

بررسی تجربی سیستم هیبریدی پیل سوختی/ترموالکترونیک به منظور بازیافت حرارت اتلافی

مصطفی حسنی^۱، نادر رهبر^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علوم و تحقیقات سمنان، سمنان، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

* سمنان، صندوق پستی: ۱۷۹-۳۵۱۴۱، rahbar@semnaniau.ac.ir

چکیده

در این مقاله بازیافت حرارت اتلافی از یک پیل سوختی پلیمری به کمک مولدهای ترموالکترونیک مورد ارزیابی تجربی قرار گرفته است. برای بررسی تجربی یک سیستم آزمایشگاهی متشکل از مبدل حرارتی، ماژولهای ترموالکترونیک و سینک حرارتی به همراه سنسورهای دما ساخته شده و تحت شرایط عملیاتی یک پیل سوختی پلیمری با توان ۵ کیلووات مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج بدست از سیستم آزمایشگاهی نشان می‌دهد که استفاده از مولدهای ترموالکترونیک می‌تواند راهکار مناسبی برای بازیافت حرارت اتلافی از پیل‌های سوختی پلیمری باشد. برای این منظور طراحی بهینه مبدل حرارتی در سمت گرم و سمت سرد ترموالکترونیک بسیار حائز اهمیت می‌باشند.

کلیدواژگان

پیل سوختی پلیمری، بازیافت حرارت، ترموالکترونیک

Experimental Investigation of a Hybrid System of Fuel cell/Thermoelectric for Waste Heat Recovery

Mostafa Hassani¹, Nader Rahbar^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

Abstract

In this article, waste heat recovery from a PEM fuel cell using of thermoelectric generators has been experimentally evaluated. An experimental setup has been constructed which consists of a heat exchanger, thermoelectric modules and heat sink with built-in temperature sensors. The setup is evaluated under operating conditions of a 5 kW PEM fuel cell. The results of the experimental setup shows that use of thermoelectric generators can be a good strategy for the recovery of waste heat from PEM fuel cells. For this purpose, the design of the heat exchanger in the hot and cold side of the thermoelectric are very important.

Keywords

PEM Fuel Cell, Heat Recovery, Thermoelectric module

سوختی کربنات مذاب و پیل سوختی اکسید جامد. در حال حاضر پیل سوختی پلیمری در میان انواع مختلف پیل سوختی به لحاظ فناوری بلوغ بیشتری یافته است. این پیل به دلیل دانسیته جریان بالا و زمان آغاز بکار سریع، به صورت گسترده‌ای در خودروها و کاربردهای مسکونی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین قابلیت استفاده در دستگاه‌های قابل حمل مانند لپ تاپها، گوشی‌های موبایل و ... را دارد [۲].

بازده الکتریکی پیل سوختی پلیمری PEM بین ۴۵ تا ۵۰ درصد و دمای کاری آن ۶۰ - ۶۵ درجه سانتیگراد می‌باشد [۳]. دمای کاری پارامتر مهمی در کارکرد بهینه پیل سوختی است. افزایش دمای کاری بیش از محدوده بهینه، باعث کاهش بازده تئوریک و افت ماکزیمم ولتاژ سل می‌شود. بنابراین مدیریت حرارت پیل سوختی PEM یکی از مهمترین مسائل در کاربرد عملی آن می‌باشد. به عنوان مثال، یک پیل سوختی با توان ۱ kW و بازده الکتریکی ۵۰٪، مقدار ۱ kW حرارت تولید می‌کند که این حرارت باید از استک پیل سوختی دفع شود [۴].

۱- مقدمه

در چند دهه اخیر بازده انرژی و معضلات آلودگی هوا در توسعه سیستمها و فرایندهای صنعتی، از اهمیت بیشتری برخوردار شده است. فناوریهای مبتنی بر سوخت فسیلی عمده‌ترین منبع انتشار گازهای آلاینده هوا مانند CO₂، CO و NO_x هستند. علاوه بر این، عدم قطعیت در مورد ذخایر فسیلی و قیمت‌های رو به رشد نفت، علاقه به استفاده از سوختها و منابع انرژی جایگزین را افزایش داده است. در این میان پیل‌های سوختی توجه بیشتری را به خود جلب کرده‌اند زیرا انتشار آلاینده‌ها در آنها پایین و بازدهی انرژی بالا است [۱].

پیل سوختی یک مبدل انرژی الکتروشیمیایی است که انرژی ذخیره شده در گاز هیدروژن را به جریان مستقیم الکتریسته تبدیل می‌کند [۲]. واکنش الکتروشیمیایی که در پیل سوختی رخ می‌دهد، یک واکنش گرما زا بوده، از این رو علاوه بر الکتریسته مقداری حرارت نیز تولید می‌شود. پیل‌های سوختی بر اساس نوع الکترولیت بکار رفته در آن به ۵ نوع تقسیم‌بندی می‌شوند: پیل سوختی آلکالاینی، پیل سوختی اسید فسفریک، پیل سوختی پلیمری، پیل

با استفاده از مولدهای ترموالکترونیک انجام دادند. مطالعه دیگری نیز بوسیله Maneewan و همکاران [۱۲] انجام شده است. آنها یک بررسی تجربی بر روی تولید برق از یک کلکتور خورشیدی سقفی مجهز به ترموالکترونیک انجام دادند. آنها نشان دادند که این سیستم می‌تواند شدت تابش شبیه‌سازی شده W/m^2 ۸۰۰ مقدار $1 W$ توان الکتریکی تولید کند.

در سال ۲۰۰۳، Ronald Paris و Janes [۱۳]، از کولرهای ترموالکترونیک برای مدیریت حرارت یک پیل سوختی استفاده کردند. در ۲۰۱۰، Min Chen و همکاران [۱۴] یک مدل سه بعدی برای شبیه‌سازی عملکرد تک تک ترموالکترونیکهایی که برای بازیافت حرارت پیل سوختی $1 kW$ بکار برده شده بود ارائه کردند. X.Chen و همکاران [۱۵] نیز عملکرد یک سیستم هیبریدی پیل سوختی / ترموالکترونیک را بررسی کردند. مدل سیستم هیبریدی آنها متشکل از یک پیل سوختی اکسید جامد، بازیاب و ماژولهای ترموالکترونیک بود. آنها رابطه‌ای را بین دانسیته جریان پیل سوختی و جریان بدون بعد ماژولهای ترموالکترونیک ارائه کردند. Rosendhal و همکاران [۱۶] نیز یک سیستم هیبریدی شامل یک پیل سوختی اکسید جامد و ماژولهای ترموالکترونیک را مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند که توان الکتریکی خروجی از $945 W$ در سیستم تنها تا $1085 W$ در سیستم هیبریدی افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۱۱، Chen و همکاران [۱۷] یک مدل جدید از سیستم هیبریدی پیل سوختی PEM، بازیاب و ماژولهای ترموالکترونیک را بررسی کردند. آنها پارامترهای اصلی سیستم هیبریدی را ارزیابی کرده و رابطه‌ای بین دانسیته جریان پیل سوختی و جریان بدون بعد مولدهای ترموالکترونیک ارائه کردند. Xin Gao و همکاران [۱۸] به کمک ماژولهای ترموالکترونیک مشکل Start-up و کنترل شار حرارتی در رفرم‌های متانولی را در پیل‌های سوختی پلیمری دما بالا مورد بررسی و تحقیق قرار دادند. در مطالعه دیگری [۱۹]، آنها یک مدل عددی مولدهای ترموالکترونیک به همراه مبدل حرارتی صفحه فین دار فشرده را برای بازیافت حرارت خروجی از یک پیل سوختی دما بالا ارائه کردند.

طبق تاریخچه موضوع که در بالا عنوان شد، علیرغم مزیت‌های منحصر بفرد مولدهای ترموالکترونیک، مطالعات خیلی کمی در زمینه کاربرد آنها در بازیافت حرارت از پیل‌های سوختی PEM انجام شده است. بنابراین لازم است تا بررسی بیشتری در مورد کاربرد مولدهای ترموالکترونیک برای بازیافت حرارت از پیل‌های سوختی PEM انجام شود. با بازیافت حرارت اتلافی و تبدیل آن به الکتریسیته، بازده الکتریکی پیل سوختی افزایش خواهد یافت. بنابراین توان اضافی تولید شده از سیستم بازیافت حرارت ترموالکترونیک می‌تواند برای تأمین بارهای داخلی سیستم پیل سوختی مانند تجهیزات ابزار دقیق، دمنده‌ها، پمپ‌ها، شیرهای سلونوئید و ... بکار رود. مزیت این روش در این است که دیگر نیازی به تبدیل جریان DC به AC نیست و از تلفات اینورتر اجتناب می‌شود.

در این مقاله یک مطالعه تجربی برای بررسی عملکرد سیستم بازیافت حرارت از پیل سوختی پلیمری به توان $5 kW$ بوسیله مولدهای ترموالکترونیک ارائه می‌شود. در این تحقیق یک سیستم آزمایشگاهی برای تولید الکتریسیته از حرارت اتلافی پیل سوختی ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. همچنین، نتایج تست‌های آزمایشگاهی را مورد بحث و بررسی قرار داده و پتانسیل استفاده از مولدهای ترموالکترونیک برای بازیافت حرارت پیل سوختی پلیمری را ارزیابی خواهیم کرد.

۲- پیشینه تئوری

امروزه استفاده از گرمای اتلافی سیستمها و فرایندها یکی از اصلی‌ترین استراتژیها برای بهبود بازده و صرفه‌جویی در مصرف انرژی است. به عنوان مثال، گرمای اتلافی از موتورهای گازسوز یا توربینهای گاز می‌تواند برای تولید آب یا بخار داغ جهت گرمایش فرایندی یا گرمایش فضا مورد استفاده قرار گیرد. در مورد پیل سوختی نیز این امکان وجود دارد که از گرمای اتلافی برای کاربردهای مشابه استفاده شود. در برخی از انواع پیل سوختی مانند پیل‌های سوختی اکسید جامد، دمای کاری به اندازه‌ای بالا است که می‌توان از آن برای گرمایش یا تولید الکتریسیته استفاده کرد. به عنوان نمونه عملکرد دو سیستم هیبریدی شامل یک توربین گاز و یک پیل سوختی اکسید جامد توسط Granovskii و همکاران [۵] مورد بررسی قرار گرفته است. آنها نشان دادند که با این کار مصرف گاز طبیعی پیل سوختی اکسید جامد تا 20% کاهش می‌یابد. با این حال علیرغم اینکه عملکرد پیل‌های سوختی PEM به خوبی در کاربردهای مسکونی و خودرویی مقبولیت یافته [۲، ۶، ۷]، ولی استفاده از حرارت اتلافی آن برای تولید الکتریسیته به ندرت مورد توجه قرار گرفته است.

هر چند بیش از نیمی از انرژی ورودی به پیل سوختی PEM به حرارت تبدیل می‌شود، ولی تحقیقات اندکی برای بازیافت این گرمای اتلافی صورت گرفته است. Gliucci و همکاران [۸] یک سیستم تولید همزمان CHP خانگی مبتنی بر پیل سوختی PEM را مورد بررسی تجربی قرار داده‌اند. نتایج آنها نشان می‌دهد که مصرف انرژی اولیه در سیستم CHP در مقایسه با تولید جداگانه برق و حرارت تا 10% کاهش می‌یابد. شعبانی و اندروز [۹] نیز یک سیستم CHP بر پایه پیل سوختی PEM را به صورت تجربی در یک سیستم تأمین برق هیدروژن خورشیدی در مناطق دور از شبکه مورد ارزیابی قرار دادند. آنها عملکرد یک پیل سوختی PEM با توان $500 W$ را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که بازده کلی سیستم به حدود 72% می‌رسد در حالی که بازده سیستم فقط در حالت تولید برق تنها 35 تا 50% است. در همین زمینه بررسی دیگری توسط Hwang و همکاران [۱۰] در مورد بازیافت حرارت از یک پیل سوختی بوسیله یک واحد بازیافت حرارت انجام شده است. آنها نشان دادند که بازده کلی سیستم بر مبنای ارزش حرارتی حد پایین هیدروژن، 82% است.

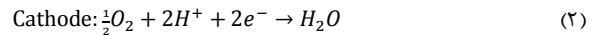
مواردی که در بالا عنوان شد، مربوط به استفاده گرمایشی از حرارت اتلافی در پیل سوختی بود. حال مسئله این است که آیا می‌توان از حرارت اتلافی برای تولید مستقیم الکتریسیته استفاده کرد؟

در سالهای اخیر پیشرفتهای صورت گرفته در زمینه مواد نیمه هادی باعث استفاده گسترده ماژولهای ترموالکترونیک برای بازیافت حرارت اتلافی شده است. ماژولهای ترموالکترونیک قادرند دما را به جریان DC و بالعکس تبدیل کنند. این ماژولها به دو گروه، کولرهای ترموالکترونیک (TEC) و مولدهای ترموالکترونیک (TEG) طبقه بندی می‌شوند. ماژولهای ترموالکترونیک (TM) مزایای بسیاری از جمله قابلیت اطمینان بالا، عدم وجود قطعه متحرک، دوستاند محیط زیست، مدولار بودن و طول عمر بسیار طولانی دارند. همچنین آنها می‌توانند حرارت‌های با دمای پایین را به الکتریسیته تبدیل کنند. در واقع وقتی حرارت اتلافی توسط هیچ موتور حرارتی قابل بازیافت نباشد، بهترین گزینه استفاده از مولدهای ترموالکترونیک است.

مطالعات متعددی در زمینه بازیافت حرارت اتلافی بوسیله مولدهای ترموالکترونیک انجام شده است. Sandu و همکاران [۱۱] یک مطالعه تجربی را در مورد بازیافت حرارت از گازهای خروجی و سطوح آگروز یک موتور دیزل

۱-۲- پیل سوختی غشاء پلیمری (PEM) و مسائل حرارتی آن

همانطور که گفته شد، پیل سوختی یک وسیله الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی ذخیره شده در گاز هیدروژن را به توان الکتریکی و نیز حرارت و آب به عنوان محصولات جانبی واکنشهای داخلی تبدیل می‌کند. واکنشهای پایه که در یک پیل سوختی پلیمری رخ می‌دهد به صورت زیر است [۲، ۳، ۲۰]:



و واکنش کلی برابر است با:



تلفات مانند تلفات اکتیواسیون، غلظتی و اهمیک در سل اتفاق می‌افتد، ولتاژ واقعی سل، V_c کمتر از مقدار $1.25 V$ است.

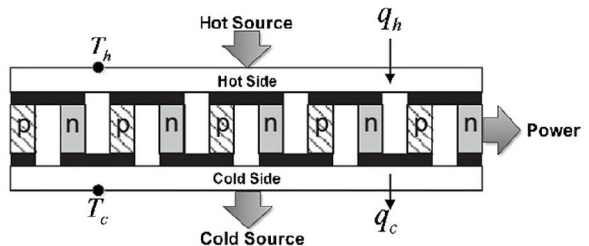
این گرمای تولید شده باید از استک خارج شود. معمولاً مقداری از این حرارت از طریق هدایت دیواره‌ها و تابش از سطوح استک به محیط اطراف دفع می‌شود. مقداری نیز به همراه محصول واکنش (بخار آب) از سمت کاتد خارج می‌شود. اما سهم عمده‌ای از این حرارت می‌بایست بوسیله جریان یک سیال خنک کننده (معمولاً آب) در داخل استک خارج شود. این بخش از حرارت برای بازیافت و تبدیل به انرژی مفید مناسب است. دبی جریان آب مورد نیاز برای آب خنک کن، از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{m} = \frac{Q}{c_p \Delta T} \quad (6)$$

که \dot{m} دبی آب خنک کن، c_p ظرفیت گرمایی ویژه آب و ΔT اختلاف دمای ورودی و خروجی آب خنک کن است. در عمل اختلاف دما یک پارامتر مهم در عملکرد بهینه استک می‌باشد. مقدار این اختلاف دما معمولاً بین ۵ تا ۱۰ درجه است [۲۲].

۲-۲- فناوری ترموالکتريک

ماژول ترموالکتريک یک وسیله نیمه هادی است که می‌تواند از یک اختلاف دما، جریان الکتریسیته تولید کند. پیکربندی یک ماژول ترموالکتريک معمولاً متشکل از تعدادی ترموکوپل (نیمه هادی) است که از نظر الکتریکی به صورت سری و از نظر حرارتی به صورت موازی به یکدیگر متصل شده‌اند (شکل ۲). ماژولهای ترموالکتريک قابل اطمینان بوده، هیچ قطعه متحرکی ندارند و در سایز و ابعاد، کاملاً انعطاف پذیر بوده، ولی بازده تبدیل انرژی پایینی دارند. با این حال در جایی که قابلیت اطمینان تأمین الکتریسیته مهم باشد، مولدهای ترموالکتريک بهترین انتخاب هستند.



شکل ۲ دیاگرام شماتیک مولد ترموالکتريک

توان تولید شده بوسیله یک مولد ترموالکتريک را از معادله زیر می‌توان بدست آورد [۸]:

$$P_{TEG} = q_h - q_c \quad (7)$$

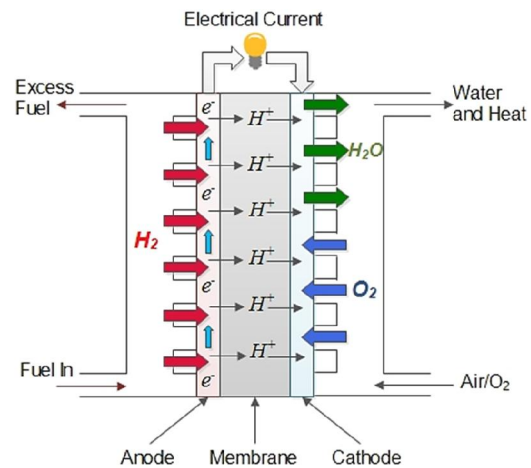
که در این رابطه، q_c و q_h به ترتیب نرخ انتقال حرارت در سمت سرد و گرم ماژول است که با معادلات زیر بیان می‌شوند [۲۳]:

$$q_h = \alpha I T_h + K_{TEG} (T_h - T_c) - 0.5 R_{TEG} I^2 \quad (8)$$

$$q_c = \alpha I T_c + K_{TEG} (T_h - T_c) + 0.5 R_{TEG} I^2 \quad (9)$$

در این معادلات α ضریب سی‌یک ($\mu V/K$)، K_{TEG} هدایت حرارتی (K/W) و R_{TEG} مقاومت الکتریکی (Ω) ماژول ترموالکتريک، I جریان خروجی از ماژول، و T_c و T_h به ترتیب دمای سمت گرم و سمت سرد ماژول است. ضریب سی‌یک مهمترین پارامتر مولد ترموالکتريک است که می‌توان آن را در رابطه بین V_{oc} و ΔT مشاهده نمود [۲۳]:

$$V_{oc} = \alpha \Delta T_{TEG} \quad (10)$$



شکل ۱ نحوه عملکرد یک پیل سوختی پلیمری

واکنشی که در سمت کاتد رخ می‌دهد، واکنش تشکیل آب، یک واکنش گرمازا است و علاوه بر آب مقداری حرارت نیز تولید می‌شود. گرمای تولید شده در استک پیل سوختی، باعث افزایش دمای کاری آن می‌شود. این مسئله باعث می‌شود هدایت یونی غشاء پلیمری برای عبور پروتونها کاهش یابد. برای عملکرد پایدار سل، گرمای تولید شده باید از استک خارج شده و دفع گردد. از سوی دیگر دمای کاری پایین استک نیز مشکلاتی را در سمت کاتد سل ایجاد می‌کند. در دماهای کمتر از ۵۵-۶۰ درجه سانتیگراد امکان کندانس بخارات آب وجود دارد. قطرات آب تشکیل شده باعث انسداد کانالهای عبور گاز در صفحات دوقطبی استک می‌شوند. این پدیده به پدیده غرقابی موسوم است [۲].

کل انرژی سوخت ورودی (هیدروژن)، به الکتریسیته و حرارت تبدیل می‌شود [۲]:

$$\text{Fuel energy } (H_2) = \text{Heat} + \text{Electricity} \quad (4)$$

با توجه به این واقعیت که بازده الکتریکی پیل سوختی PEM برابر ۴۵-۵۰٪ است بنابراین بیش از نیمی از انرژی ورودی به حرارت تبدیل می‌شود. از این رو نرخ گرمایش یک پارامتر مهم در مدیریت حرارت پیل سوختی است. گرمای تولید شده با معادله زیر محاسبه می‌شود [۲، ۳]:

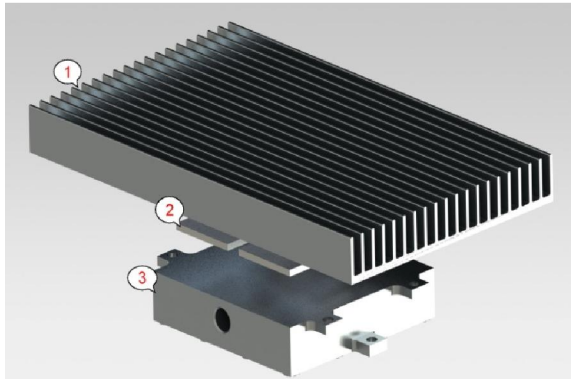
$$Q = P_{FC} \left(\frac{1.25}{V_c} - 1 \right) \quad (5)$$

که در آن Q نرخ گرمایش (W)، P_{FC} توان الکتریکی پیل سوختی (W)، V_c ولتاژ واقعی تک سل (V) و 1.25 ولتاژ تئوری تک سل است. اما چون مقداری

عملکردی یک پیل سوختی ۵ کیلووات پلیمری که در مرکز تحقیقات اصفهان ساخته شده (به سفارش سازمان انرژیهای نو ایران) مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است.



(الف)



(ب)

شکل ۴ الف) سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده برای بررسی بازیافت حرارت از پیل سوختی؛ ۱) THRS، ۲) دیتا لاگر، ۳) سیستم پیل سوختی ۵ کیلووات، ب) نمای انفجاری سیستم THRS؛ ۱) هیت سینک فیندارف ۲) مازولهای ترموالکترونیک ۳) مبدل حرارتی

ماژولهای ترموالکترونیک بین مبدل حرارتی و سینک حرارتی قرار گرفته‌اند. برای اینکه مقاومت تماسی بین سطوح کمتر شود، از یک گریس حرارتی بر روی سطوح تماس استفاده شده است. بوسیله ۵ سنسور دمای PT100 دمای ورودی و خروجی آب، سمت سرد و گرم ترموالکترونیک و محیط اندازه‌گیری می‌شود. تمامی اطلاعات بوسیله یک دستگاه دیتالاگر مدل Combilog+ 1020 (محصول شرکت Fredrich & Theodor) قرائت و ثبت می‌شود. مشخصات قطعات مختلف سیستم آزمایشگاهی در جدول ۱ فهرست شده است.

در این تحقیق برای ارزیابی امکان‌پذیری بازیافت حرارت از پیل سوختی، یک سیستم بازیافت حرارت مبتنی بر مولدهای ترموالکترونیک در مقیاس کوچکتر نسبت به سیستم بازیافت حرارت واقعی ساخته شده است. دلیل اصلی انتخاب یک سیستم آزمایشگاهی کوچک برای ارزیابی مقدماتی، اجتناب از خطاهای ناشی از بزرگ بودن ابعاد دستگاه و احتمالاً عدم توانایی در کنترل پارامترهای مؤثر در نتایج آزمایش بوده است. از این رو دبی آب خنک کن که در مبدل حرارتی به گردش در می‌آید بر روی 5 lit/min تنظیم شده است که حدوداً ۲۳٪ دبی آب خنک کن پیل سوختی مورد مطالعه است. شکل ۵ مسیره‌های جریان داخل مبدل حرارتی را نشان می‌دهد. مسیره‌های جریان به

بنابراین ضریب سی‌یک معادل است با شیب نمودار خطی بین V_{oc} و ΔT . متاسفانه بازده تبدیل انرژی مولدهای ترموالکترونیک پایین و در حد ۲-۳٪ است. بازده تبدیل انرژی از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۳].

$$\eta = \frac{P_{TEG}}{q_h} \quad (11)$$

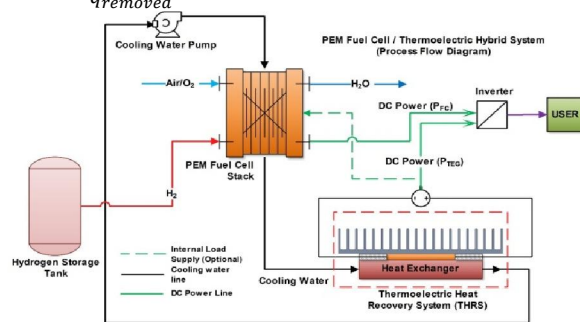
همانطور که قبلاً ذکر شد مازولهای ترموالکترونیک را می‌توان به عنوان کولر یا مولد بکار برد. معمولاً جنس مواد نیمه هادی و در نتیجه پارامترهای داخلی مازولها در دو نوع ذکر شده متفاوت است. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که در دماهای کمتر از ۵۰۰ کلوین استفاده از کولرهای ترموالکترونیک برای تولید الکتریسیته بهتر از استفاده از مولد ترموالکترونیک است [۲۴، ۲۵].

۳-۲- سیستم هیبریدی پیل سوختی / مولد ترموالکترونیک

در شکل ۳ دیاگرام سیستم هیبریدی پیل سوختی / مولد ترموالکترونیک نشان داده شده است. این سیستم متشکل از یک پیل سوختی PEM و یک سیستم بازیافت حرارت ترموالکترونیک (THRS) است. آبی که برای خنک کردن استک پیل سوختی بکار می‌رود وارد سیستم بازیافت حرارت شده و ۵ تا ۱۰ درجه خنک می‌شود. در سیستم THRS آب در داخل یک مبدل حرارتی به گردش در می‌آید و حرارت آن به تعدادی مولد ترموالکترونیک منتقل می‌شود. بدین ترتیب از گرمای اتلافی استک پیل سوختی توان الکتریکی تولید می‌شود. در حالت کلی، با این روش سیستم خنک کن معمولی پیل سوختی با یک سیستم بازیافت حرارت ترموالکترونیک جایگزین می‌شود. بنابراین در توان الکتریکی لازم برای سیستم خنک کن (مانند فن هوا) صرفه جویی می‌شود. علاوه بر آن از توان الکتریکی تولید شده می‌توان برای تأمین بخشی از بارهای داخلی و یا تأمین یک بار خارجی استفاده کرد.

بازده کلی سیستم را می‌توان به صورت توان تولید شده توسط مولدهای ترموالکترونیک (P_{TEG}) تقسیم بر حرارت جذب شده از آب خروجی از استک پیل سوختی ($q_{removed}$) تعریف نمود:

$$\eta_{total} = \frac{P_{TEG}}{q_{removed}} \times 100 \quad (12)$$

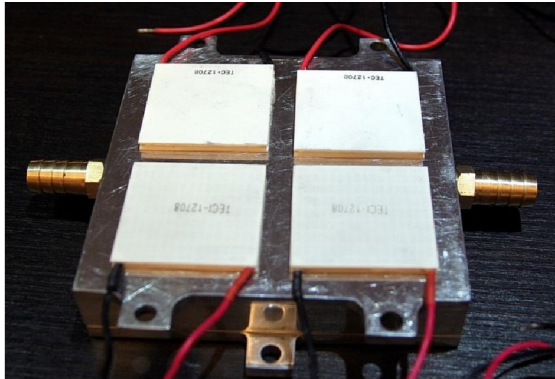


شکل ۳ دیاگرام فرایند جریان سیستم هیبریدی پیل سوختی / ترموالکترونیک

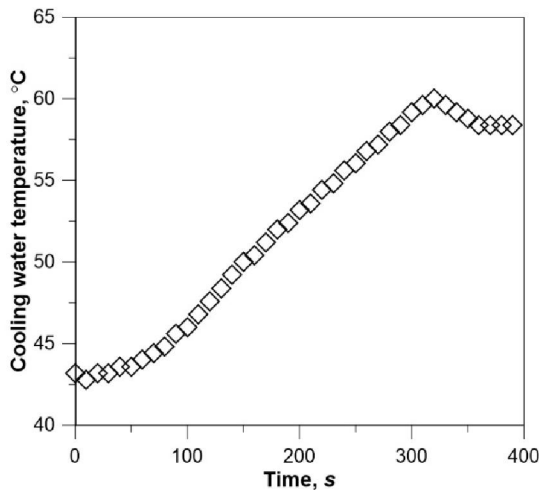
۳- سیستم آزمایشگاهی

همانطور که در شکل ۴-الف نشان داده شده است، برای بررسی عملکرد سیستم هیبریدی، یک مجموعه آزمایشگاهی ساخته شده و تحت شرایط عملکردی پیل سوختی PEM مورد تست قرار گرفت. سیستم آزمایشگاهی بازیافت حرارت THRS از یک مبدل حرارتی، ۴ عدد مازول ترموالکترونیک (مدل TEC1-12708 محصول شرکت Thermonomic Inc.)، یک سینک حرارتی، دیتالاگر، سنسورهای دما و لایه عایق‌بندی تشکیل شده است (شکل ۴-ب). در این مطالعه برای ارزیابی عملکرد سیستم بازیافت حرارت، شرایط

اینکه دمای استک به حدود ۶۰ تا ۶۵ درجه می‌رسد. در شکل ۷ دمای آب خنک کن خروجی از استک بر حسب زمان عملیات نشان داده شده است.



شکل ۶ نحوه قرارگیری ترموالکترونیک بر روی مبدل حرارتی



شکل ۷ دمای آب خنک کن خروجی از استک پیل سوختی بر حسب زمان راه‌اندازی

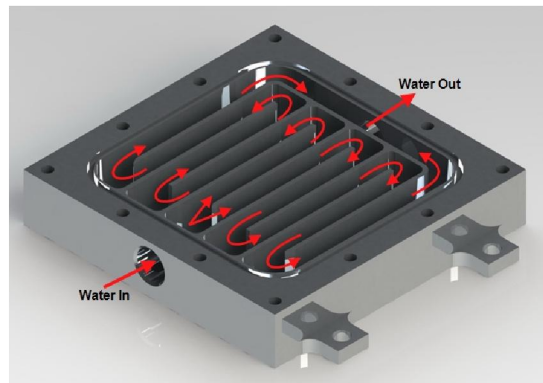
بر اساس شکل ۷، ماکزیمم دمای واقعی که استک در شرایط کاری به آن می‌رسد ۶۰ تا ۶۵ درجه سانتیگراد است. همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده، دبی آب خنک کن در سیستم پیل سوختی برابر ۲۳ lit/min است. بنابراین با معلوم بودن اختلاف دمای بین آب ورودی و خروجی به استک، که برابر ۵ درجه در نظر گرفته می‌شود، کل حرارتی که می‌بایست از استک دفع شود برابر ۸۰۱۲ وات می‌باشد. روش معمول برای دفع حرارت اتلافی از آب خنک کن استفاده از یک مبدل حرارتی هوا خنک است. در این روش به یک رادیاتور و فن محوری برای ایجاد جابجایی اجباری نیاز است. توان مورد نیاز برای فن نیز توسط پیل سوختی تأمین می‌شود.

در شکل ۸ اختلاف دما بین ورودی و خروجی مبدل حرارتی نسبت به دمای آب خروجی از استک پیل سوختی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که ماکزیمم اختلاف دمای بدست آمده برابر ۳ درجه است. در حقیقت می‌بایست سیستم بازیافت به گونه‌ای طراحی شود که حداقل اختلاف دمای ۵ درجه سانتیگراد را بین ورودی و خروجی مبدل حرارتی تأمین کند. همچنین شکل ۸ مقدار حرارتی که به کمک سیستم THRS از آب خنک کن استخراج شده را نشان داده است. همانطور که مشاهده می‌شود حدود ۹۰۰ وات از گرمای اتلافی پیل سوختی از جریان آب خارج شده است.

صورت مارپیچی دوگانه است و به وسیله ماشینکاری CNC ایجاد شده است. در شکل ۶ نحوه سوار شدن مازولهای ترموالکترونیک بر روی مبدل حرارتی نشان داده شده است. همچنین شرایط آب خنک کن ورودی به سیستم بازیافت بوسیله یک هیتر الکتریکی، قابل کنترل بوده و دقیقاً برابر با دمای آب خروجی از استک پیل سوختی ثابت نگه داشته شده است. دمای محیط، همواره ثابت و در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد است.

جدول ۱ مشخصات اجزای سیستم بازیافت حرارت

Parameter	Value	Unit
PEM Fuel cell [22]		
Rated Power	5	kW
Heat production	7.8	kW
Electrical efficiency	40	%
Cooling fluid	Demine water	
Cooling water flow rate	23	Lit/min
Temp. of cooling water after the stack	60-65	°C
Heat exchanger		
Material	Al-6061-T6	
Type of Channels	Double Spiral	
Thermal conductivity of wall	167	W/m.K
Min/max flow rate	2/15	Lit/min
Dimension	107*107*20	mm
Thermoelectric modules		
Model	TEC1-12708	
Manufacturer	Thermonomic Inc.	
Dimension	40*40*3.5	mm
Data logging		
Model	Combilog +1020	
Manufacturer	Theodor and Fridrich	
Analog channels	8	
Temp. sensor		
Type	PT100	
Accuracy	±0.1	°C

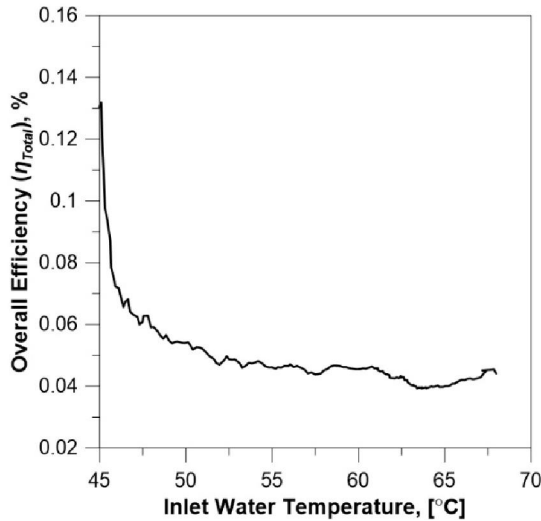


شکل ۵ مسیر جریان آب داخل مبدل حرارتی (مارپیچی دوگانه)

۴- نتایج و بحث

همانطور که گفته شد، گرمای تولید شده در استک پیل سوختی بوسیله آب خنک کنی که در کانالهای مخصوصی در داخل استک به گردش در می‌آید، خارج می‌شود. در آغاز، پیل سوختی فقط توان مورد نیاز برای بارهای داخلی را تأمین می‌کند. در این شرایط، دمای عملکردی پیل سوختی حدود ۴۰ درجه است. با اضافه شدن بار خارجی این دما رفته رفته افزایش می‌یابد تا

در شکل ۹ بازده کلی سیستم بازیافت حرارت THRS (معادله ۱۲) بر حسب دمای آب خروجی از استک پیل سوختی نشان داده شده است. همانطور مشاهده می‌شود، با افزایش دمای آب خروجی بازده کلی سیستم کاهش می‌یابد. این مربوط به عملکرد مبدل حرارتی و نوع عایق بندی آن است. به دلیل عایق‌بندی نامناسب سیستم در زمان آزمایش بخش عمده‌ای از حرارتی ورودی از طریق دیواره‌های مبدل به بیرون تلف شده است. افزایش دمای آب ورودی باعث اتلاف حرارتی بیشتر و در نتیجه کاهش بازده کلی سیستم می‌شود. بنابراین عایق‌بندی سیستم یکی از موضوعات حیاتی در سیستم بازیافت حرارت است.

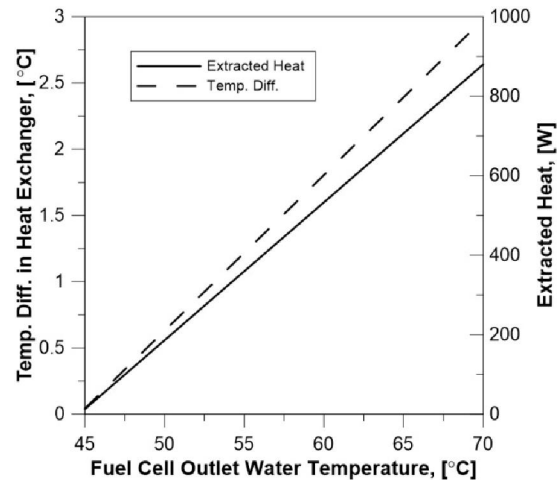


شکل ۹ بازده کلی سیستم بازیافت حرارت نسبت به دمای آب ورودی به مبدل حرارتی

۵- نتیجه گیری

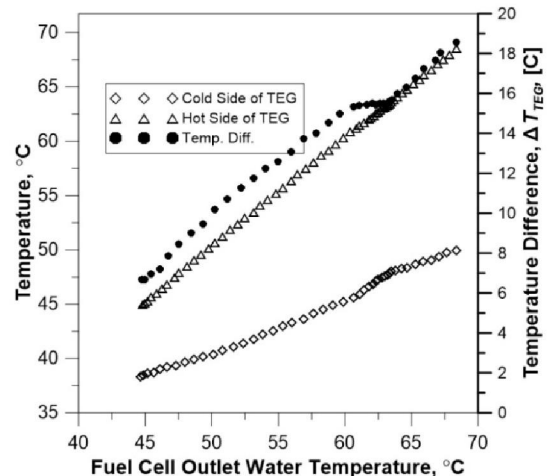
در این مقاله، به کمک یک سیستم بازیافت حرارت آزمایشگاهی متشکل از مولدهای ترموالکترونیک، بازیافت حرارت از یک پیل سوختی پلیمری مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. در سالهای اخیر و با پیشرفتهای صورت گرفته در توسعه مواد نیمه هادی، استفاده از مولدهای ترموالکترونیک برای بازیافت حرارت اتلافی از سیستمها رشد چشمگیری داشته است. از این رو در این تحقیق سعی شده است تا با کمک مولدهای ترموالکترونیک، بخشی از حرارت تولید شده در سیستم پیل سوختی به الکتریسیته تبدیل شود. سیستم آزمایشگاهی ساخته شده متشکل از ۴ عدد مازول ترموالکترونیک، مبدل حرارتی سمت گرم و سینک حرارتی سمت سرد و تعدادی سنسور دما در نقاط مختلف آن می‌باشد. سیستم بازیافت ساخته شده، تحت شرایط کاری پیل سوختی پلیمری با توان ۵ کیلووات (ساخته شده در مرکز تحقیقاتی جهاد اصفهان به سفارش سازمان انرژیهای نو ایران) آزمایش شده است. کلیه اطلاعات بدست آمده از سیستم توسط یک دیتالاگر جمع آوری و ثبت شده‌اند.

نتایج بدست آمده از این تحقیق تجربی نشان می‌دهد که می‌توان از مولدهای ترموالکترونیک برای بازیافت حرارت اتلافی از پیل‌های سوختی پلیمری استفاده نمود. یکی از ویژگیهای بارز مولدهای ترموالکترونیک آن است که در دمای کارکرد استک پیل سوختی (۶۰ تا ۶۵ درجه سانتیگراد) قادر هستند



شکل ۸ اختلاف دما در ورودی و خروجی مبدل حرارتی بر حسب دمای خروجی از استک پیل سوختی (برای بار مقاومتی ۱۰ اهم)

اختلاف دما بین سمت سرد و گرم ترموالکترونیک یکی از مهمترین پارامترها در بازده کلی سیستم است. در شکل ۹ دمای سمت سرد و گرم ترموالکترونیک بر حسب دمای آب خروجی از پیل سوختی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش دمای سمت گرم مقدار ΔT افزایش می‌یابد. همانطور که ملاحظه می‌شود در شرایط کاری استک پیل سوختی بیشترین اختلاف دمایی که در بین دو سمت گرم و سرد ترموالکترونیک بوجود می‌آید در دمای ۶۵ درجه سانتیگراد برابر ۱۸ درجه است. برای بدست آوردن مقادیر بیشتر ΔT می‌بایست سطح سینک حرارتی افزایش یافته و دمای محیط پایین‌تر باشد. همانطور که پیش از این گفته شد دمای محیط در این آزمایشها ۳۰ درجه بود. اگر آزمایش در محیطی با دمای پایین‌تر انجام شود انتقال حرارت در سمت سرد ترموالکترونیک بیشتر شده و در نتیجه شار حرارتی در مقطع ترموالکترونیک افزایش می‌یابد. از سوی دیگر در یک سیستم بازیافت حرارت در مقیاس واقعی با بهینه‌سازی طراحی سینک حرارتی، نرخ انتقال حرارت در سمت سرد ترموالکترونیک می‌تواند افزایش یابد. راه دیگر برای افزایش نرخ انتقال حرارت استفاده از جابجایی اجباری هوا بر روی فینهای سینک حرارتی است. در این روش باید توان مصرفی فن را نیز در طراحی بهینه کل سیستم در نظر گرفت.



شکل ۹ دمای سمت سرد/گرم مازول ترموالکترونیک بر حسب دمای آب خروجی از پیل سوختی (برای بار مقاومتی ۱۰ اهم)

- Two Case Studies. *Journal of Electronic Materials*, 2012. 41(6): p. 1838-1844.
- [19] Gao, X., et al., Numerical model of a thermoelectric generator with compact plate-fin heat exchanger for high temperature PEM fuel cell exhaust heat recovery. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012. 37(10): p. 8490-8498.
- [20] Mench, M.M., *Fuel Cell Engines 2008*, John Wiley & Sons, Inc.
- [21] Barclay, F.J., *Fuel Cells, Engines and Hydrogen: An Exergy Approach*. 2006, John Wiley & Sons.
- [22] Isfahan Research Center, *Guid book for 5kW PEM Fuel cell system*. 2010.
- [23] Freedman, A.P., *A Thermoelectric Generation Subsystem Model for Heat Recovery Simulations*. 2011, Rochester Institute of Technology: United States -- New York. p. 223.
- [24] Chen, W.-H., et al., Experimental study on thermoelectric modules for power generation at various operating conditions. *Energy*, 2012. 45(1): p. 874-881.
- [25] Buist, R.J. and P.G. Lau. Thermoelectric power generator design and selection from TE cooling module specifications. in *Thermoelectrics*, 1997. Proceedings ICT '97. XVI International Conference on. 1997.

حرارت را به الکتروسیسته تبدیل کنند. در این محدوده دمایی تقریباً سیستم دیگری قابلیت بازیافت حرارت ندارد.

در این بررسی از ماژولهای ترموالکترونیک خنک کننده (TEC)، که در بازار به صورت تجاری موجود بود استفاده شده است. چنانچه از ماژولهای ترموالکترونیک مولد (TEG) استفاده شود، قطعاً نتایج بهتری حاصل خواهد شد، زیرا پارامترهای عملکردی ماژول ترموالکترونیک مانند ضریب سی-یک، نقش به سزایی در کارایی کلی ماژول ترموالکترونیک دارند.

علاوه بر این استفاده از مولدهای ترموالکترونیک با پارامترهای درونی بهتر، توان تولیدی مجموعه را افزایش می‌دهد و بالتبع بازده کلی سیستم افزایش خواهد یافت. عامل دیگری که در کارایی کلی سیستم تأثیر گذار است طراحی مبدل حرارتی سمت سرد ترموالکترونیک، (هیت سینک) است. استفاده از سطوح گسترده‌تر و موادی که ضریب انتقال حرارت بالاتری دارند منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت در سمت سرد ترموالکترونیکها می‌شود. در نتیجه شار حرارتی در ترموالکترونیک و به دنبال آن بازده کلی سیستم افزایش خواهد یافت.

۶- مراجع

- [1] Wang, Y., et al., A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research. *Applied Energy*, 2011. 88(4): p. 981-1007.
- [2] Barbir, F., *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*, ed. R.C. Dorf. 2005: Elsevier Academic Press.
- [3] James Larminie, A.D., *Fuel Cell Systems Explained*. 2003, John Wiley & Sons Ltd. p. 433.
- [4] Faghri, A. and Z. Guo, Challenges and opportunities of thermal management issues related to fuel cell technology and modeling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005. 48(19-20): p. 3891-3920.
- [5] Granovskii, M., I. Dincer, and M.A. Rosen, Performance comparison of two combined SOFC-gas turbine systems. *Journal of Power Sources*, 2007. 165(1): p. 307-314.
- [6] Gencoglu, M.T. and Z. Ural, Design of a PEM fuel cell system for residential application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009. 34(12): p. 5242-5248.
- [7] Erdinc, O. and M. Uzunoglu, Recent trends in PEM fuel cell-powered hybrid systems: Investigation of application areas, design architectures and energy management approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010. 14(9): p. 2874-2884.
- [8] Gigliucci, G., et al., Demonstration of a residential CHP system based on PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, 2004. 131(1-2): p. 62-68.
- [9] Shabani, B. and J. Andrews, An experimental investigation of a PEM fuel cell to supply both heat and power in a solar-hydrogen RAPS system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011. 36(9): p. 5442-5452.
- [10] Hwang, J.J., et al., Implementation of a heat recovery unit in a proton exchange membrane fuel cell system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010. 35(16): p. 8644-8653.
- [11] Sandu, V., et al. Experimental investigation of thermoelectric heat recovery from a diesel engine. in *Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, 2012 International Conference on. 2012. IEEE.
- [12] Maneewan, S., et al., Investigation on generated power of thermoelectric roof solar collector. *Renewable Energy*, 2004. 29(5): p. 743-752.
- [13] Parise, R.J. and G.F. Jones. Fuel cell thermal management with thermoelectric coolers. 2002.
- [14] Chen, M., et al., System Modeling and Validation of a Thermoelectric Fluidic Power Source: Proton Exchange Membrane Fuel Cell and Thermoelectric Generator (PEMFC-TEG). *Journal of Electronic Materials*, 2010. 39(9): p. 1593-1600.
- [15] Chen, X., Y. Pan, and J. Chen, Performance and Evaluation of a Fuel Cell-Thermoelectric Generator Hybrid System. *Fuel Cells*, 2010. 10(6): p. 1164-1170.
- [16] Rosendahl, L.A., P.V. Mortensen, and A.A. Enkeshafi, Hybrid Solid Oxide Fuel Cell and Thermoelectric Generator for Maximum Power Output in Micro-CHP Systems. *Journal of Electronic Materials*, 2011. 40(5): p. 1111-1114.
- [17] Chen, X., et al., An available method exploiting the waste heat in a proton exchange membrane fuel cell system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011. 36(10): p. 6099-6104.
- [18] Gao, X., et al., Potential Usage of Thermoelectric Devices in a High-Temperature Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cell System: