



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

با توان ۵ کیلووات بر پایه پیل سوختی غشاء پلیمری دما بالا

جلال قاسمی^{۱*}، سعید گیلک^۲

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

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

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

چکیده

با توجه به جایگاه پیل های سوختی در صنایع امروزی بررسی پارامترهای موثر در افزایش راندمان آن حائز اهمیت است. در این مقاله، بررسی نسبت بخار به سوخت و نسبت هوا به سوخت در یک سیستم micro CHP بر پایه پیل سوختی غشاء پلیمری دما بالا پرداخته شده است. در این راستا به منظور تولید سوخت هیدروژن از یک سیستم ریفورمینگ بخار آب با متان استفاده شده است. برای انجام این تحقیق، از نرم افزار Aspen برای شبیه سازی ریفورمینگ، پیل سوختی و سیستم بازیاب گرما بکار گرفته شده است. در بخش ریفورمینگ نتایج شبیه سازی نشان می دهد که کسر مولی هیدروژن تولید شده برابر 79.38 درصد می باشد که در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی دارای خطای نسبی 1.32 درصد است. همچنین در مقایسه دو مقدار 4 و 4.8 برای پارامتر نسبت بخار به سوخت، در عملکرد سیستم ریفورمینگ، میزان هیدروژن تولید شده به مقدار 2.55 درصد افزایش و درصد کسر مولی مونواکسید کربن به مقدار 37.5 درصد کاهش پیدا می کند. همچنین توان و راندمان الکتریکی آن به ترتیب 2.55 و 1.8 درصد افزایش و راندمان حرارتی سیستم به مقدار 1.4 درصد کاهش پیدا می کند. علاوه بر آن نتایج می دهد که برای نسبت هوا به سوخت 4.58 در SCR=4، به حداکثر راندمان حرارتی 41.05 درصد می رسد.

کلیدواژگان

پیل سوختی، غشاء پلیمری دما بالا، 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 Ghasemi^{1*}, 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

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

۱- مقدمه

امروزه استفاده از پیل سوختی به منظور تولید، تبدیل و بهینه سازی مصرف انرژی و همچنین کاهش آلاینده های محیط زیستی به عنوان روش نوین مورد توجه است. یکی از کاربردهای پیل سوختی در سیستم های micro CHP غشاء پلیمری دما بالا می باشد. مطالعه و بررسی پارامترهای موثر در عملکرد یک پیل سوختی در چنین سیستمی 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. تحقیقات مختلفی در

زمینه پیل سوختی و کاربردهای آن صورت گرفته است. ژو و همکاران [1] با استفاده از نرم افزار Aspen Plus یک سیستم PEMFC را مورد بررسی و بهینه سازی قرار داده اند، که در آن برای راکتورهای SR^۲ و WGS^۳ از مدل های راکتور تعادلی استفاده شده است. گاندیگلیو و همکاران [2] به بررسی و مدل سازی یک سیستم پیل سوختی غشاء پلیمری یک کیلوواتی

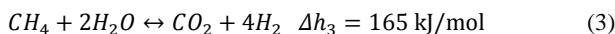
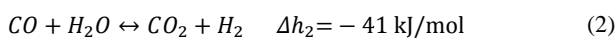
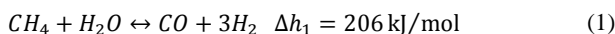
1 - Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

2 - Steam Reforming (SR)

3 - Water Gas Shift (WGS)



بسیار دقیق برای این واکنش‌های می‌باشد استفاده شده است [3]. از فرضیات دیگر اینکه همه راکتورها و پیل سلول سوختی در سیستم تحت شرایط حالت پایا عمل می‌کنند و از غیرفعال شدن کاتالیست‌ها در راکتورها و اثر مسمومیت پیل سوختی ناشی از مونوکسید کربن صرف‌نظر می‌گردد. ریفرمینگ بخار آب با متان یکی از متعارف‌ترین فرآیندهای تولید هیدروژن است. ریفرمینگ متان با بخار آب شامل سه واکنش که دو واکنش گرماگیر و یک واکنش گرمازا هستند. روابط (1) SMR، WGS (2) و (3) DSR واکنش‌های این فرآیند را نشان می‌دهند [4]:



به‌منظور محاسبه سرعت واکنش از مدل سینتیکی ژو و فرومنت استفاده شده‌است که در آن از کاتالیست نیکل بر پایه آلومینا است [4]. روابط سینتیکی (4)، (5) و (6) به ترتیب برای واکنش‌های SMR، WGS و DSR می‌باشد:

$$r_1 = \frac{k_1 (P_{CH_4} P_{H_2O} - P_{H_2}^3 P_{CO} / K_{eq1})}{P_{H_2}^{2.5} DEN^2} \quad (4)$$

$$r_2 = \frac{k_2 (P_{CO} P_{H_2O} - P_{H_2} P_{CO_2} / K_{eq2})}{P_{H_2}} \quad (5)$$

$$r_3 = \frac{k_3 (P_{CH_4} P_{H_2O}^2 - P_{H_2}^4 P_{CO_2} / K_{eq3})}{P_{H_2}^{3.5} DEN^2} \quad (6)$$

$$DEN = 1 + K_{CO} P_{CO} + K_{H_2} P_{H_2} + K_{CH_4} P_{CH_4} + K_{H_2O} P_{H_2O} / P_{H_2}$$

در واکنش WGS از رابطه (7) که مدل سینتیکی موئه به‌صورت جداگانه در دو راکتور دما بالا و دما پایین و کاتالیست‌های متفاوت انجام شده است، استفاده شده است [5].

$$r_{CO} = k(P_{CO} P_{H_2O} - P_{CO_2} P_{H_2} / K_{eq2}) \quad (7)$$

برای محاسبه ثابت جذبی از معادله ونت هف رابطه (8) و برای محاسبه ثابت سرعت از معادله آرنیوس رابطه (9) استفاده می‌شود [4].

$$K_j = A(K_j) \exp\left(\frac{-\Delta h_j}{RT}\right) \quad (8)$$

$$k_i = A(k_i) \exp\left(\frac{-E_i}{RT}\right) \quad (9)$$

پرداخته‌اند که در آن از یک راکتور دما ثابت تعادلی برای واکنش ریفرمینگ و یک راکتور آدیاباتیک تعادلی برای واکنش شیفت آب استفاده شده است. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، تحقیقی که در خصوص بررسی نسبت بخار به سوخت و نسبت هوا به سوخت را برای پیل سوختی غشاء پلیمری دامبالا وجود داشته باشد، یافت نگردید. لذا در این مقاله به طراحی یک سیستم micro CHP با توان پنج کیلووات بر پایه پیل سوختی غشاء پلیمری دامبالا همراه با یک سیستم ریفرمینگ بخار با سوخت متان و سیستم بازیاب حرارتی پرداخته شده‌است. کل سیستم که شامل ریفرمینگ، پیل سوختی و قسمت بازیاب حرارتی توسط نرم‌افزار Aspen شبیه‌سازی شده سپس به بررسی پارامترهای نسبت بخار به سوخت و نسبت هوا به سوخت پرداخته شده و تأثیرات آن‌ها بر روی توان الکتریکی، توان حرارتی و راندمان کل سیستم بررسی گردیده است.

۲- معادلات حاکم

به دلیل اینکه معادلات حاکم بستگی به طرح ارائه شده برای سیستم micro CHP خواهد داشت، لذا قبل از آن طرح مورد نظر و فرض‌های در نظر گرفته پرداخته می‌شود. شکل ۱ طرح کلی ارائه شده برای یک سیستم micro CHP با توان پنج کیلووات را نشان می‌دهد. در این طرح، غشای پیل سوختی از جنس فسفریک اسید بر پایه پلی بنزیمیدازول می‌باشد. ابتدا برای ریفرمینگ از سه راکتور^۱ PFR جهت انجام واکنش‌های کاهشی هیدروژن و اکسایشی هیدروژن استفاده شده است.

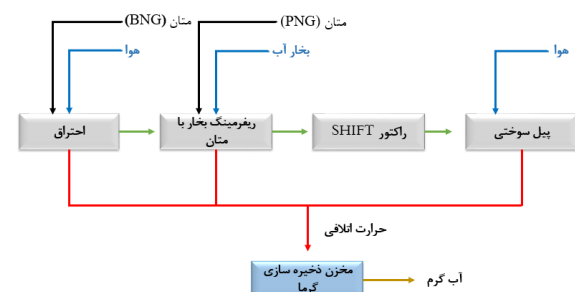


Fig. 1 Micro CHP outline

شکل ۱ شماتیک کلی سیستم micro CHP

برای جلوگیری از اتلاف انرژی اضافی راکتورها و افزایش راندمان کلی سیستم از هفت مبدل حرارتی استفاده شده است. مبرد اتانول گلیکول جهت استفاده از گرمای تولیدشده توسط پیل سوختی و انتقال آن در نظر گرفته شده است. در تحلیل‌ها و ارائه معادلات حاکم فرض شده است که از متان 100 % به عنوان سوخت استفاده می‌گردد و گونه‌های فرعی و تأثیرات آن‌ها بر عملکرد سیستم نادیده گرفته می‌شوند. این فرض دلالت بر این دارد که گونه‌های فرعی در مخلوط گاز ورودی به‌طور کامل در طول فرایندهای پیش‌تصفیه سوخت، برداشته می‌شوند. همچنین برای تجزیه و تحلیل سیستم‌های واکنشی گاز از روش پنگ-رابینسون که مدل مناسب و

1- Plug Flow Reactor(PFR)



$$\varepsilon_e = \frac{P_{stack} - P_{BOP}}{(\dot{m}_{PNG} + \dot{m}_{BNG}) \times LHV_{fuel}} \quad (15)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\dot{m}_{hrw} \times C_{p,w} \times (T_{hrw,in} - T_{hrw,out})}{(\dot{m}_{PNG} + \dot{m}_{BNG}) \times LHV_{fuel}} \quad (16)$$

$$\varepsilon_{CHP} = \varepsilon_e + \varepsilon_t \quad (17)$$

که در رابطه (15)، P_{BOP} توان مصرفی کل سیستم و P_{stack} نمایانگر توان تولیدی پیل سوختی بر اساس مقدار دبی هیدروژن و ولتاژ تعریف شده در این سیستم می باشد. که از رابطه (18) به دست می آید [3].

$$P_{stack} = \frac{z \cdot F \cdot V_{cell} \cdot \dot{m}_{H_2}}{\xi_a \times MW_{H_2}} \quad (18)$$

در ادامه اطلاعات کاتالیست های استفاده شده در واکنش ریفورمینگ در جدول 2 ارائه شده است.

جدول 3 مشخصات کاتالیست های راکتورهای ریفورمینگ [3]

Table 3 Catalyst properties of fuel reforming reactors [3]				
راکتور	نوع کاتالیست	گرما ویژه [J/kg K]	چگالی [kg/m ³]	محدوده دمای عملیاتی [°C]
SR	Ni - Al ₂ O ₃	930	3986	650-750
HTS	SHT - 4	421	7633	400-500
LTS	MDC - 7	475	6877	200-300

۳- نتایج مدل سازی

برای اطمینان از روند مدلسازی و نتایج حاصل از آن ابتدا صحت سنجی مورد نیاز صورت گرفته و نتایج شبیه سازی نشان می دهد که کسر مولی هیدروژن تولید شده برابر 79.38 درصد می باشد که در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی دارای خطای نسبی 1.32 درصد است [3]. در ادامه به بررسی نتایج حاصل از مدل سازی بر اساس معادلات حاکم بخش قبل و فرضیات صورت گرفته برای بررسی پارامترهای مورد نظر پرداخته می شود. با تغییر AFR و ثابت در نظر گرفتن دبی جرمی سوخت در سیستم ریفورمینگ، \dot{m}_{PNG} ، دبی جرمی آب راکتور ریفورمینگ، $\dot{m}_{SR,w}$ و دبی جرمی هوای ورودی، $\dot{m}_{B,air}$ ، تغییرات پارامترهای مختلف در جدول 4 نشان داده شده است. نتایج این جدول نشان میدهد که با افزایش AFR و در نتیجه آن کاهش مقدار دبی BNG منجر به انجام کامل سوخت در راکتور احتراق می شود و در نتیجه باعث افزایش دمای راکتورهای HTS و LTS و کاهش واکنش تبدیل مونوکسید کربن به دی اکسید کربن و هیدروژن می شود که این خود بر میزان کسر مولی و دبی هیدروژن تأثیر منفی می گذارد. همچنین افزایش میزان سوخت هیدروژن در پیل سوختی، توان و گرمای تولیدی را افزایش می دهد طوری که در برای نسبت هوا به سوخت 4.58 در SCR=4، به حداکثر راندمان حرارتی 41.05% قابل دستیابی است. علاوه بر آن منجر به افزایش میزان توان حرارتی و افزایش دمای آب بازیاب، T_{hrw} تا 97.15 درجه سانتیگراد می شود.

برای محاسبه ثابت تعادل K_{eq_i} ($i = 1, 2, 3$) از روابط (10) تا (12) که تابع دمای راکتور می باشد، استفاده شده است [6]:

$$K_{eq_1} = 1.198 \times 10^{13} \exp(-26830/T) \text{ bar}^2 \quad (10)$$

$$K_{eq_2} = 1.767 \times 10^{-2} \exp(4400/T) \text{ bar}^0 \quad (11)$$

$$K_{eq_3} = 2.117 \times 10^{11} \exp(-22430/T) \text{ bar}^2 \quad (12)$$

ثابت های مورد نیاز جهت محاسبه سرعت واکنش در جداول 1 و 2 ارائه شده است.

جدول 1 ثابت های سینتیکی واکنش های برای معادلات 4، 5، 6 [4, 5]

Table 1 Kinetic constants of reaction for Eqs. 4, 5, 6 [4, 5]			
انرژی فعال سازی	$A(k_i)$	کاتالیست	ردیف
240	$4.225 \times 10^{15} \text{ (kmol bar}^{0.5} \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ h}^{-1})$	Ni - Al ₂ O ₃	1
67.13	$1.955 \times 10^6 \text{ (kmol bar}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ h}^{-1})$	Ni - Al ₂ O ₃	2
70	$1.78 \times 10^{22} (1 - 0.0097SCR + 1.1364SCR^2) T^{-8} \text{ (kmol m}^{-3} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-2})$	SHT - 4	
35	$1.74 \times 10^{17} (1 - 0.154SCR + 0.008SCR^2) T^{-8.5} \text{ (kmol m}^{-3} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-2})$	MDC - 7	
243.9	$1.02 \times 10^{15} \text{ (kmol bar}^{0.5} \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ h}^{-1})$	Ni - Al ₂ O ₃	3

جدول 2 ثابت های رابطه (8) و نت هف [4]

Table 2 Van't hof constants in Eq. 8 [4]			
ثابت جذبی K_f	آنتالپی مخصوص جذبی $\Delta h_f \text{ kJ/mol}$	$A(K_f)$	
0.1791 bar^{-1}	-38.28	$6.65 \times 10^{-4} \text{ bar}^{-1}$	CH ₄
40.91 bar^{-1}	-70.65	$8.32 \times 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$	CO
0.0296 bar^{-1}	-82.90	$6.12 \times 10^{-9} \text{ bar}^{-1}$	H ₂
0.4152 bar^0	88.68	$1.77 \times 10^5 \text{ bar}^{-0}$	H ₂ O

پارامتر نسبت هوا به سوخت و نسبت دبی مولی آب به دبی مولی متان که به صورت روابط (13) و (14) محاسبه می شود [3]:

$$AFR = \frac{\dot{m}_{air}/MW_{air}}{\dot{m}_{BNG}/MW_{BNG} + \dot{m}_{AOG}/MW_{AOG}} \quad (13)$$

$$SCR = \frac{\dot{m}_{H_2O}^{SR,in}/MW_{H_2O}}{\dot{m}_{PNG}/MW_{CH_4}} \quad (14)$$

همچنین طبق معادلات (15) تا (17) راندمان الکتریکی، حرارتی و کل محاسبه می گردد.



جدول ۴ تاثیرات پارامتر AFR راکتور احتراق در عملکرد پیل سوختی در حالت $\dot{m}_{B,air} = 8.536 \text{ kg/h}$ و $\dot{m}_{SR,w} = 3.865 \text{ kg/h}$ و $\dot{m}_{PNG} = 0.8587 \text{ kg/h}$

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

$$\dot{m}_{PNG} = 0.8587 \text{ kg/h} \text{ و } \dot{m}_{SR,w} = 3.865 \text{ kg/h} \text{ و } \dot{m}_{B,air} = 8.536 \text{ kg/h}$$

ε_{CHP} [%]	ε_t [%]	ε_e [%]	P_{stack} [kW]	T_{hrw} [C°]	دبی هیدروژن [kg/h]	توان راکتور احتراق [kW]	کسر مولی هیدروژن [%]	دبی جرمی BNG [kg/h]	AFR
72.46	40.97	31.49	5.796	97.02	0.4152	4.062	79.38	0.4293	4.14
72.51	41.01	31.50	5.7978	97.08	0.4153	4.08	79.39	0.3864	4.22
72.56	41.05	31.51	5.799	97.15	0.4154	4.09	79.39	0.3177	4.58

LTS رابطه (2) نشان از گرماده بودن واکنش می‌دهد، افزایش SCR باعث کاهش دمای آن می‌شود. و خود این مساله باعث تبدیل بیشتر مونوکسید کربن به دی‌اکسید کربن و هیدروژن می‌شود. در حالت کلی افزایش SCR باعث تولید بیشتر هیدروژن و کاهش بیشتر مونوکسید کربن می‌شود. همچنین مقدار توان الکتریکی آن به دلیل افزایش مقدار هیدروژن افزایش و مقدار توان حرارتی آن با توجه به کاهش دمای خروجی راکتور HTS کاهش پیدا می‌کند.

یکی دیگر از پارامترهای مورد مطالعه در این زمینه مقدار SCR در قسمت SR سیستم ریفورمینگ می‌باشد که مقدار آن را در دو حالت مختلف بررسی شده و نتایج آن در جدول 5 نشان داده شده‌است. با توجه به جدول 5 افزایش مقدار SCR مقدار بخار موجود در راکتور SMR را افزایش می‌دهد. بنابراین بیشتر انرژی حاصل از راکتور احتراق صرف افزایش دمای آن می‌شود. همچنین با توجه به رابطه (1) و گرماگیر بودن آن مقدار تولید هیدروژن کاهش می‌یابد. اما در قسمت راکتورهای HTS و

جدول ۵ تاثیرات پارامتر SCR در سیستم ریفورمینگ در حالت $\dot{m}_{B,air} = 8.536 \text{ kg/h}$ و $\dot{m}_{BNG} = 0.4293 \text{ kg/h}$ و $\dot{m}_{PNG} = 0.8587 \text{ kg/h}$

Table 4 Effects of SCR parameters on the performance HT-PEMFC in $\dot{m}_{PNG} = 0.8587 \text{ kg/h}$, $\dot{m}_{BNG} = 0.4293 \text{ kg/h}$ و $\dot{m}_{B,air} = 8.536 \text{ kg/h}$

P_{stack} [kW]	ε_e [%]	ε_t [%]	ε_{CHP} [%]	SR	HTS	LTS		SCR	\dot{m} [kg/h]
5.796	31.49	40.98	72.47	0.47	0.47	0.47	$CH_4(\%)$	4	3.865
				36.87	30.83	30.17	$H_2O(\%)$		
				7.03	0.98	0.32	$CO(\%)$		
				6.91	12.08	13.62	$CO_2(\%)$		
				0.3650	0.4103	0.4152	$H_2(kg/h)$		
5.944	32.06	40.39	72.45	0.06	0.06	0.06	$CH_4(\%)$	4.48	4.638
				41.93	36.84	36.58	$H_2O(\%)$		
				5.79	0.7	0.44	$CO(\%)$		
				6.97	12.16	14.33	$CO_2(\%)$		
				0.3508	0.4036	0.4258	$H_2(kg/h)$		

HTS و LTS میزان تبدیل مونوکسید کربن کاهش پیدا کرد و تأثیر منفی در عملکرد پیل سوختی گذاشت. همچنین با بررسی میزان SCR در دو حالت متفاوت 4 و 4.8 نتایج نشان داد که با افزایش میزان SCR مقدار بخار موجود در راکتور SR افزایش پیدا کرد. بنابراین مقدار بیشتر از توان تولیدی راکتور احتراق، صرف آن می‌شد. در نتیجه واکنش SMR کامل انجام نمی‌شد و میزان هیدروژن تولیدی کاهش پیدا کرد. ولی کاهش دمای ورودی به دو راکتور HTS و LTS باعث تبدیل بیشتر مونوکسید کربن به دی‌اکسید کربن و هیدروژن شد. در کل میزان هیدروژن تولید شده به مقدار 2.55 درصد افزایش پیدا کرده و درصد کسر مولی مونوکسید کربن به مقدار 37.5 درصد کاهش پیدا می‌کند و این خود، مقدار راندمان الکتریکی را 1.8 درصد بهبود بخشد. ولی با توجه به کاهش دمای T_{hrw} مقدار راندمان حرارتی کاهش یافت.

۴- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله، به طراحی یک سیستم micro CHP بر پایه پیل سوختی غشا پروتونی دما بالا (PBI)، همراه با سیستم ریفورمینگ بخار آب و متان توسط نرم‌افزار ASPEN Hysys پرداخته شد. که پارامترهای SCR و AFR و تأثیر آن‌ها بر راندمان الکتریکی و حرارتی سیستم، و میزان مونواکسید کربن موجود در سوخت ورودی پیل سوختی بررسی شد. در بررسی مقدار AFR در سه حالت مختلف 4.14، 4.22 و 4.58 نتایج نشان داد که افزایش آن منجر به انجام کامل واکنش احتراق می‌شد. و در نتیجه میزان توان تولیدی برای راکتور SR افزایش پیدا می‌کرد و در نتیجه افزایش میزان هیدروژن تولیدی منجر به افزایش توان و راندمان الکتریکی می‌شد. راندمان حرارتی به میزان 8.2 درصد افزایش پیدا می‌کند. ولی با توجه به افزایش دمای راکتورهای



۵- 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 -Al₂O₃ catalyst," *Chemical Engineering Journal*, vol. 82, no. 1-3, pp. 311-328, 2001.