بررسی نسبت بخار به سوخت و نسبت هوا به سوخت در یک سیستم micro CHP

با توان 5 کیلووات بر پایه پیل‌ ‌سوختی غشاء پلیمری دما بالا

جلال قاسمی1\*، سعید گیلک2

1- دانشیار، مهندسی مکانیک-گرایش تبدیل انرژی، دانشگاه زنجان، زنجان

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک-گرایش تبدیل انرژی دانشگاه زنجان ، زنجان

\* زنجان ، صندوق پستی 45371-38791، j.ghasemi@znu.ac.ir

چکیده

با توجه به جایگاه پیل­های سوختی در صنایع امروزی بررسی پارامترهای موثر در افزایش راندمان آن حائز اهمیت است. در اين مقاله ، بررسی نسبت بخار به سوخت و نسبت هوا به سوخت در یک سیستم micro CHP بر پایه پیل سوختی غشا پلیمری دما بالا پرداخته ‌شده­است. در اين راستا به‌منظور توليد سوخت هيدروژن از یک سيستم ريفورمينگ بخارآب با متان استفاده‌ شده­است. براي انجام اين تحقيق، از نرم‌افزار Aspen براي شبيه­سازي ريفورمينگ، پيل سوختي و سيستم بازياب گرما بکار گرفته ‌شده است. در بخش ريفورمينگ نتايج شبيه‌سازي نشان مي­دهد که کسر مولي هيدروژن توليد شده برابر 79.38 درصد مي­باشد که در مقايسه با نتايج آزمايشگاهي داراي خطاي نسبي 1.32 درصد است. همچنين در مقایسه دو مقدار 4 و 4.8 براي پارامتر نسبت بخار به سوخت، در عملکرد سيستم ريفورمينگ، ميزان هيدروژن توليد ­شده به مقدار 2.55 درصد افزايش و درصد کسر مولي مونواکسيدکربن به مقدار 37.5 درصد کاهش پيدا مي­کند. همچنين توان و راندمان الکتريکي آن به ترتيب 2.55 و 1.8 درصد افزايش و راندمان حرارتي سيستم به مقدار 1.4 درصد کاهش پيدا مي‌کند. علاوه بر آن نتايج مي‌دهد که برای نسبت هوا به سوخت 4.58 در SCR=4، به حداکثر راندمان حرارتي 41.05 درصد مي‌رسد.

**کلی**د‌واژگ**ان**

پيل سوختي، غشا پليمري دمابالا، نسبت بخار به سوخت، نسبت هوا به سوخت

Investigation of steam carbon and air fuel ratio in a 5 kW HT-PEMFC for micro CHP system

Jalal Ghasemi1\*, Saeed Gilak2

1- Department of Mechanical Engineering, Zanjan University, zanjan, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Zanjan University, zanjan, Iran

\* P.O.B. 45371-38791 Zanjan, Iran, [j.ghasemi@znu.ac.ir](mailto:j.ghasemi@znu.ac.ir)

Abstract

Due to the fuel cell importance in nowadays industrial equipments, investigating the effective parameters to increase its efficiency is crucial. In this thesis, a 5 kW micro-CHP system based on high temperature polymer membrane fuel cell has been designed and analyzed. In this regard, a steam methane reforming system is used to produce hydrogen fuel. In this regard, Aspen software along with its Hysys module is used to simulate the fuel cell, reforming and the heat recovery systems. Also, the EES software is used for modeling high temperature polymeric membrane fuel cell have been used. In the reforming section, the simulation results indicate that the percentage of hydrogen molar fraction produced is 79.38%, which has a relative error of 1.32% compared to the experimental results. Also, considering the two values ​​of 4 and 4.8 for the SCR parameter, the reforming system was investigated. Carbon monoxide is reduced to 37.5%. The fuel cell stack power and electrical efficiency is increased to 2.55% and 1.8%, respectively, and the thermal efficiency of the system is decreased to 1.4%. By changing the AFR parameter from 4.14 to 4.58 with a constant SCR (SCR = 4), the thermal efficiency is 41.05.

Keywords

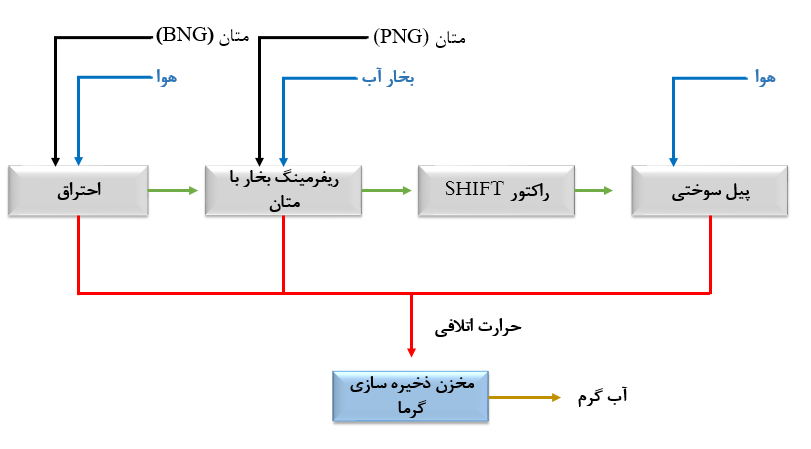
Fuel cell, HT-PEMFC, Steam carbon ratio, Air fuel ratio

1. مقدمه

امروزه استفاده از پيل سوختی به منظور توليد، تبديل و بهينه‌سازي مصرف انرژی و همچنين کاهش آلاينده‌های محيط زيستی به عنوام روش نوين مورد توجه است. يکی از کاربردهای پيل سوختی در سيستم‌های micro CHP غشاء پلیمری دما بالا مي‌باشد. مطالعه و بررسی پارامترهای موثر در عملکرد يک پيل سوختی در چنين سيستمی برای دستیابی به حالت بهینه حائز اهمیت خواهد بود. از پارامترهای مهم در آن بررسی نسبت بخار به سوخت و نسبت هوا به سوخت است. تحقيقات مختلفی در زمينه پيل سوختی و کاربردهای آن صورت گرفته است. ژو و همکاران[[1](#_ENREF_1)] با استفاده از نرم‌افزار Aspen Plus يک سيستم PEMFC**[[1]](#footnote-1)** را مورد بررسي و بهينه‌سازي قرار داده­اند، که در آن براي راکتورهاي **[[2]](#footnote-2)**SR و **[[3]](#footnote-3)**WGS از مدل‌هاي راکتور تعادلي استفاده‌شده است. گانديگليو و همکاران[[2](#_ENREF_2)] به بررسي و مدل‌سازي يک سيستم پيل سوختي غشا پليمري يک کيلوواتي پرداخته­اند که در آن از يک راکتور دما ثابت تعادلي براي واکنش ريفورمينگ و يک راکتور آدياباتيک تعادلي براي واکنش شيفت آب استفاده‌شده است. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، تحقيقی که در خصوص بررسی نسبت بخار به سوخت و نسبت هوا به سوخت را برای پيل سوختي غشاء پليمری دمابالا وجود داشته باشد، يافت نگرديد. لذا در این مقاله به طراحي يک سيستم micro CHP با توان پنج کيلووات بر پايه پيل سوختي غشاء پليمری دمابالا همراه با يک سيستم ريفورمينگ بخار با سوخت متان و سيستم بازياب حرارتي پرداخته شده­است. کل سيستم که شامل ريفورمينگ، پيل سوختي و قسمت بازياب حرارتي توسط نرم‌افزار Aspen شبيه‌سازي‌شده سپس به بررسي پارامترهاي نسبت بخار به سوخت و نسبت هوا به سوخت پرداخته‌شده و تأثيرات آن‌ها بر روي توان الکتريکي، توان حرارتي و راندمان کل سيستم بررسی گرديده است.

1. معادلات حاکم

به دليل اينکه معادلات حاکم بستگی به طرح ارائه شده برای سيستم micro CHP خواهد داشت، لذا قبل از آن طرح مورد نظر و فرض‌های در نظر گرفته پرداخته مي‌شود. شکل 1 طرح کلی ارائه شده برای يک سيستم micro CHP با توان پنج کيلووات را نشان مي‌دهد. در اين طرح، غشاي پيل سوختي از جنس فسفريک اسيد بر پايه پلي بنزيميدازول مي­باشد. ابتدا براي ريفرمينگ از سه راکتور [[4]](#footnote-4)PFR جهت انجام واکنش­هاي کاهشي هيدروژن و اکسايشي هيدروژن استفاده ‌شده است.



**Fig**. **1** Micro CHP outline

شكل 1 شماتیک کلی سیستم micro CHP

براي جلوگيري از اتلاف انرژي اضافي راکتورها و افزايش راندمان کلي سيستم از هفت مبدل حرارتي استفاده‌شده است. مبرد اتانول گليکول جهت استفاده از گرماي توليدشده توسط پيل سوختي و انتقال آن در نظر گرفته‌شده است. در تحليل‌ها و ارائه معادلات حاکم فرض شده است که از متان 100 % به عنوان سوخت استفاده ميگردد و گونه‌هاي فرعي و تأثيرات آن‌ها بر عملکرد سيستم ناديده گرفته مي‌شوند. اين فرض دلالت بر اين دارد که گونه‌هاي فرعي در مخلوط گاز ورودي به‌طور کامل در طول فرايندهاي پيش‌تصفيه سوخت، برداشته مي‌شوند. همچنين براي تجزيه و تحليل سيستم‌هاي واکنشي گاز از روش پنگ­رابينسون که مدل مناسب و بسيار دقيق براي اين واکنش‌هاي مي‌باشد استفاده شده است [[3](#_ENREF_3)]. از فرضيات ديگر اينکه همه راکتورها و پيل سلول سوختي در سيستم تحت شرايط حالت پايا عمل مي‌کنند و از غيرفعال شدن کاتاليست­ها در راکتورها و اثر مسموميت پيل سوختي ناشي از مونوکسيد کربن صرفنظر مي‌گردد. ريفورمينگ بخار آب با متان يکي از متعارف­ترين فرآيند­هاي توليد هيدروژن است. ريفرمينگ متان با بخارآب شامل سه واکنش که دو واکنش گرماگير و يک واکنش گرمازا هستند. روابط SMR (1)، WGS (2)و DSR (3) واکنش­­هاي اين فرآيند را نشان مي­دهند[[4](#_ENREF_4)]:

|  |  |
| --- | --- |
| (1) |  |
| (2) |  |
| (3) |  |

به‌منظور محاسبه سرعت واکنش از مدل سينتيکي ژو و فرومنت استفاده ‌شده­است که در آن از کاتاليست نيکل بر پايه آلومينيا است[[4](#_ENREF_4)]. روابط سينتيکي (4)،(5) و(6) به ترتيب براي واکنش‌هاي SMR، WGS و DSR مي­باشد:

|  |  |
| --- | --- |
| (4) |  |
| (5) |  |
| (6) |  |
|  |  |

در واکنش WGS از رابطه (7) که مدل سينتيکي موئه به‌صورت جداگانه در دو راکتور دما بالا و دما پايين و کاتاليست­هاي متفاوت انجام‌شده است، استفاده‌شده است[[5](#_ENREF_5)].

|  |  |
| --- | --- |
| (7) |  |

براي محاسبه ثابت جذبي از معادله ونت هف رابطه (8) و براي محاسبه ثابت سرعت از معادله آرنيوس رابطه (9) استفاده مي­شود[[4](#_ENREF_4)].

|  |  |
| --- | --- |
| (8) |  |
| (9) |  |

براي محاسبه ثابت تعادل از روابط (10) تا (12) که تابع دماي راکتور مي­باشد، استفاده‌ شده­است[[6](#_ENREF_6)]:

|  |  |
| --- | --- |
| (10) |  |
| (11) |  |
| (12) |  |

ثابت‌های مورد نياز جهت محاسبه سرعت واکنش در جداول 1 و 2 ارائه ‌شده­است.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| جدول 1 **ثابت‌های سينتيکي واکنش­هاي برای معادلات 4، 5، 6[[4](#_ENREF_4" \o "Xu, 1989 #2367),** [**5**](#_ENREF_5)**]**  **Table 1** Kinetic constans of reaction for Eqs. 4, 5, 6[4,5] | | | |
| واکنش | کاتالیست |  | **انرژي**  **فعال­سازي** |
| 1 |  |  | 240 |
| 2 |  |  | 67.13 |
|  |  | 70 |
|  |  | 35 |
| 3 |  | ) | 243.9 |

**جدول 2** ثابت‌های رابطه (8) ونت­ هف[[4](#_ENREF_4)]

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Table 2** Van’t hoff constans in Eq. 8 [4] | | | |
|  |  | آنتالپی مخصوص جذبی | ثابت جذبي |
|  |  | -38.28 | 0.1791 |
|  |  | -70.65 | 40.91 |
|  |  | -82.90 | 00.0296 |
|  |  | 88.68 | 0.4152 |

پارامتر نسبت هوا به سوخت و نسبت دبي مولي آب به دبي مولي متان که به­صورت روابطه (13) و (14) محاسبه مي­شود[[3](#_ENREF_3)]:

|  |  |
| --- | --- |
| (13) |  |
| (14) |  |

همچنین طبق معادلات (15) تا (17) راندمان الکترکی، حرارتی و کل محاسبه می­گردد.

|  |  |
| --- | --- |
| (15) |  |
| (16) |  |
| (17) |  |

که در رابطه (15)، توان مصرفي کل سيستم و نمايانگر توان توليدي پيل سوختي بر اساس مقدار دبي هيدروژن و ولتاژ تعريف‌شده در اين سيستم مي­باشد. که از رابطه (18) به دست مي­آيد[[3](#_ENREF_3)].

|  |  |
| --- | --- |
| (18) |  |

در ادامه اطلاعات کاتاليست­هاي استفاده‌شده در واکنش ريفورمينگ در جدول2 ارائه‌شده است.

**جدول 3** مشخصات کاتاليست­هاي راکتور­هاي ريفرمينگ[3]

**Table 3** Catalyst properties of fuel reforming reactors[3]

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| محدوده دماي عملياتي | چگالي | گرماي ويژه | نوع کاتاليست | راکتور |
| 650-750 | 3986 | 930 |  | SR |
| 400-500 | 7633 | 421 |  | HTS |
| 200-300 | 6877 | 475 |  | LTS |

1. نتايج مدل‌سازی

برای اطمينان از روند مدلسازی و نتايج حاصل از آن ابتدا صحت‌سنجی مورد نياز صورت گرفته و نتايج شبيه‌سازي نشان مي‌دهد که کسر مولي هيدروژن توليد شده برابر 79.38 درصد مي‌باشد که در مقايسه با نتايج آزمايشگاهي داراي خطاي نسبي 1.32 درصد است[3]. در ادامه به بررسی نتايج حاصل از مدل‌سازی بر اساس معادلات حاکم بخش قبل و فرضيات صورت گرفته برای بررسی پارامترهای مورد نظر پرداخته مي‌شود. با تغيير AFR و ثابت در نظر گرفتن دبی جرمی سوخت در سيستم ریفورمينگ، ، دبی جرمی آب راکتور ريفورمينگ، و دبی جرمی هوای ورودی، ، تغييرات پارامترهای مختلف در جدول 4 نشان داده شده است. نتايج اين جدول نشان ميدهد که با افزايش AFR و در نتيجه آن کاهش مقدار دبي BNG منجر به انجام کامل سوخت در راکتور احتراق مي‌شود و درنتيجه باعث افزايش دماي راکتور­هاي HTS و LTS و کاهش واکنش تبديل مونوکسيد کربن به دي‌اکسيد کربن و هيدروژن مي­شود که اين خود بر ميزان کسر مولي و دبي هيدروژن تأثير منفي مي­گذارد. همچنين افزايش ميزان سوخت هيدروژن در پيل سوختي، توان و گرماي توليدي را افزايش مي­دهد طوري‌که در برای نسبت هوا به سوخت 4.58 در 4=SCR، به حداکثر راندمان حرارتي 41.05% قابل دستيابی است. علاوه بر آن منجر به افزايش ميزان توان حرارتي و افزايش دماي آب بازياب، تا 97.15 درجه سانتيگراد مي‌شود.

**جدول 4** تاثيرات پارامتر AFR راکتور احتراق در عملکرد پيل سوختی در حالت و و

**Table 4** Effects of AFR parameters for the burner on HT-PEMFC performance in:

و و

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| AFR | دبی جرمی BNG  [kg/h] | کسر مولي هيدروژن [%] | توان راکتور احتراق [kW] | دبي هيدروژن [kg/h] |  |  |  |  |  |
| 4.14 | 0.4293 | 79.38 | 4.062 | 0.4152 | 97.02 | 5.796 | 31.49 | 40.97 | 72.46 |
| 4.22 | 0.3864 | 79.39 | 4.08 | 0.4153 | 97.08 | 5.7978 | 31.50 | 41.01 | 72.51 |
| 4.58 | 0.3177 | 79.39 | 4.09 | 0.4154 | 97.15 | 5.799 | 31.51 | 41.05 | 72.56 |

يکي ديگر از پارامترهاي مورد مطالعه در اين زمينه مقدار SCR در قسمت SR سيستم ريفورمينگ مي­باشد که مقدار آن را در دو حالت مختلف بررسي‌شده و نتايج آن در جدول 5 نشان داده ‌شده­است. با توجه به جدول 5 افزايش مقدار SCR مقدار بخار موجود در راکتور SMR را افزايش مي­دهد. بنابراين بيشتر انرژي حاصل از راکتور احتراق صرف افزايش دماي آن مي­شود. همچنين با توجه به رابطه (1) و گرماگير بودن آن مقدار توليد هيدروژن کاهش مي­يابد. اما در قسمت راکتورهاي ­HTS و LTS رابطه (2) نشان از گرماده بودن واکنش مي­دهد، افزايش SCR باعث کاهش دماي آن مي­شود. و خود اين مساله باعث تبديل بيشتر مونوکسيد کربن به دي‌اکسيد کربن و هيدروژن مي­شود. در حالت کلي افزايش SCR باعث توليد بيشتر هيدروژن و کاهش بيشتر مونوکسيد کربن مي­شود. همچنين مقدار توان الکتريکي آن به دليل افزايش مقدار هيدروژن افزايش و مقدار توان حرارتي آن با توجه به کاهش دماي خروجي راکتور HTS کاهش پيدا مي­کند.

**جدول 5** تاثيرات پارامتر SCR در سيستم ريفورمينگ در حالت ، و

**Table 4** Effects of SCR parameters on the performance HT-PEMFC in ، و

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | SCR |  | LTS | HTS | SR |  |  |  |  |
| 3.865 | 4 |  | 0.47 | 0.47 | 0.47 | 72.47 | 40.98 | 31.49 | 5.796 |
|  | 30.17 | 30.83 | 36.87 |
|  | 0.32 | 0.98 | 7.03 |
|  | 13.62 | 12.08 | 6.91 |
|  | 0.4152 | 0.4103 | 0.3650 |
| 4.638 | 4.48 |  | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 72.45 | 40.39 | 32.06 | 5.944 |
|  | 36.58 | 36.84 | 41.93 |
|  | 0.44 | 0.7 | 5.79 |
|  | 14.33 | 12.16 | 6.97 |
|  | 0.4258 | 0.4036 | 0.3508 |

1. نتیجه­گیری و جمع‌بندی

در اين مقاله، به طراحي يک سيستم micro CHP بر پايه پيل سوختي غشا پروتوني دمابالا (PBI)، همراه با سيستم ريفورمينگ بخارآب و متان توسط نرم­افزار ASPEN Hysys پرداخته شد. که پارامترهاي SCR و AFR و تأثير آن­ها بر راندمان الکتريکي و حرارتي سيستم، و ميزان مونواکسيد کربن موجود در سوخت ورودي پيل سوختي بررسي شد. در بررسي مقدار AFR در سه حالت مختلف 4.14، 4.22 و 4.58 نتايج نشان داد که افزايش آن منجر به انجام کامل واکنش احتراق مي­شد. و درنتيجه ميزان توان توليدي براي راکتور SR افزايش پيدا مي­کرد و درنتيجه افزايش ميزان هيدروژن توليدي منجر به افزايش توان و راندمان الکتريکي مي­شد. راندمان حرارتي به ميزان 8.2 درصد افزايش پيدا مي­کند. ولي با توجه به افزايش دماي راکتورهاي HTS و LTS ميزان تبديل مونوکسيدکربن کاهش پيدا کرد و تأثير منفي در عملکرد پيل سوختي گذاشت. همچنين با بررسي ميزان SCR در دو حالت متفاوت 4 و 4.8 نتايج نشان داد که با افزايش ميزان SCR مقدار بخار موجود در راکتور SR افزايش پيدا کرد. بنابراين مقدار بيشتر از توان توليدي راکتور احتراق، صرف آن مي‌شد. درنتيجه واکنش SMR کامل انجام نمي­شد و ميزان هيدروژن توليدي کاهش پيدا کرد. ولي کاهش دماي ورودي به دو راکتور HTS و LTS باعث تبديل بيشتر مونوکسيد کربن به دي‌اکسيد کربن و هيدروژن شد. در کل ميزان هيدروژن توليد­شده به مقدار 2.55 درصد افزايش پيداکرده و درصد کسر مولي مونواکسيد کربن به مقدار 37.5 درصد کاهش پيدا مي­کند و اين خود، مقدار راندمان الکتريکي را 1.8 درصد بهبود بخشيد. ولي با توجه به کاهش دماي مقدار راندمان حرارتي کاهش يافت.

1. مراجع

[1] C. Xu, L. T. Biegler, and M. S. Jhon, "Systematic optimization of an H2 PEM fuel cell power generation system with heat integration," *AIChE journal,* vol. 52, no. 7, pp. 2496-2506, 2006.

[2] M. Gandiglio, A. Lanzini, M. Santarelli, and P. Leone, "Design and optimization of a proton exchange membrane fuel cell CHP system for residential use," *Energy and Buildings,* vol. 69, pp. 381-393, 2014.

[3] A. Jo *et al.*, "Modeling and analysis of a 5 kWe HT-PEMFC system for residential heat and power generation," *International Journal of Hydrogen Energy,* vol. 42, no. 3, pp. 1698-1714, 2017.

[4] J. Xu and G. F. Froment, "Methane steam reforming, methanation and water‐gas shift: I. Intrinsic kinetics," *AIChE journal,* vol. 35, no. 1, pp. 88-96, 1989.

[5] W.-H. Chen, M.-R. Lin, T. L. Jiang, and M.-H. Chen, "Modeling and simulation of hydrogen generation from high-temperature and low-temperature water gas shift reactions," *international journal of hydrogen energy,* vol. 33, no. 22, pp. 6644-6656, 2008.

[6] K. Hou and R. Hughes, "The kinetics of methane steam reforming over a Ni/α-Al2O catalyst," *Chemical Engineering Journal,* vol. 82, no. 1-3, pp. 311-328, 2001.

1. - Proton Exchange Membrane Fuel Cell(PEMFC) [↑](#footnote-ref-1)
2. - Steam Reforming(SR) [↑](#footnote-ref-2)
3. - Water Gas Shift(WGS) [↑](#footnote-ref-3)
4. - Plug Flow Reactor(PFR) [↑](#footnote-ref-4)