌ساز نخواهد داشت هرچند که این امر باعث افزایش هزینه ساخت مرطوب‌ساز و همچنین افزایش ابعاد و حجم آن خواهد شد.

- افزایش دبی گاز خشک ورودی سبب کاهش رطوبت نسبی و نقطه شبنم گاز خروجی می‌شود. از این رو استفاده از دبی گاز خشک کمتر، عملکرد بهتر مرطوب‌ساز را در پی دارد.

- با افزایش فشار گاز ورودی به مرطوب‌ساز، رطوبت نسبی و دمای گاز خروجی افزایش پیدا می‌کنند. البته روند تغییرات در فشارهای کم سریع بوده و با افزایش فشار، نرخ تغییرات پارامترهای گاز خروجی کاهش می‌یابد.

3-5- بررسی اثر تغییرات فشار بر روی نقطه شبنم گاز خروجی از مرطوب‌ساز

عملکرد یک توده پیل سوختی با افزایش فشار سمت کاتد و آند ارتقاء پیدا می‌کند. از آنجا که توان مورد نیاز برای راه‌اندازی کمپرسور هوای سمت کاتد از توان تولیدی خود استک پیل سوختی دریافت می‌شود، بنابراین مطلوب است تا حدی که مازاد توان مورد نیاز کمپرسور هوای سمت کاتد برای ایجاد فشار سمت کاتد بر افزایش توان تولیدی استک ناشی از افزایش فشار سمت کاتد غلبه نکرده است، فشار هوای سمت کاتد افزایش یابد. بنابراین ممکن است در یک سیستم پیل سوختی در شرایط مختلف عملکردی، هوا با فشارهای مختلف به یک مرطوب‌ساز وارد شود. بنابراین لازم است که عملکرد مرطوب‌ساز تحت فشارهای مختلف سمت هوا مورد ارزیابی قرار گیرد.

در تحقیق حاضر، جهت بررسی اثر فشار گاز ورودی بر روی نقطه شبنم گاز خروجی از مرطوب‌ساز، با ثابت نگه داشتن کلیه پارامترهای هندسی و فیزیکی و نصف کردن طول کانال در مقایسه با تحلیل‌های قبلی (طول کانال برابر 50 سانتی‌متر در نظر گرفته شد)، فشار گاز ورودی به مرطوب‌ساز در بازه 1 تا 4 بار تغییر داده شد. تغییرات نقطه شبنم گاز خروجی بر حسب فشار گاز ورودی در شکل 14 نشان داده شده است. همان‌گونه که از این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش فشار گاز ورودی، نقطه شبنم گاز خروجی افزایش می‌یابد. البته روند تغییرات در فشارهای کم سریع بوده و با افزایش فشار، روند تغییر پارامترهای فیزیکی گاز خروجی کاهش می‌یابد. دلیل این رفتار در کاهش ظرفیت آب‌گیری گاز با افزایش فشار نهفته است. به عبارت دیگر، با افزایش فشار، گاز جهت رسیدن به سطح خاصی از رطوبت، به میزان آب کمتری نیاز دارد. با توجه به مباحث مطرح شده می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد مرطوب‌ساز با افزایش فشار عملکردی ارتقاء می‌یابد.

3-6- بررسی اثر تغییر دمای ورودی بر روی نقطه شبنم گاز خروجی از مرطوب‌ساز

در بعضی از انواع پیل سوختی که از کمپرسور جهت تامین هوای مورد نیاز سیستم پیل سوختی استفاده می‌شود، به دلیل نسبت فشار ایجاد شده توسط کمپرسور، هوای خروجی از کمپرسور که همان هوای ورودی به مرطوب‌ساز است، گرم شده و دمای آن افزایش می‌یابد. همچنین ممکن است در بعضی از سیستم‌های پیل سوختی، به کمک یک مبدل و با استفاده از گرمای تولیدی توده پیل سوختی، هوای ورودی به مرطوب‌ساز گرم شده و دمای آن افزایش یابد. جهت بررسی اثر دمای گاز ورودی به مرطوب‌ساز بر روی عملکرد مرطوب‌ساز، با ثابت نگه داشتن کلیه پارامترهای هندسی و فیزیکی، دمای گاز ورودی در بازه 298 تا 330 درجه کلون تغییر داده شد. نمودار تغییرات نقطه شبنم گاز خروجی از مرطوب‌ساز بر حسب دمای گاز ورودی در شکل 15 نشان داده شده است. همان‌گونه که از این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش دمای گاز ورودی، کاهش بسیار اندکی در نقطه شبنم گاز خروجی از مرطوب‌ساز مشاهده می‌شود. این کاهش می‌تواند ناشی از این باشد که با افزایش دمای گاز ورودی در حالیکه رطوبت نسبی آن ثابت است، میل به جذب رطوبت گاز افزایش یافته و در نتیجه ممکن است میزان رطوبت عبوری از غشا جابجایی میزان رطوبت مورد نیاز گاز نباشد. البته بایستی در نظر داشت که در تحلیل حاضر، طول کانال به اندازه کافی بزرگ گرفته شده است که بتواند رطوبت کافی را به گازهای ورودی با میل به جذب رطوبت مختلف ناشی از دمای متفاوت ورودی برساند. در صورتی که طول کانال کوتاه‌تر باشد، تفاوت

Dynamic systems, Measurement and Control, Vol. 127, No. 3, pp. 424-432, 2005.

- [8] E. Afshari, N. Baharlou Houreh, An analytic model of membrane humidifier for proton exchange membrane fuel cell. *Energy Equip System*, Vol. 2, No. 1, pp. 83-94, 2014.
- [9] N. Baharlou Houreh, E. Afshari, Three-dimensional CFD modeling of a planar membrane humidifier for PEM fuel cell systems, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, No. 27, pp. 14969-14979, 2014.
- [10] S. Park, I. H. Oh, An analytical model of nafion TM membrane humidifier for proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, Vol. 188, No. 2, pp. 498-501, 2009.
- [11] R. E. Treybal, *Mass transfer operations*, 3rd Edition, pp. 21-27, London: McGraw-Hill, 1980.
- [12] G. J. Van Wylen, R. E. Sonntag, C. Borgnak, *Fundamentals of thermodynamics*, Sixth edition, pp. 480-485, New York: John Wiley and Sons, 2002.
- [13] Y. A. Cengel, M. A. Boles, *Thermodynamics an engineering approach*, Fifth edition, pp. 717-720, Boston: McGraw-Hill College, 2006.
- [14] F. P. Incropera, D. P. Dewett, *Introduction to heat transfer*, 7th edition, pp. 544-555, New York: John Wiley and Sons, 2011.
- [15] F. W. Murray, On the computation of saturation vapor pressure, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 6, No. 1, pp. 203-204, 1967.
- [16] A. Barenbrug, *Psychrometry and psychrometric charts*, 3rd Edition, Cape Town, Cape and transvaal printers Ltd., 1974.
- [17] S. Park, E. A. Cho, I. H. Oh, Characteristics of membrane humidifier for polymer electrolyte membrane fuel cells, *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol. 22, No. 6, pp. 877-881, 2005.

- در صورتی که طول کانال مرطوب‌ساز به اندازه کافی بلند باشد، رطوبت نسبی گاز خروجی تابعیتی از دمای گاز ورودی به مرطوب‌ساز نخواهد داشت.

5- مراجع

- [1] K. Ramya, J. Sreenivas, K. S. Dhathathreyan, Study of a porous brane humidification method in polymer electrolyte fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 22, pp. 14866-14872, 2011.
- [2] J.F. Migliardini, O. Veneri, P. Corbo, Interaction between membranes, *Journal of industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 18, No. 6, pp. 1945-1950, 2012.
- [3] J. Y. Lee, Y. Kim, Y. Jang, L. M. Chef, Effects of external humidification on the performance of a polymer electrolyte fuel cell, *Journal of Mechanical Science Technology*, Vol. 21, No. 12, pp. 2188-2195, 2007.
- [4] M. Ceraolo, C. Miulli, A. Pozio, Modelling static and dynamic behavior of proton exchange membrane fuel cells on the basis of electro-chemical description, *Journal of Power Sources*, Vol. 113, No. 1, pp. 131-144, 2003.
- [5] P. Cave, W. Merida, Water flux in membrane fuel cell humidifiers: flow rate and channel location, effects, *Journal of Power Sources*, Vol. 175, No. 1, pp. 408-418, 2008.
- [6] J. J. Hwang, W. R. Chang, J. K. Kao, W. Wu, Experimental study on performance of a planar membrane humidifier for a proton exchange membrane fuel cell stack, *Journal of Power Sources*, Vol. 215, No. 6, pp. 69-76, 2012.
- [7] D. Chen, H. Peng, A thermodynamic model of membrane humidifiers for PEM fuel cell humidification control, *Journal of*