مقاله

روش‌های مرطوب‌سازی گازهای واکنشگر پیل سوختی غشا پلیمری

ناصر بهارلو هوره*
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
دانشگاه اصفهان
nasser.baharloo@yahoo.com

ابراهیم افشاری
استادیار گروه مهندسی مکانیک
دانشگاه اصفهان
e.afshari@eng.ui.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۹/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۲

چکیده

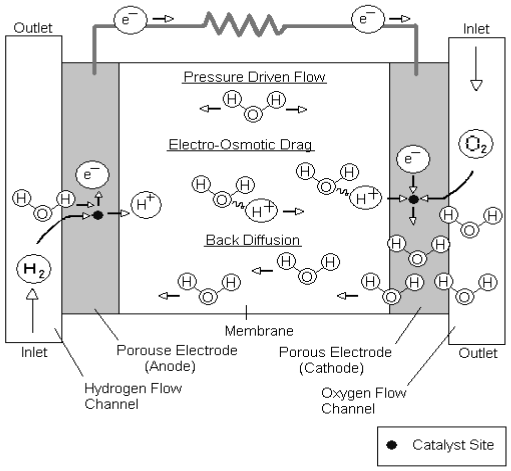
کنترل رطوبت گازهای واکنشگر پیل سوختی تأثیر به‌سزایی در عملکرد پیل دارد. آب کم در غشاء سبب خشکی موضعی غشاء و به‌دنبال آن ایجاد گرادیان‌های دما و تنش‌های مکانیکی و آب زیاد سبب بسته‌شدن بخشی از حفره‌های لایهٔ پخش گاز می‌شود. در هر دو حالت عملکرد پیل افت پیدا می‌کند و از طول عمر آن کم می‌شود. از این‌رو برای دست‌یابی به رطوبت بهینه در پیل، مرطوب‌سازی گازهای واکنشگر هم در سمت آند و هم در سمت کاتد ضروری است. در این مقاله انواع روش‌های مرطوب‌سازی معرفی و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. به‌طور کلی، روش‌های مرطوب‌سازی به دو دستهٔ داخلی و خارجی تقسیم می‌شوند که البته استفاده از مرطوب‌ساز خارجی متداول‌تر است. مرطوب‌سازی خارجی عمدتاً شامل روش‌های حبابی، چرخ آنتالپی و روش غشایی می‌باشد که البته روش آخر به‌دلیل سادگی ساخت و هندسه، مصرف انرژی کمتر، بازده بیشتر و توانایی کنترل بهتر رطوبت و دما، بهترین روش است. استفاده از رطوبت خروجی کاتد پیل برای مرطوب‌سازی به‌صورت یک مجموعه چرخه‌ای و پیکربندی جریان مخالف بهترین عملکرد مرطوب‌ساز غشایی را درپی دارد. نتایج نشان می‌دهد که کاهش دبی و افزایش فشار و دمای ورودی گاز خشک سبب بهبود عملکرد مرطوب‌ساز غشایی است.

واژگان کلیدی: مرطوب‌سازی، پیل سوختی، مرطوب‌ساز غشایی، کنترل رطوبت، مجموعهٔ چرخه‌ای

۱. مقدمه

مدیریت آب نقش مهمی در تعادل عملکرد پیل سوختی دارد. شکل ۱ سه سازوکار انتقال آب در پیل‌های سوختی شامل: انتقال ناشی از درگ الکترو اسمزیک[1]، انتقال ناشی از اختلاف فشار و اختلاف ناشی از پخش برگشتی را نمایش می‌دهد. انتقال آب ناشی از اختلاف فشار بستگی به شرایط کاری پیل دارد و تأثیر آن در انتقال آب اندک است. هنگامی‌که یک پتانسیل الکتریکی در پیل ایجاد می‌شود، مولکول‌های آب توسط درگ الکترو اسمزیک به پروتون‌ها می‌چسبند و آند را ترک می‌کنند. اما پخش برگشتی ناشی از گرادیان غلظت در اثر تولید آب، از کاتد به

آند اتفاق می‌افتد [۱]. اگر پخش برگشتی از کاتد به آند به اندازه‌ای نباشد که بر درگ الکترو اسمزیک غلبه کند، آند می‌تواند کاملاً خشک شود. خشکی موضعی غشاء سبب ایجاد ناحیه‌هایی با مقاومت یونی بالا و پایین در غشاء شود. این پدیده سبب گرادیان‌های جریان در غشاء می‌شود که گرادیان دما در عرض یک صفحهٔ غشاء را درپی دارد و نهایتاً مسئله‌ساز خواهد شد. خشکی موضعی همچنین سبب ایجاد تنش‌های مکانیکی ناشی از انبساط نامنظم غشاء خواهد شد [۲ و ۳].



شکل ۱. سازوکار سه‌گانهٔ انتقال آب در پیل سوختی [۲]

در دانسیتهٔ جریان‌های بزرگ‌تر، اثر درگ الکترو اسمزیک بسیار بیشتر از اثر پخش برگشتی می‌شود و در سمت کاتد بخار آب به‌حالت اشباع می‌رسد و تغییر فاز اتفاق می‌افتد. آب تولیدشده بخشی از حفره‌های لایهٔ پخش گاز را می‌بندد. به این پدیده شناوری می‌گویند. شناوری علاوه بر ایجاد نقصان در عملکرد پیل به‌صورت موقت، در بلندمدت سبب کاهش طول عمر و دوام پیل سوختی می‌شود [۴]. شناوری فقط در کاتد اتفاق نمی‌افتد. در دانسیتهٔ جریان پایین و دمای عملکردی پایین احتمال ایجاد شناوری در آند بیشتر است [۵].

باتوجه آنچه گفته شد، برای دستیابی به عملکرد بالای پیل سوختی، لازم است میزان آب در غشاء کنترل شود. این کار می‌تواند به‌وسیلهٔ مرطوب‌سازی گازهای واکنشگر، قبل از ورود به پیل و تنظیم میزان مرطوب‌سازی، به‌خصوص در سمت آند، انجام شود؛ هرچند مرطوب‌سازی هوا نیز ضروری است تا از خشک‌شدن بخشی از غشاء در نزدیکی ورودی آند جلوگیری شود.

۲. تأثیر مرطوب‌سازی بر عملکرد پیل سوختی

تاکنون تحقیقات متعددی در زمینهٔ تأثیر مرطوب‌سازی بر عملکرد پیل سوختی انجام شده است. رامیا و همکاران [۶] نشان دادند بدون مرطوب‌سازی گازهای واکنشگر، عملکرد پیل بین ۲۰ تا ۴۰ درصد پایین‌تر می‌باشد. لی و همکاران [۷] تأثیر مرطوب‌سازی خارجی در پیل را روی غشاء در سه وضعیت مرطوب‌سازی سمت کاتد، مرطوب‌سازی سمت آند و مرطوب‌سازی توأمان هر دو سمت انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد که بهترین عملکرد پیل در مرطوب‌سازی توأمان هر دو سمت خواهد بود. نتایج ویلیامز و همکاران [۸] نشان می‌دهد عملکرد پیل بدون مرطوب‌سازی کاتد و با اشباع کامل آند، کاهش می‌یابد؛ اما اشباع کامل سمت کاتد نیز همراه با افت عملکرد خصوصاً در دانسیتهٔ جریان‌های بالا همراه خواهد بود. بنابراین رطوبت نسبی سمت کاتد باید بین ۷۵ تا ۹۰ درصد باشد. تأثیر رطوبت نسبی کاتد بر عملکرد پیل سوختی مورد استفاده در خودرو به‌روش دینامیک سیالات محاسباتی[۲] توسط جیون و همکاران [۹] انجام شد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش رطوبت نسبی کاتد توزیع دانسیتهٔ جریان یکنواخت‌تر و عملکرد پیل بهتر می‌شود. رطوبت نسبی کم کاتد سبب افت ولتاژ، مخصوصاً در دانسیتهٔ جریان‌های بالا، می‌شود. اچیان و کیم [۱۰] نشان دادند رطوبت نسبی گاز هیدروژن ۱۰ تا ۱۵ درصد کمتر از مقدار آن برای هوا یا اکسیژن است.

۳. انواع روش‌های مرطوب‌سازی

روش‌های متنوعی برای مرطوب‌سازی گازهای واکنش‌دهندهٔ پیل سوختی غشاء پلیمری وجود دارد که

برخی از آنها هنوز در مراحل مطالعاتی است؛ به‌طوری‌که مدت چندانی از ثبت آنها نمی‌گذرد. به‌طور کلی مرطوب‌سازی به دو روش خارجی و داخلی تقسیم می‌شوند. مرطوب‌سازی داخلی شامل مرطوب‌ساز غشایی یکپارچه با توده، مکمل‌های غشایی[۳]، طراحی میدان جریان مناسب، پاشش و روش اختلاف فشار می‌باشد و مرطوب‌سازی خارجی عمدتاً شامل روش‌های حبابی، چرخ آنتالپی و روش غشایی می‌باشد. تحقیقات نشان می‌دهد بهترین روش مرطوب‌سازی استفاده از مرطوب‌ساز غشایی خارجی می‌باشد.

۳-۱. روش‌های مرطوب‌سازی داخلی

برخی از مزیت‌های مرطوب‌سازی داخلی نسبت به مرطوب‌ساز خارجی عبارت است از:

۱. حجم مجموعهٔ مرطوب‌ساز داخلی کمتر است.

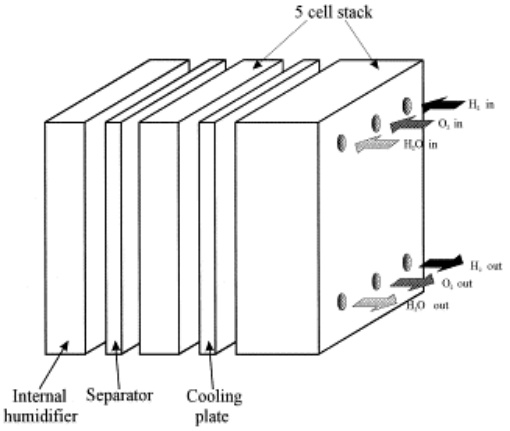
۲. استفاده از مرطوب‌سازی داخلی باعث استفاده از اجزای کمتری در مجموعه می‌شود و کاهش قیمت و تجهیزات را درپی دارد.

۳. مجموعهٔ مرطوب‌سازی داخلی نسبت به مرطوب‌ساز خارجی نیاز کمتری به لوله‌کشی و عایق‌کاری دارد و احتمال نشتی در آن کمتر است. از این‌رو افت فشار و توان پارازیتی کمتری ایجاد می‌شود. به‌علت مصرف بخشی از گرمای تولیدشده توسط بخش مرطوب‌ساز داخلی، گرما کمتر تلف می‌شود.

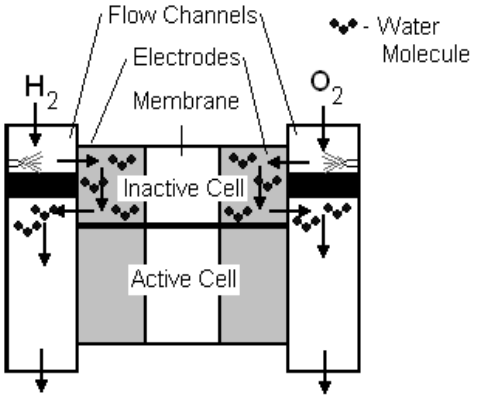
در ادامه روش‌های مرطوب‌سازی داخلی بررسی می‌شود.

۳-۱-۱. مرطوب‌ساز غشایی یکپارچه با توده

ترجیح این است که گازها در دما و فشار عملکردی پیل سوختی مرطوب شوند. در نتیجه بهتر است که بخش فعال تودهٔ پیل با بخش مرطوب‌ساز یکی شود. مرطوب‌ساز یکپارچه با توده عمدتاً شامل دو نوع کلی است. در نوع اول، مرطوب‌ساز در انتهای توده، به پیل متصل می‌شود [۱۱] (شکل ۲) و در نوع دوم با گسترش غشای هر سلول پیل، در کنار هر سلول، یک مرطوب‌ساز ایجاد می‌شود (شکل ۳).



شکل ۲. مرطوب‌ساز غشایی در انتهای تودهٔ پیل [۱۱]



شکل ۳. مرطوب‌ساز غشایی متصل به هر سلول پیل [۲]

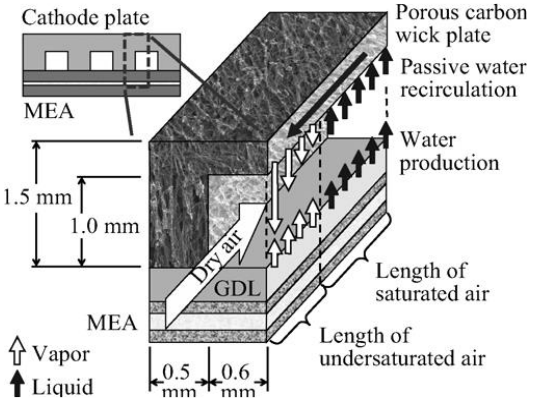
نسبت به بقیهٔ روش‌های مرطوب‌ساز داخلی، این روش پیچیدگی مجموعه و توان پارازیتی را کاهش می‌دهد. به‌دلیل استفاده از غشاء، قیمت افزایش یافته، اما در کل نسبت به بقیهٔ روش‌های مرطوب‌ساز داخلی، کمترین قیمت را دارد. این مجموعه دارای چند عیب است. کاهش آب مجموعهٔ خنک‌کاری، کوپل‌بودن زیاد دماهای مرطوب‌ساز و تودهٔ پیل سوختی، ایجاد افت فشار، محدودبودن نرخ پخش آب به‌داخل گاز خشک و تأثیرپذیری زیاد پخش آب در میان غشاء از دبی گاز، دما و فشار عملکرد پیل، از مهم‌ترین معایب این روش است [۱۲].

۳-۱-۲. مکمل‌های غشایی

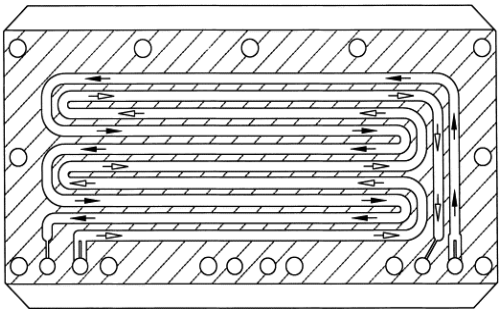
در این روش، برای انجام واکنش بین هیدروژن و اکسیژن و تولید آب در تودهٔ پیل سوختی، ذرات کاتالیستی به غشاء اضافه می‌شود. باید توجه داشت که این واکنش‌ها الکتروشیمیایی نیستند و برای مرطوب نگه‌داشتن غشاء است. در این روش تعادلی دقیق برای توزیع ذرات کاتالیستی (عموماً پلاتینیوم) باید انجام شود تا اطمینان حاصل کنیم که مدار الکتریکی کوتاه تشکیل نشود. به‌علاوه تأثیر مواد کاتالیستی افزوده‌شده بر طول عمر غشاء و دوام آن هنوز مشخص نشده است. مواد کاتالیستی اضافه‌شده، عملکرد پیل سوختی در دانسیتهٔ جریان پایین را بهبود می‌بخشد؛ اما در دانسیتهٔ جریان‌های بالا، این مواد افزودنی احتمال شناوری در سمت کاتد را بالا می‌برند [۱۳]. تحقیقات متعددی دربارهٔ مرطوب‌سازی به این روش انجام شده است. لی و همکاران [۱۴] یک غشای کامپوزیتی پلاتین زیرکنیوم فسفات – نافیون برای خودمرطوب‌سازی پیل سوختی غشاء پلیمری ساختند. نتایج نشان می‌دهد آب تولیدشده در پیل همراه با ذره‌های پلاتین در غشاء نفوذ و جاسازی می‌شود. اضافه‌کردن یک لایهٔ نانولولهٔ کربنی به غشاها، پیل سوختی را قادر خواهد ساخت بدون مرطوب‌سازی کار کند [۱۵]. هان و همکاران نشان دادند که با افزودن سیلیس به لایهٔ کاتالیست عملکرد پیل را وقتی گاز ورودی آند به اندازهٔ کافی مرطوب نیست، بهبود می‌بخشد [۱۶].

۳-۱-۳. طراحی میدان‌های جریان برای توزیع مناسب آب

این روش شامل دو روش کلی است. روش اول استفاده از اسفنج جاذب متخلخل[۴] در صفحات دوقطبی است [۱۷]. در این مجموعه اسفنج جاذب متخلخل امکان خروج آب از نواحی غلظت بالا را فراهم می‌کند. لیتستر و سانتیاگو [۱۸] نشان دادند در نسبت استوکیومتری ۱/۳، پیل سوختی با صفحهٔ متخلخل، ۳/۵ برابر پیل بدون صفحه متخلخل توان تولید می‌کند. مشکل این روش پیچیدگی آب‌بندی و اتصال توده است. روش دوم استفاده از مسیر دوطرفه برای توزیع یکنواخت غلظت آب می‌باشد [۱۹]. شکل ۴ شماتیکی از نوع اول و شکل ۵ شماتیکی از نوع دوم را نشان می‌دهند.



شکل ٤. شماتیکی از پیل سوختی همراه با اسفنج جاذب متخلخل



شکل ۵. شماتیکی از مسیر دوطرفهٔ توزیع گاز در پیل [۱۹]

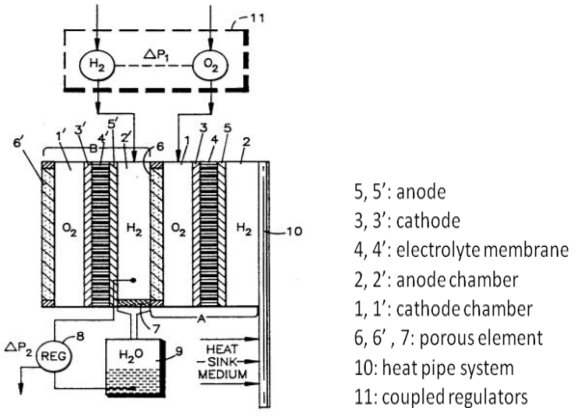
۳-۱-٤. پاشش بخار یا تزریق مستقیم آب مایع

در این روش، ابتدا آب مایع یا بخار آب تا دمای پیل پیش‌گرم، سپس مستقیماً به گازهای واکنشگر تزریق می‌شود [۲۰]. این مجموعه افت‌های پارازیتی ناشی از پمپ‌کردن آب و گرمای مورد نیاز برای آب مایع را به

مجموعه تحمیل می‌کند. پیچیدگی مجموعهٔ افزایش می‌یابد؛ زیرا تجهیزات و دستگاهایی برای تزریق مورد نیاز است. بازده مجموعه پایین بوده و در مجموعه پیل سوختی کمتر مورد توجه قرار گرفته و استفاده شده است.

۳-۱-۵. روش اختلاف فشار

روش دیگر مرطوب نگه‌داشتن سمت آند پیل، نگه‌داشتن اختلاف فشار بین سمت کاتد یک سلول و سمت آند سلول مجاور است. در این روش یک المان متخلخل بین سمت کاتد یک سلول و آند سلول مجاور قرار می‌گیرد و سمت کاتد در فشار بالاتری قرار می‌گیرد؛ به‌طوری‌که آب می‌تواند از سمت کاتد یک سلول به سمت آند سلول مجاور منتقل شود. در این روش پیچیدگی مجموعه زیاد می‌شود و نیاز به تجهیزات اضافی مانند پمپ، شیرها و کمپرسور دارد که قیمت مجموعه را افزایش داده و از توان مجموعه می‌کاهد. شکل ۶ مرطوب‌ساز با روش اختلاف فشار را نشان می‌دهد [۱۳].



شکل ٦. مرطوب‌ساز با روش اختلاف فشار [۱۳]

۳-۲. روش‌های مرطوب‌سازی خارجی

برخی از مزیت‌های مرطوب‌سازی خارجی نسبت به مرطوب‌ساز داخلی عبارت است از:

۱. جداسازی مدیریت آب و حرارت به‌صورت مجزا از یکدیگر در مجموعهٔ مرطوب‌ساز خارجی راحت‌تر است.

۲. وقتی گازهای واکنشگر گرم و در یک مرطوب‌ساز خارجی مرطوب می‌شوند، می‌توان رطوبت نسبی آنها را در یک مقدار مشخص تنظیم کرد و نگه داشت؛ اما نگه‌داشتن رطوبت نسبی در یک مقدار مشخص در مرطوب‌ساز داخلی غیرممکن است.

۳. با استفاده از مرطوب‌ساز داخلی، ابعاد تودهٔ پیل سوختی به‌دلیل اضافه‌شدن بخش مرطوب‌ساز به آن افزایش و در نتیجه مساحت فعال و دانسیتهٔ حجم کاهش می‌یابد. این مشکل در مرطوب‌ساز خارجی وجود ندارد.

در مجموع نمی‌توان روش مرطوب‌سازی داخلی یا خارجی را به‌طور کلی بر دیگری ترجیح داد؛ زیرا بسته به شرایط کاری، هر نوع مرطوب‌ساز کارآیی مناسب خود را دارد؛ ضمن اینکه در برخی موارد از هر دو نوع مرطوب‌ساز به‌صورت مکمل استفاده می‌شود. در ادامه انواع روش‌های مرطوب‌سازی خارجی بررسی شده است.

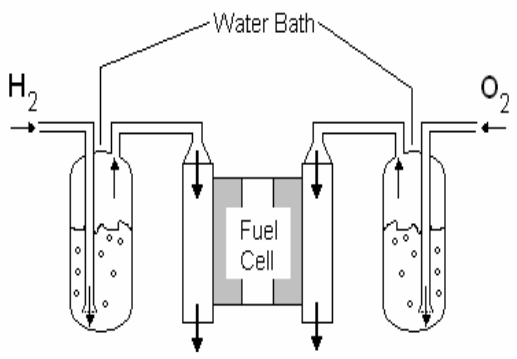
۳-۲-۱. روش حبابی یا نقطهٔ شبنم

در این روش انتقال آب از طریق گرم‌کردن حمام آب تا رسیدن به دمایی که گازهای واکنشگر در میان حمام آب بجوشند اتفاق می‌افتد. با ورود گازها به داخل آب، گازها رطوبت را جذب می‌کنند و مرطوب می‌شوند. مقدار آب انتقال‌یافته به بخار گاز به دمای آب، سطح تماس فصل مشترک آب – هوا و مدت زمان تماس حباب هوا با آب بستگی دارد [۲۱]. در نوع دیگری از این روش، از یک مجموعهٔ گرمایشی برای تبخیر آب و سپس مخلوط‌کردن بخار آب تولیدشده با گاز مورد نظر استفاده می‌شود. این روش کاملاً شناخته شده است، اما به دلائلی غیرعملی است. در بین انواع روش‌های مرطوب‌سازی، این روش دارای حداکثر مصرف انرژی است؛ زیرا در این روش آب از حالت مایع با دمای محیط به بخار آب تبدیل می‌شود. همچنین چون آب مایع موجود در ستون‌ها باید حفظ شود، افت فشار قابل توجه در روش مرطوب‌ساز تبخیری غیرقابل اجتناب است. با این روش در نرخ‌های بالا، کنترل دما و

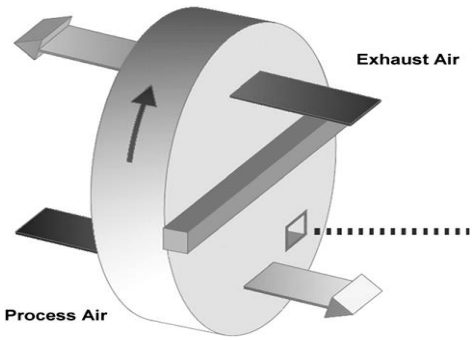
رطوبت مشکل است [۲]. بنابراین این روش معمولاً فقط برای پیل‌های سوختی کوچک و فشار پایین مناسب است و استفاده از این روش در پیل‌های سوختی پلیمری متداول نمی‌باشد. شکل ۷ شماتیکی از مرطوب‌ساز حبابی را نمایش می‌دهد.

۳-۲-۲. چرخ آنتالپی

این روش براساس تبادل حرارت و آب همراه اکسیژن خروجی از پیل با اکسیژن ورودی است که از میان یک محیط نفوذپذیر آب، مانند یک صفحهٔ متخلخل انجام می‌پذیرد. این وسائل اجازهٔ تبادل بین خروجی گرم و اشباع پیل سوختی و اکسیژن ورودی سرد و خشک را می‌دهند. در این روش، یک موتور الکتریکی چرخ سرامیکی دواری را می‌چرخاند تا کار جذب و پخش رطوبت در حضور شیب بخار را انجام دهد. در این حال گرمای نهان و نیز گرمای محسوس بین دو جریان هوا مبادله می‌شود [۲۲]. شکل ۸ شماتیکی از مرطوب‌ساز چرخ آنتالپی را نشان می‌دهد [۲۳]. در این روش رطوبت اکسیژن (یا هوا) به‌وسیلهٔ سرعت دورانی چرخ کنترل می‌شود. با اینکه مرطوب‌ساز چرخ آنتالپی نگرانی در مورد اضافه وزن مجموعه را کاهش می‌دهد، اما افت توان پارازیتی مجموعه بالا و پیچیدگی زیاد مجموعه سبب می‌شود در بسیاری از کاربردها مانند خودرو قابل استفاده نباشد.



شکل ۷. شماتیکی از مرطوب‌ساز حبابی

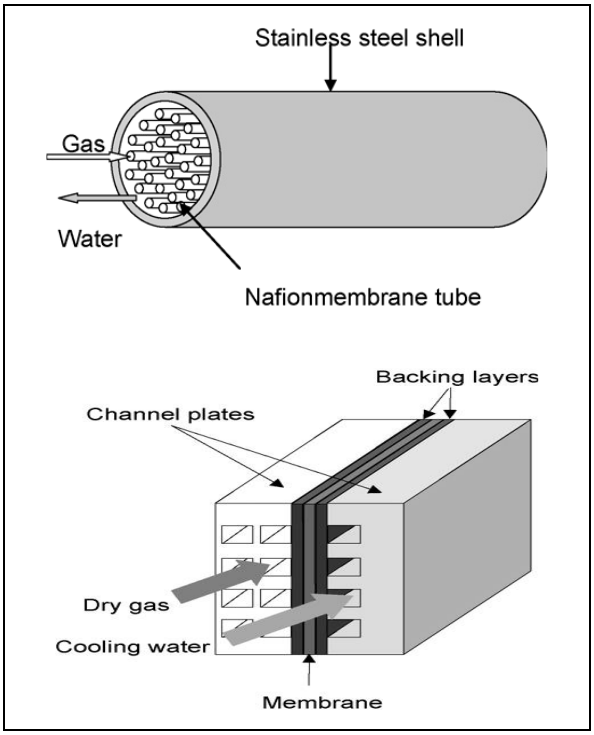


شکل ۸ شماتیک مجموعهٔ مرطوب‌سازی چرخ آنتالپی [۲۳]

۳-۲-۳. روش غشایی

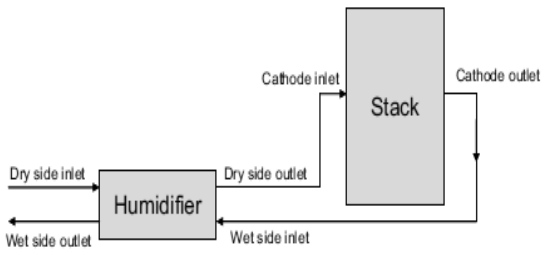
در میان این روش‌ها، استفاده از مرطوب‌ساز غشایی ساده‌ترین و رایج‌ترین روش مرطوب‌سازی بوده و از حداقل مصرف انرژی برخوردار است. پیچیدگی مجموعهٔ پیل سوختی و توان پارازیتی آن را نیز کاهش می‌دهد. در این روش از یک غشاء نیمه‌تراوا استفاده می‌شود. از نظر هندسی دو نوع مرطوب‌ساز غشایی صفحه‌ای و پوسته لوله‌ای وجود دارد. شکل ۹ شماتیکی از این دو نوع مرطوب‌ساز را نمایش می‌دهد [۲۴]. مطابق شکل، گاز مرطوب (یا آب مایع) و سوخت (یا هوا) از طریق کانال‌هایی در دو طرف غشاء جریان می‌یابند. به‌دلیل اختلاف غلظت آب در دو سمت غشاء، آب از طریق پخش، از سمت کانال آب به‌سمت گاز نفوذ می‌کند و با تبخیر در فصل مشترک غشاء / گاز، گاز خشک را مرطوب می‌کند. با استفاده از گرما، آب تولیدی در داخل پیل و یا بخشی از آب خنک‌کاری در مرطوب‌ساز، حجم مجموعهٔ پیل سوختی کاسته می‌شود. در مجموعهٔ مرطوب‌ساز غشایی، افت فشار و افت دما که در مجموعه‌های تبخیر گاز و روش پاشش با استفاده از نازل محسوس است، وجود ندارد. محدودیت این روش این است که میزان رطوبت جذب‌شده توسط گاز، تابع پارامترهای نفوذپذیری غشاء، دما و فشار کاری

مرطوب‌کننده و دبی‌های جریان است. با این‌وجود، روش غشایی همچنان یکی از رایج‌ترین روش‌های مرطوب‌سازی گازهای واکنش‌دهنده در مجموعهٔ پیل سوختی به‌شمار می‌رود. مرطوب‌ساز غشایی پوسته لوله‌ای بسیار شبیه مبدل‌های حرارتی پوسته لوله‌ای است. یک مزیت عمده این نوع مرطوب‌ساز دستیابی به مساحت سطح بالا با وجود افت فشار پایین می‌باشد. عیب عمدهٔ این مجموعه‌ها پیچیدگی ساخت و اتصال و همچنین هزینهٔ بالای تولید غشاهای لوله‌ای است [۲۵]. بهترین نوع مرطوب‌ساز برای استفاده در خودرو با توجه به مزایای ذکرشده مرطوب‌ساز غشایی پوسته لوله‌ای است.



شکل ۹. شماتیکی از دو نوع کلی مرطوب‌ساز غشایی [۲٤]

از نظر فاز ورودی در سمت مرطوب، مرطوب‌سازهای غشایی به دو نوع گاز به گاز و مایع به گاز تقسیم می‌شوند. در مورد اول معمولاً از گاز مرطوب خروجی کاتد پیل به‌عنوان مرطوب‌کننده استفاده می‌شود. در این حالت یک مجموعهٔ چرخه‌ای به‌وجود می‌آید که شماتیکی از آن در شکل ۱۰ ارائه شده است [۲۶]. مجموعهٔ مرطوب‌سازی چرخه‌ای انرژی گرمایی بسیار کمتری برای گرم‌کردن گازهای ورودی مرطوب‌ساز نیاز دارد. چون از انرژی گرمایی گازهای خروجی استفاده می‌کند. از چگالش آب موجود در مرطوب‌ساز جلوگیری می‌شود که این امر سبب جلوگیری از شناوری می‌شود و بدین ترتیب کنترل دمای عملکردی پیل با کنترل دمای مرطوب‌ساز میسر می‌شود [۲۷]. در مرطوب‌ساز مایع به گاز از آب مایع برای مرطوب‌سازی گازهای واکنشگر استفاده می‌شود. استفاده از آب مایع پیچیدگی و وزن اضافه‌ای را به مجموعه تحمیل می‌کند؛ زیرا برای چرخهٔ آب نیاز به مخزن و پمپ است. بنابراین برای کاربردهایی همچون خودرو، که نیاز به وزن کم است، مناسب نیست. چون با تغییر فاز در غشاء اتلاف گرما داریم، باید آب ورودی در دمای بالایی باشد که نیاز به یک وسیلهٔ گرمایش دارد [۲۲].



شکل ۱۰. شماتیکی از مجموعهٔ چرخه‌ای مرطوب‌سازی [۲٦]

سه مدل آرایش جریان در مرطوب‌سازهای غشایی امکان دارد: جریان مخالف، جریان همسو و جریان متقاطع. روش جریان همسو به‌علت انتقال حرارت و رطوبت ضعیف‌تر استفاده نمی‌شود. برخی تحقیقات [۲۴ و ۲۸] از روش جریان مخالف و برخی دیگر [۲۶ و ۲۹] از روش جریان متقاطع استفاده کرده‌اند. ژانگ و همکاران [۳۰] گزارش کردند که پیکربندی با جریان مخالف در یک مرطوب‌ساز افت فشار را به کمترین مقدار می‌رساند.

٤. مطالعات انجام‌شده روی مرطوب‌ساز غشایی

در سال‌های اخیر مقاله‌های متعددی در زمینهٔ بررسی تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی مرطوب‌ساز غشایی انجام

شده است. ساب هاروال و همکاران [۲۶] یک شبیه‌سازی عددی دوبعدی از مرطوب‌ساز صفحه‌ای با جریان مخالف انجام دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد رطوبت نسبی خروجی سمت خشک با افزایش سرعت سمت مرطوب، افزایش فشار و افزایش رطوبت نسبی سمت مرطوب، افزایش می‌یابد. پارک و هوان [۳۱] یک مدل تحلیلی از مرطوب‌ساز غشایی برای پیل سوختی غشاء پلیمری صفحه‌ای مایع به گاز ارائه کردند. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دبی جریان گاز خشک، رطوبت نسبی خروجی کاهش پیدا می‌کند و غشای نازک‌تر سبب انتقال بیشتر رطوبت می‌شود. چون دما در این مدل در کل مرطوب‌ساز ثابت فرض شده است، نتایج آن کاملاً قابل اعتماد نیست؛ زیرا دما مهم‌ترین پارامتر عملکردی در مرطوب‌ساز غشایی می‌باشد و به‌طور مستقیم بر نرخ انتقال گرما، رطوبت نسبی و نرخ انتقال جرم تأثیر می‌گذارد. چن و همکاران [۲۴ و ۳۲] مطالعه‌ای آزمایشگاهی و ارزیابی ترمودینامیکی حالت دائم و گذرا از مرطوب‌ساز ارائه دادند. نتایج نشان می‌دهد نرخ انتقال بخار از غشاء با افزایش دمای هوا و آب ورودی و با کاهش نرخ ورودی هوا افزایش می‌یابد. آنچه در عملکرد مرطوب‌ساز مطلوب است، نزدیک‌شدن شرایط خروجی گاز خشک به شرایط پیل می‌باشد. از این‌رو گاز خروجی از سمت خشک، علاوه بر دارابودن رطوبت نسبی بالا بهتر است از دمای بالایی نیز برخوردار باشد. لذا در تحقیقات وانگ و همکاران [۲۹]، کیو و مریدا [۳۳] و یو و همکاران [۲۸] از معیار نقطهٔ شبنم برای سنجش عملکرد مناسب مرطوب‌ساز استفاده شده است؛ به‌طوری‌که هرچه نقطهٔ شبنم خروجی سمت خشک به نقطهٔ شبنم ورودی سمت مرطوب نزدیک‌تر شود، عملکرد مرطوب‌ساز به حالت آرمانی نزدیک‌تر است. با توجه به تعریف نقطهٔ شبنم، این معیار شامل تأثیر دما و رطوبت نسبی توأماً می‌باشد.

نتایج آزمایشگاهی وانگ و همکاران [۲۹] نشان در نرخ‌های پایین جریان، عملکرد مرطوب‌ساز با دمای خشک ورودی بالاتر بهتر است. کیو و مریدا [۳۳] نشان دادند نقطهٔ شبنم خروجی با کاهش نرخ جریان سمت خشک، افزایش می‌یابد. این در حالی است که نرخ جریان سمت مرطوب تأثیر چندانی بر این دما ندارد. اما نقطهٔ شبنم بالاتر یا رطوبت نسبی بالاتر الزاماً منجر به انتقال رطوبت بیشتر نمی‌شود. نتایج یو و همکاران [۲۸] نشان می‌دهد با افزایش دمای ورودی گاز ورودی به مرطوب‌ساز نقطهٔ شبنم گاز خروجی افزایش و عملکرد بهبود می‌یابد. هویزینگ و همکاران [۳۴] روشی برای طراحی مرطوب‌ساز غشایی صفحه‌ای ارائه کردند. آنها پارامتر بی‌بعدی را معرفی نمودند که ارتباط بین زمان اقامت و زمان نفوذ مولکول‌های آب در کانال‌های مرطوب‌ساز را برقرار می‌کند. افزایش زمان اقامت مولکول‌های آب در کانال‌های مرطوب‌ساز، عملکرد مرطوب ساز را بهبود می‌بخشد. اگرچه افزایش زمان اقامت از یک مقدار معین به بعد کاهش عملکرد را نتیجه می‌دهد. جانگ و همکاران [۳۵] یک مطالعهٔ آزمایشگاهی از مرطوب‌ساز همراه با انجکتور برای مجموعه‌های پیل سوختی خودرو ارائه دادند. آنها نشان دادند با افزایش دمای آب در انجکتور نقطهٔ شبنم افزایش می‌یابد. تحلیل دینامیکی مرطوب‌ساز غشایی پوسته لوله‌ای توسط کانگ و همکاران [۳۶] صورت پذیرفت. نتایج آنها نشان می‌دهد با افزایش جریان، انتقال آب و حرارت افزایش می‌یابد، اما رطوبت نسبی هوای خشک خروجی مرطوب‌ساز کاهش می‌یابد.

۵. جمع‌بندی

در این مقاله، با بررسی ضرورت مرطوب‌سازی گازهای واکنشگر پیل، انواع روش‌های مرطوب‌سازی معرفی و مقایسه شدند. نتایج حاصل بدین شرح می‌باشد:

۱. آب کم در غشاء سبب خشکی آن، افزایش مقاومت یونی و آسیب به غشاء می‌شود و آب زیاد سبب شناوری و پرشدن حفره‌ها از آب و افت عملکرد پیل می‌شود. از این‌رو برای دست‌یابی به رطوبت بهینه در پیل، مرطوب‌سازی گازهای واکنشگر ضروری است.

۲. مرطوب‌سازی هم در سمت آند و هم در سمت کاتد ضروری است و بهتر است گازهای ورودی در رطوبت نسبی ۸۰ تا ۹۰ درصد باشند.

۳. روش‌های مرطوب‌سازی به دو دستهٔ داخلی و خارجی تقسیم می‌شوند که استفاده از مرطوب‌ساز خارجی متداول‌تر است.

۴. از میان انواع روش‌های مرطوب‌سازی، استفاده از مرطوب‌ساز غشایی، به‌دلیل سادگی ساخت و هندسه، مصرف انرژی کمتر و بازده بیشتر و توانایی کنترل بهتر رطوبت و دما، بهترین روش است.

۵. استفاده از رطوبت خروجی کاتد پیل برای مرطوب‌سازی به‌صورت یک مجموعهٔ چرخه‌ای و پیکربندی جریان مخالف بهترین عملکرد مرطوب‌ساز غشایی را نتیجه می‌دهد.

۶. معیار ارزیابی عملکرد مرطوب‌ساز این است که هرچه اختلاف نقطهٔ شبنم ورودی سمت مرطوب و خروجی سمت خشک کمتر باشد، عملکرد مرطوب‌ساز بهتر است. نتایج محققان نشان می‌دهد افزایش دبی گاز خشک، افت عملکرد مرطوب‌ساز را درپی دارد و افزایش فشار و دمای ورودی گاز خشک سبب بهبود عملکرد مرطوب‌ساز است.

۷. تشکر و قدردانی

نویسندگان از حمایت‌های مالی سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) کمال تشکر و قدردانی را دارند.

٦. مآخذ

[1] Um, S., Wang C.Y., "Computational study of water transport in proton exchange membrane fuel cell", *journal of Power Sources*, 156, pp. 211-223, 2006.

[2] Evans, J.P., "Experimental Evaluation of the Effect of Inlet Gas Humidification on Fuel Cell Performance", M.S. Thesis, the Virginia Polytechnic and State University, 2003.

[3] Huizing, R., "Design and Membrane Selection for Gas to Gas Humidifiers for Fuel Cell Applications", M.A. Thesis, University of Waterloo, 2007.

[4] Afshari, E., "and Jazayeri, S.A., "Analyses of heat and water transport interactions in a proton exchange membrane fuel cell", *journal of Power Sources*, 194, pp. 423–432, 2006.

[5] Pasaogullari, U. and Wang, C.Y., "Two-phase transport in polymer electrolyte fuel cells with bi-layer cathode gas diffusion media", *Journal of Electrochemical Society*, 152, pp. A380-A390, 2005.

[6] Ramya, K., Sreenivas, J., and Dhathathreyan, K.S., "Study of a porous membrane humidification method in polymer electrolyte fuel cells", *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(18), pp. 1-7, 2011.

[7] Lee, Y.T., Kim, Y.C., and Jiang, Y.H., "Effects of external humidification on the performance of a polymer electrolyte fuel cell", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 21, pp. 2188-2195, 2007.

[8] Williams, M.V., Kunz, H.R., and Fenton, J.M., "Operation of Nafion(R)-based PEM fuel cells with no external humidification: influence of operating conditions and gas diffusion layers", *Journal of Power Sources*, 135(1-2), pp. 122-134, 2004.

[9] Jeon, D.H., Kim, K.N., Baek, S.M., and Nam, J.H., "The effect of relative humidity of the cathode on the performance and the uniformity of PEM fuel cells", *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, pp. 12499-12511, 2011.

[10] Hyun, D., and Kim, J., "Study of external humidification method in proton exchange membrane fuel cell", *Journal of Power Sources*, 126 (1e2), pp. 98-103, 2004.

[11] Choi, K.H., Park, D.J., Rho, Y.W., Kho, Y.T., and Lee, T.H., "A study of the internal humidification of an integrated PEMFC stack" , *Journal of Power Sources*, 74(1), pp. 146-150, 1998.

[12] Santis, M., Schmid, D., Ruge, M., Freunberger, S., and Büchi, F., "Modular Stack-Internal Air Humidification Concept-Verification in a 1 kW Stack," *Fuel Cells*, 4(3), pp. 214- 218, 2004.

[13] Kwak, S.H., Yang, T.H., Kim,, C.S., and Yoon,, K.H., "The effect of Pt loading in the self-humidifying polymer electrolyte membrane on water uptake*", journal of Power Sources*, 118, pp. 200-204, 2003.

[14] Lee, H.K., Kim, J.I., and Park, J.H., "A study on self-humidifying PEMFC using PteZrPeNafion composite membrane", *Electrochimica Acta*, 50 (23), pp. 761-768, 2004.

[15] Liu, Y., Yi, B., Shao, Z., Wang, L., Xing, D., and Zhang, H., "Pt/CNTs-Nafion reinforced and self-humidifying composite membrane for PEMFC applications," *Journal of Power Sources*, 163(2), pp. 807-813, 2007.

[16] Han, M., Chan, S., and Jiang, S., "Investigation of self-humidifying anode in polymer electrolyte fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(3), pp. 385- 391, 2007.

[17] Ge, S., Li, X., and Hsing, I., "Internally humidified polymer electrolyte fuel cells using water absorbing sponge," Electrochimica Acta, 50(9), pp. 1909-1916, 2005.

[18] Litster, S., and Santiago, J.G., "Dry gas operation of proton exchange membrane fuel cells with parallel channels: Non-porous versus porous plates," *Journal of Power Sources*, 188(1), pp. 82-88, 2009.

[19] Qi, Z. and Kaufman, A., "PEM fuel cell stacks operated under dry-reactant conditions", *Journal of Power Sources* 109(2), pp. 469-476, 2002.

[20] Wood, D.L., Yi, J.S., and Nguyen, T.V., "Effect of direct liquid water injection and interdigitated flow field on the performance of proton exchange membrane fuel cells", *Electrochimica Acta*, 43(24), pp. 3795-3809, 1998.

[21] Thorat, B., Shevade, A., Bhilegaonkar, K., Aglawe, R., Parasu, V.U., Thakre, S., Pandit, A., Sawant, S., and Joshi, J., "Effect of Sparger Design and Height to Diameter Ratio on Fractional Gas Hold-up in Bubble Columns", *Trans. IChemE*, 76, pp. 823-834, 1998.

[22] Dunlavy, A., "Dynamic Modeling of Two-Phase Heat and Vapor Transfer Characteristics in a Gas-to-Gas Membrane Humidifier for Use in Automotive PEM Fuel Cells", M.S. thesis, Auburn University, 2009.

[23] Casalegno, A., Antonellis, S.D., Colombo, L., and Rinaldi, F., "Design of an innovative enthalpy wheel based humidification system for polymer electrolyte fuel cell", *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, pp. 5000-5009, 2011.

[24] Chena, D., Li,, W., Peng, H., "An experimental study and model validation of a membrane humidifier for PEM fuel cell humidification control", *journal of Power Sources*, 180, pp. 461-467, 2008.

[25] Proracki, A., "Predictive Modeling of a PEMFC Cathode Humidifier", M.S. thesis, University of Waterloo, 2010.

[26] Sabharwal, M., Duelk, C., and Bhatia, D., "Two-dimensional modeling of a cross flow plate and frame membrane humidifier for fuel cell applications", *Journal of Membrane Science*, 409– 410, pp. 285– 301, 2012.

[27] Vasua, G.A., Tangiralaa, K., Viswanathana, B., and Dhathathreyanb, K.S., Continuous bubble humidification and control of relative humidity of H2 for a PEMFC system", *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, pp. 4640–4648, 2008.

[28] Yu, S., Im, S., Kim, S., Hwang, J., Lee, Y., Kang, S., and Ahn, K., "A parametric study of the performance of a planar membrane humidifier with a heat and mass exchanger model for design optimization", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, pp. 1344–1351, 2011.

[29] Hwang, J.J., Chang, W.R., Kao, J.K., and Wu, W., "Experimental study on performance of a planar membrane humidifier for a proton exchange membrane fuel cell stacks", *journal of Power Sources*, 215, pp. 69-75, 2012.

[30] Zhang, Y., Brenner, A.M., Gasteiger, H.A., Goebel, S.G., and Skala, G.W., "Membrane humidifier for a fuel cell", US Patent number 7,875,396 B2, 2011.

[31] Park, S. and Oh, I.H., "an analytical model of Nafion membrane humidifier for proton exchange membrane fuel cells", *journal of Power Sources*, 188, pp. 498–501, 2009.

[32] Chen, D., and Peng, H., "A thermodynamic model of membrane humidifiers for PEM fuel cell humidification control", *ASME J. Dyn. Syst. Meas. Control*, 127, pp. 424-432, 2005.

[33] Cave, P., and Merida, W., "Water flux in membrane fuel cell humidifiers: Flow rate and channel location, effects", *journal of Power Sources*, 175, pp. 408–418, 2008.

[34] Huizing, R., Fowler, M., Merida, W., and Dean, J., "Design methodology for membrane-based plate-and-frame fuel cell humidifiers", *journal of Power Sources*, 180, pp. 265–275, 2008.

[35] Jung, S.H., Kim, S.L., Kim, M.S., Park, Y., and Lim, T.W., "Experimental study of gas humidification with injectors for automotive PEM fuel cell systems", *journal of Power Sources*, 170, pp. 324–333, 2007.

[36] Kang, S., Min, K., Yu, S., "Dynamic modeling of a proton exchange membrane fuel cell system with a shell-and-tube gas-to-gas membrane humidifier", *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, pp. 5866-5875, 2012.

پی‌نوشت

1. Electro-osmotic Drag
2. Computational Fluid Dynamics (CFD)
3. Membrane Additives
4. porous absorbent sponges