طراحی مجموعه پیل سوختی بسپار جامد یک کیلووات

محمد کاظمینی (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف

پیل سوختی شامل مجموعه‌ی اجزاء سوخت (هیدروژن)، اکسید کننده (هوا یا اکسیژن خالص)، غشاء الکترود[1] (MEA) و در نهایت کنترل‌کننده‌هاست. در این تحقیق طراحی و ساخت مجموعه‌ی یک پیل سوختی بسپار جامد به ظرفیت یک کیلووات که شامل صفحات دوقطبی، تک‌قطبی، انتهایی، خنک‌کننده و همچنین واشرهای آب‌بندی است دنبال شده است. همچنین محاسبات لازم برای ساخت صفحات فوق در این مقاله ارائه شده است. تعداد شانزده صفحه‌ی دوقطبی به ضخامت ۸mm، دو صفحه‌ی تک‌قطبی به ضخامت ۸mm، دو صفحه‌ی انتهایی به ضخامت ۲cm، هشت صفحه‌ی خنک‌کننده به ضخامت ۱۰mm و چهل و چهار واشر تفلونی به ضخامت ۲mm که تمامی این صفحات به ابعاد $17cm \times 23$ هستند و نیز شیارهایی برای مخلوط یا خنک کردن دارند، طراحی و ساخته شده است. همچنین هفده مجموعه‌ی غشاء الکترود به ضخامت ۲/۲mm نیز طراحی شده است. طول کل این مجموعه ۳۰cm، حجم آن $9720cm^3$ و جرم کل مربوطه ۴۵kg برآورده شده است.

مقدمه

پیل سوختی یک دستگاه الکتروشیمیایی است که در آن هیدروژن و اکسیژن در حضور کاتالیزورهای الکتریکی ترکیب شده و الکتریسته تولید می‌کند. یک پیل سوختی منفرد دارای پتانسیل ۰/۷V برای تولید جریان تقریبی $500mA/cm^2$ است. پیل‌های منفرد در مجموعه‌ها به‌منظور تولید یک ولتاژ مفید (۳۰۰V-۱۰۰) به‌طور سری به یکدیگر متصل می‌شوند. در کاربردهای زمینی، اکسیژن لازم برای واکنش از اتمسفر هوا و هیدروژن مورد نیاز می‌تواند از بسیاری از منابع نظیر گاز طبیعی، زغال سنگ، لجن فعال[2] و یا از طریق برق کافت (الکترولیز) آب با استفاده از انرژی خورشیدی تأمین شوند.

اولین پیل سوختی منفرد در سال ۱۸۴۲ توسط ویلیام گروو اختراع شد، اما پیشرفت این پیل‌ها در دهه‌ی ۱۹۶۰ میلادی بیشترین سیر صعودی را داشته است. از جمله عوامل مهم پیشرفت این فناوری می‌توان به جذابیت جایگزینی آن با باتری‌های متداول، مطرح شدن جایگزینی سوخت‌های فسیلی در خودروها، حذف گازهای آلاینده و اثرات نامطلوب آن بر سلامت انسان و محیط زیست، بی‌نیازی از شارژ این پیل‌ها، از بین نرفتن اجزاء آنها طی مرور زمان و عدم آلودگی صوتی اشاره کرد.

پیل سوختی، نسبت به سیستم‌های تبدیل انرژی موجود، از مزایای بسیاری برخوردار است. این مزایا مقدار آلودگی حاصله و کارایی آنها را شامل می‌شود. یک پیل سوختی فقط الکتریسته، آب و حرارت تولید می‌کند، بنابراین، به‌عنوان یک دستگاه تبدیل انرژی، آلودگی را حذف می‌کند. این امر بر خلاف فناوری تبدیل انرژی موجود است که سهم به‌سزایی در آلوده‌سازی محیط اکثر شهرهای بزرگ دارند. کارایی پیل‌های سوختی ممکن است به ۵۰٪ و حتی بالاتر برسد و این میزان بسیار بالاتر از هر نوع سیستم تبدیل انرژی است که امروزه به‌کار می‌رود.[۱-۵]

پیل‌های سوختی بسپار جامد (SPE)، که به «پیل‌های سوختی با غشاء تبادل پروتون»[3] معروف‌اند. به‌عنوان منبع تولید نیرو در زمینه‌ی حمل و نقل، زیردریایی‌ها و نیروگاه‌های ثابت بسیار جذاب‌اند. این دستگاه‌ها هیچ‌گونه قطعات متحرکی ندارند، کاملاً بی‌صدا هستند، هیچ‌گونه آلودگی تولید نمی‌کنند و بسیار مؤثرند (معمولاً از کارایی بیش از ۵۰٪ برخوردارند) همچنین در شرایط عملیاتی (دما تا ۹۰°C و فشار تا ۶۰۰kPa) معتدل کار کرده و به تغییرات بار بسیار حساس‌اند. بااین وجود، فناوری این نوع پیل سوختی از نظر اعتمادپذیری، کارایی، قابلیت ساخت و قیمت معقول نیاز به پیشرفت و توسعه دارد.

کارایی انرژی و چگالی قدرت بالا برای تجاری کردن پیل‌های سوختی SPE به مفهوم به حداقل رساندن مصرف سوخت، وزن، حجم و هزینه‌های سرمایه گذاری مورد نیاز هستند. کارایی انرژی با چگالی قدرت تقریباً در تضاد است و به‌طور خطی با افزایش قدرت کاهش می‌یابد. کارایی بیشینه در پیل سوختی SPE در قدرت بسیار پایین ایجاد می‌شود. عملاً یک پیل سوختی SPE در هر کارایی پایین‌تر از کارایی بیشینه، معمولاً در حدود ۶۵٪ (براساس ارزش حرارتی پایین‌تر هیدروژن) ممکن است عمل کند. چگالی قدرت حداکثر در پیل سوختی SPE در ولتاژهای ۰/۵ V یا پائین‌تر و یا در

کارایی ۳۳٪ و پائین‌تر حاصل می‌شوند. بنابراین، چگالی قدرت یک مقدار عملی کم خواهد بود، چنان‌که در کارایی ۵۰٪، ولتاژ ۰/۶۴ V است.

کارایی یک پیل سوختی بسپار جامد بستگی به مشخصات طراحی و شرایط عملیات دارد. مشخصات طراحی پیل‌های سوختی SPE عبارتند از: اندازه و شکل الکترود، نوع غشاء و ضخامت آن، خصوصیات الکترود، فشار گازهای آند و کاتد و رطوبت و خلوص گازهای واکنشگر.[۶]

اگر چه اکثر تحقیقات در راستای انجام آزمایشات برروی پیل منفرد صورت گرفته است، اما چنین پیلی به جهت ولتاژ پائین (۱V-۰/۵) ارزش عملی ندارد. برای کاربردهای عملی، یک مجموعه از پیل‌های واحد به‌صورت سری به یکدیگر متصل می‌شوند. تعداد پیل‌های واحد در یک مجموعه توسط ولتاژ مورد نظر تعیین خواهند شد. از طرفی قدرت که حاصل‌ضرب ولتاژ و جریان است، اندازه‌ی پیل واحد را، که با سطح فعال آن ارتباط مستقیم دارد، تعیین می‌کند. فعالیت‌های انجام شده توسط مؤلف در زمینه‌ی مدل‌سازی موازنه‌ی جرم و مدیریت توازن آب در پیل‌های سوختی قلیایی،[۷] و نیز مطالعه‌ی تجربی طول عمر الکترودهای مربوطه در مقیاس آزمایشگاهی، در ارتباط با این نوع پیل‌ها و در قالب ساخت یک پیل واحد[۸و۹] بوده است. مطالعات فوق به‌عنوان قدم اولیه به‌منظور طراحی و ساخت مجموعه‌یی از پیل‌های واحد با ظرفیت بالاتر برای تولید انرژی الکتریکی مورد استفاده قرار گرفته است. اکنون به شرح و طراحی مجموعه‌ی پیل سوختی یک کیلووات می‌پردازیم.

طراحی مجموعه‌ی پیل سوختی

پیل‌های واحد و مجزا به‌نام مجموعه‌ی غشاء ـ الکترود متشکل از غشایی هستند که بین دو الکترود متخلخل ساندویچ شده است. مجموعه‌ی غشاء ـ الکترودها جریان الکتریکی مستقیم[۴] تولید می‌کنند. صفحات دوقطبی[۵] که هادی الکتریکی‌اند، موجب جدا بودن غشاء ـ الکترودها از نظر ورود و خروج سوخت و اکسیدکننده‌ی لازم برای نقاط واکنش در فصل مشترک الکترود غشاء می‌شوند. پیل واحد[۶] در تکمیل مجموعه تکرار می‌شود. یک مجموعه‌ی کامل، شامل چند پیل واحد، ممکن است دارای صفحات خنک کننده باشد که مشابه صفحات دوقطبی طراحی می‌شوند. صفحات خنک‌کننده دمای مجموعه را کنترل می‌کنند.

تعداد پیل‌های واحد (یا MEAها) و سطح فعال آنها ــ سطحی که الکتریسته تولید می‌کند ــ عوامل اساسی در تعیین حداکثر الکتریسیته‌ی تولید شده از یک مجموعه پیل سوختی هستند. تعداد پیل‌ها و میزان جریان حاصله توسط سطح فعال آنها، تعیین کننده‌ی ولتاژ مجموعه است. هر پیل حداکثر ۱V به ولتاژ مجموعه اضافه می‌کند، در حالی‌که بزرگ شدن سطح موجب افزایش حداکثر جریان می‌شود.

به وسیله‌ی سیستم کنترلی، که تنظیم کننده‌ی عملیات کل مجموعه است، مقدار گاز مورد نیاز برای رسیدن یک بار مشخص تا انرژی مورد نیاز به‌منظور برقراری جریان‌های گاز در پیل‌های سوختی تعیین می‌شود. مادول کنترل همچنین مقدار جریان سیال خنک‌کننده برای رساندن مجموعه به دمای مناسب را محاسبه می‌کند.

مقدار گازهای فرایندی لازم و نیز آب تولید شده توسط مجموعه‌ی پیل سوختی با کمک معادلات الکتروشیمیایی واکنش‌ها قابل محاسبه‌اند. براساس قانون فارادی، میزان هیدروژن مصرفی از رابطه‌ی زیر تعیین می‌شود:

$$G_{H_2} = 1/0365 \times 10^{-8} N I \qquad (1)$$

که در آن، G_{H_2} شار جرمی هیدروژن مورد نیاز (بر حسب kg/s)، N تعداد پیل‌های واحد و I جریان (بر حسب آمپر) هستند. همچنین مقدار اکسیژن مورد نیاز از رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

$$G_{O_2} = 8/2992 \times 10^{-8} N I \qquad (2)$$

که در آن، G_{O_2} شار جرمی اکسیژن مورد نیاز (بر حسب kg/s) است. همچنین رابطه‌ی ۳ بین شار مولی هیدروژن، اکسیژن و آب تولید شده برقرار است:

$$-N_{H_2} = -1/2\, N_{O_2} = N_{H_2O} = \frac{NI}{nG} \qquad (3)$$

که در آن، n تعداد الکترون‌های درگیر در واکنش‌های الکتروشیمیایی، N_{H_2} شار مولی هیدروژن (بر حسب g mol/s)، N_{O_2} شار مولی اکسیژن (بر حسب g mol/s) و N_{H_2O} شار مولی آب تولیدی (بر حسب g mol/s) است. در صورت استفاده از هوا به جای اکسیژن، دبی ورودی به‌میزان ۴/۷۶ برابر به‌منظور محاسبه‌ی نیتروژن و گازهای دیگر موجود در هوا افزایش خواهد یافت.

کار انجام شده روی گازها به‌منظور حرکت آنها از مجموعه و فشردن آنها، به کمک معادله‌ی برنولی محاسبه می‌شود:

$$W_P = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g_c} \qquad (4)$$

که در آن، W_p کار پمپ، ΔP تغییر در فشار محیط و ورودی مجموعه، ρ چگالی موضعی گاز، V_1 سرعت گاز در محیط، V_2 سرعت گاز در ورودی مجموعه، و g_c شتاب جاذبه است. بدیهی است برای محاسبه‌ی کار واقعی پمپ، این مقدار باید در کارایی پمپ ضرب شود. برای تعیین دبی سیال خنک‌کننده، حداقل و حداکثر دماهای

مجموعه مورد نیاز است. با اعمال کنترل بر حداکثر و حداقل دما، اگر دما از محدوده‌ی این دو مقدار خارج شود، دبی سیال خنک‌کننده تا یک مقدار استاندارد افزایش یا کاهش می‌یابد.

در مجموع، متغیرهایی که باید اندازه‌گیری شوند عبارت‌اند از: دما، فشار، دبی جریان‌ها، رطوبت هوای ورودی و گازهای واکنشگر، شدت جریان، پتانسیل پیل‌ها و پتانسیل مجموعه.

دمای گازها در جریان گازهای ورودی و خروجی با کمک ترموکوپل سنجیده می‌شود. رطوبت هوای واکنشگر در ورودی توسط رطوبت‌سنج اندازه‌گیری می‌شود. به‌منظور قرائت دما و ولتاژ هر پیل سوراخ‌هایی داخل صفحات دوقطبی برای قرار دادن سنجشگر ایجاد می‌شود. پتانسیل هر پیل از تفاضل پتانسیل پیل و زمین، و پتانسیل کل مجموعه از تفاضل پتانسیل صفحات انتهایی حاصل می‌شود. افت فشار مجموعه نیز با قرار دادن یک انتقال‌دهنده‌ی فشار[7] بین لوله‌های ورودی و خروجی گازهای واکنشگر تعیین می‌شود. اندازه‌گیری مستقیم فشار را نیز می‌توان انجام داد، گرچه ضرورتی ندارد. از طرفی، میزان حرارت تولیدشده در مجموعه‌ی پیل سوختی از رابطه‌ی ۵ قابل محاسبه است:

$$Q_{stack} = (V_{\circ} - V_u)\, N\, I \qquad (۵)$$

که در آن، Q_{stack} حرارت تولید شده برحسب W یا Wh، $V_{\circ}$ ولتاژ استاندارد (۱/۲۳V) و V_u ولتاژ پیل (ولت) است. گازهای واکنشگر ورودی به مجموعه باید برای رسیدن به دمای سیستم گرم شوند. مقدار حرارت لازم برای این گرمایش از رابطه‌ی ۶ تعیین می‌شود:

$$Q_{gas} = G_{gas} C_P \Delta T \qquad (۶)$$

که در آن، Q_{gas} حرارت لازم برای گرمایش گازهای واکنشگر ورودی (W یا Wh)، G_{gas} شار جرمی گازهای واکنشگر (kg/s) و C_p ظرفیت حرارتی گازهای واکنشگر (KJ/Kg°C) است.

مجموعه‌ی پیل سوختی در برگیرنده‌ی تمامی فرایندها و برهمکنش‌هایی است که در داخل مجموعه رخ می‌دهد. به‌منظور گستردگی عملیات، امور متعدد نظیر طراحی مجموعه‌ی قطبش، جریان گازها، انرژی اتلافی، دما، کارایی و خصوصیات ترموفیزیکی لازمه باید به‌صورت جداگانه مطالعه و بررسی شوند.[۸]

طراحی، مشخصات فیزیکی مورد نیاز برای ساخت یک مجموعه را معین می‌کند. اجزا مختلف طراحی شامل اندازه و شکل صفحات دوقطبی و انتهایی، سیستم دریافت گازهای واکنشگر و توزیع آنها، صفحات خنک‌کننده و خصوصیات مواد هر قسمت از مجموعه است. همچنین تعداد MEAها و تعداد و مکان صفحات خنک کننده باید مشخص شوند. در این راستا لازم است گازهای واکنشگر، نوع سیال خنک‌کننده و فشارهای عملیاتی سیستم پیل سوختی نیز منظور شود. علاوه بر این، حجم و جرم مجموعه با استفاده از طراحی‌های اجزا، خواص مواد و نحوه‌ی اتصال قابل محاسبه خواهد بود. شایان ذکر است، حجم و وزن فقط شامل مجموعه‌ی پیل سوختی است و تجهیزات اضافی سیستم را شامل نمی‌شود. در نهایت، کارایی مجموعه با کارایی ترمودینامیکی بیان می‌شود که در تعریف آن، انرژی الکتریکی خالص تولید شده و مقدار انرژی سوخت مورد استفاده برای تولید الکتریسته استفاده شده‌اند. در محاسبه‌ی کارایی ارزش حرارتی بالاتر یا پایین‌تر هیدروژن (به بیان دیگر سوخت پیل) به‌کار می‌رود:

$$\eta_{th} = \frac{\int P_e dt}{HV_{fuel} m_{fuel}} \qquad (۷)$$

که در آن، η_{th} کارایی ترمودینامیکی مجموعه، P_e قدرت خالص تولید شده توسط مجموعه، HV_{fuel} ارزش حرارتی سوخت و m جرم سوخت مصرفی است.

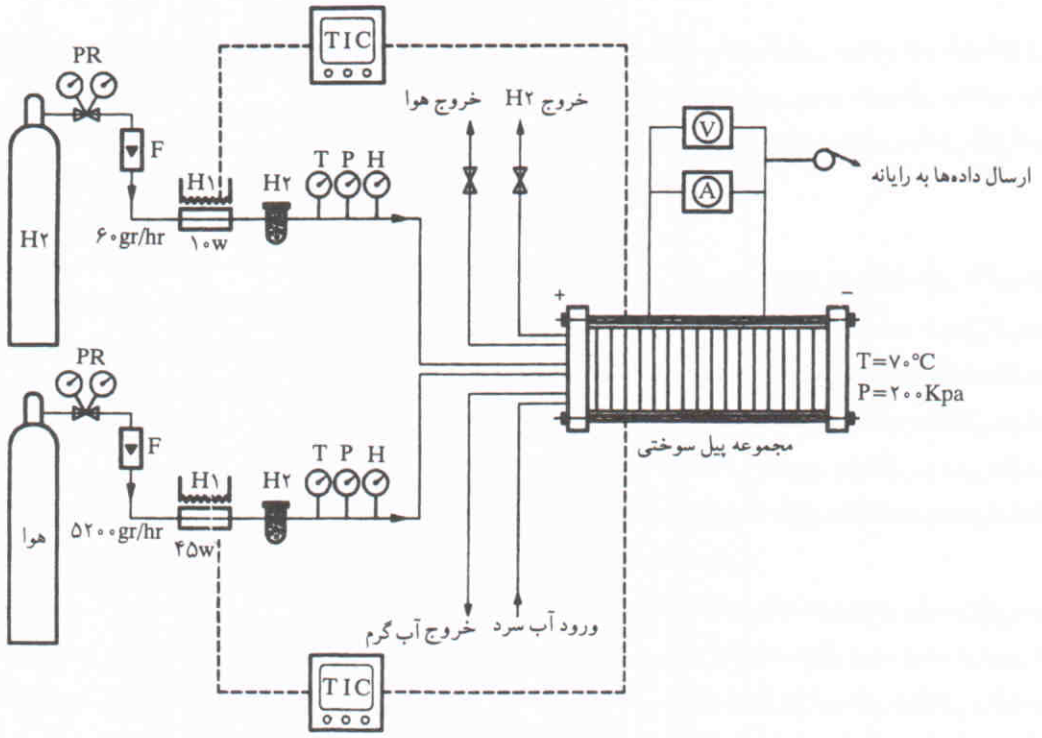
نیمرخ‌های فشار و رطوبت به طراحی صفحات دوقطبی، نحوه‌ی جریان گازها، معادله‌ی گاز ایده‌آل و روابط رطوبت‌سنجی[8] بستگی دارد. این اطلاعات به‌منظور محاسبه‌ی چگالی و سرعت گازها در کانال‌های جریان نیز به‌کار می‌رود. چگالی و سرعت برای محاسبه‌ی افت فشار مورد نیاز هستند. به علت سرعت پایین گازها در کانال‌های جریان، نیمرخ‌های سرعت برای محاسبه‌ی افت فشار، آرام[9] فرض شده‌اند. از نحوه‌ی جریان سیالات و روابط رطوبت‌سنجی نیز به‌منظور محاسبه‌ی میزان رطوبت استفاده شده است.

شکل ۱ نشان‌دهنده‌ی فرایند کلی جریان در مجموعه‌ی پیل سوختی طراحی شده در این تحقیق است، که در دمای ۷۰°C و فشار ۲۰۰Kpa عمل می‌کند.

نتایج تحقیق

مشخصات طراحی سیستم پیل سوختی ۱kW در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. هوا به‌عنوان سیال خنک‌کننده انتخاب شده است. به دلیل رسانا بودن آب و مشکلات آب‌بندی از به‌کارگیری آن اجتناب شد. مجموعه توسط میله‌های اتصال‌دهنده به‌هم فشرده می‌شود. به‌منظور جلوگیری از اتصال کوتاه باید محل اتصال میله‌ها به صفحات انتهایی عایق شود. گازهای واکنشگر ورودی قبل از ورود به سیستم و برای رسیدن به دمای سیستم باید حرارت داده شوند.

نتایج موازنه‌های جرم و انرژی مجموعه‌ی پیل سوختی به



شکل ۱. شمای مجموعه‌ی پیل سوختی طراحی شده؛ A: آمپرمتر، F: دبی سنج، H: رطوبت‌سنج، H۱: گرمکن برقی، H۲: مرطوب کننده گاز، P: فشار سنج، T: دماسنج، PR: تنظیم‌کننده‌ی فشار. (هوای ورودی سه برابر موازنه‌ی جرمی، و ئیدروژن ورودی ۱/۲ برابر موازنه‌ی جرمی است).

جدول ۱. مشخصات طراحی مجموعه‌ی پیل سوختی ۱kW.

پارامترها	شرح	کمیت عددی
عملیاتی:		
	فشار	۲۰۰kPa
	دما	۷۰°C
	رطوبت	۴۵٪ در ورودی به مجموعه
	استوکیومتری	هوا ـ ۳ (اکسیژن ـ ۱/۲)، هیدروژن ـ ۱/۲
طراحی:		
۱ـ مجموعه‌ی الکترود ـ غشاء (MEA)	غشاء	نفیان (Nafion^{R}۱۱۷)
	واکنشگر	پلاتین
	الکترود	کربنی
۲ـ مجموعه:	سطح فعال MEA	۱۹۶cm^{۲}
	نسبت ابعاد[۱۰]	۱
	تعداد پیل‌های واحد	۱۷
	جنس صفحات دوقطبی	فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ ویا گرافیت باتخلخل کم
	جنس صفحات انتهایی	مس یا آلومینیم
	نحوه‌ی جریان	معکوس[۱۱]
	سیال خنک‌کننده	هوا
	فرکانس صفحات خنک‌کننده	۲ پیل واحد/ ۱ صفحه‌ی خنک کننده
	ساختار مجموعه	ستون‌های فشاری[۱۲]
	گذرگاه‌های عبور گاز	داخلی ـ U شکل

جدول ۲. مشخصات اجزاء مختلف مجموعه پیل سوختی ۱kW.

ولتاژ هر پیل واحد	۰/۷۵ V
چگالی جریان	۰/۴ A/Cm^{۲}
چگالی قدرت	۰/۳ W/cm^{۲}
کل جریان	۷۸ A
کارایی	٪۵۱
تعداد صفحات دوقطبی	۱۶ با ابعاد ۱۷cm^{۲} × ۲۳ و ضخامت ۵mm
تعداد صفحات یک‌قطبی	۲ با ابعاد ۱۷cm^{۲} × ۲۳ و ضخامت ۵mm
تعداد صفحات انتهایی	۲ با ابعاد ۱۷cm^{۲} × ۲۳ و ضخامت ۲cm
تعداد صفحات خنک‌کننده	۸ با ابعاد ۱۷cm^{۲} × ۲۳ و ضخامت ۱۰mm
تعداد واشرهای تفلونی برای آب‌بندی	۴۴ با ابعاد ۱۷cm^{۲} × ۲۳ و ضخامت ۲mm
تعداد MEA	۱۷ به‌ضخامت ۲/۲mm
طول مجموعه	۳۰ cm
کل حجم مجموعه	۹۷۲۰ cm^{۳}
کل جرم مجموعه	۴۵ kg
تعداد کانال‌هادر صفحات دوقطبی	۱۸ (به‌طول ۵mm و عمق ۲mm)

جدول ۳. موازنه‌ی جرم و انرژی مجموعه‌ی پیل سوختی ۱kW.

دبی جرمی هیدروژن	۶۰gr/hr
دبی جرمی اکسیژن (اکسیدکننده)	۴۸۰gr/hr
دبی جرمی هوا (اکسیدکننده)	۵۱۵۰gr/hr
دبی جرمی آب تولید شده	۴۵۰gr/hr
دبی حجمی هوای خنک کننده	۵۲۰lit/min
دبی حجمی هیدروژن مصرفی در فشار ۲۰۰Kpa	۶lit/min
دبی حجمی اکسیژن مصرفی در فشار ۲۰۰Kpa	۳lit/min
دبی حجمی هوای مصرفی در فشار ۲۰۰Kpa	۳۳lit/min
حرارت تولید شده در مجموعه	۸۰۰W
حرارت لازم برای گرم کردن هیدروژن مصرفی	۲۵W
حرارت لازم برای گرم کردن اکسیژن مصرفی	۱۵W
حرارت لازم برای گرم کردن هوای مصرفی	۱۵۰W

ظرفیت یک کیلووات در جدول ۳ ارائه شده است. اگر هوا به‌عنوان اکسیدکننده مطرح شود، می‌توان از یک دمنده یا کمپرسور استفاده کرد. از آنجا که نوع پیل سوختی بسپار جامد است و حفظ رطوبت غشا برای هدایت یون‌ها بسیار حائز اهمیت است، گازهای واکنشگر باید قبل از ورود به سیستم مرطوب شوند. از طرفی در کل مجموعه از طریق واکنش‌های الکتروشیمیایی ۴۵۰g/hr آب تولید می‌شود. بنابراین، باید به‌منظور مدیریت آب[13] در سیستم چنان توازنی داشته باشیم تا دچار خشکی غشاء یا طغیان[14] نشویم، زیرا هر دو این عوامل موجب کاهش بازده و افت کارایی خواهند شد. البته کنترل و ایجاد این توازن به علت در دسترس بودن متغیرهای مختلف، شامل دما، فشار، دبی و میزان رطوبت گازهای ورودی، به‌راحتی قابل اعمال است.

نتیجه‌گیری

پیل‌های سوختی یک منبع قدرت خارق‌العاده‌اند، تا آنجا که افزایش روز افزون نیاز به فناوری‌های جدید تبدیل انرژی که با محدودیت‌های شدید زیست‌محیطی مطابقت داشته باشند، پیل‌های‌سوختی را به یکی از موارد جذاب تحقیقاتی مبدل ساخته است. البته، در حال حاضر فناوری پیل‌های سوختی حالت جامد در رابطه با مواد مصرفی مربوطه دارای مشکلات متعددی است که باید از طیّ تحقیقات برطرف شود.

در این نوشتار، طراحی یک مجموعه‌ی پیل سوختی بسپار جامد به ظرفیت اسمی یک کیلووات دنبال شده است. در این خصوص مشخصات فنی سیستم شامل پارامترهای عملیاتی و طراحی برای اجزاء مختلف و همچنین موازنه‌ی جرم و انرژی محاسبه و طی جداول مختلف ارائه شده است.

اگرچه پیل‌های سوختی توسعه‌یافته هنوز تا تبدیل به یک منبع انرژی عملی ـ اقتصادی فاصله دارند، اما نشان داده شده که این دستگاه‌ها دارای امکان توسعه‌ی کاربرد با اهمیت علمی و فناوری بسیاری هستند.

پانوشت

1. Membrane-Electrode Assembly (MEA)
2. biomass
3. Proton Exchange Membrane Fuel Cells, (PEMFC)
4. direct current
5. bipolar plates
6. unit cell
7. pressure transducer
8. psychrometric
9. laminar
10. aspect ratio
11. counter flow
12. compression bolts
13. water mangement
14. flooding

منابع

1. Lee, J.H. and Lalk, T.R., *Journal of Power Sources,* **73,** pp 229-238 (1998).
2. Wilson, M.S. and Gottesfeld, S. *J., Electrochemical Society,* pp 228 **139** (2) (1992).
3. Srinivasan, S., Velev, O.A., Parthasarthy, A., Manko, D.J., and Appleby, A.J., *Proc. NASA Conf.,* Publ. 3125, Los Angeles, U.S.A., pp 101-110 (1991).
4. Murphy, D.J. Lyntech Inc., *Private Cummunication* (1999).
5. Watkins, D.S., *Research Development and Demonestration of Solid Polymer Fuel Cell Systems*, New York, Planum press (1993).
6. Yurum, Y. *Hydrogen Energy Systems, Production and Utilization of Hydrogen and Future Aspects,* Netherlands, Kluwer Academic Publishers (1995).
7. Rowshanzamir, S. and Kazemeini, M. *Int. J. Hydrogen Energy,* **23,** pp 499-506 (1998).
8. کاظمینی، محمد. نهاوندی، لیلا. روشن‌ضمیر، سوسن. وایکانی، محمدحسن. گزارش فنی: «طراحی و ساخت پیل سوختی یک کیلووات»، تهیه شده برای معاونت انرژی وزارت نیرو توسط سازمان انرژیهای نو ایران، (بهمن ۱۳۷۷).
9. Rowshanzamir, S. and Kazemeini, M., *Journal of Power Sources,* **88,** pp 262-268 (2000).