DOR: 20.1001.1.24234931.1400.8.2.11.7
Archive of SID

مقاله ترویجی
تاریخ دریافت: ۹۹/۰۵/۱۶
تاریخ پذیرش: ۰۰/۰۳/۲۱

سال هشتم، شماره دوم، پاییز و زمستان ۱۴۰۰، ص ص ۱۰۱- ۱۰۹
فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو
jrenew.ir

مروری بر روش‌های مدرن تولید و ذخیره‌سازی هیدروژن و استفاده از آن به عنوان منبع انرژی پایدار

فرهاد مالکی [۱]، زهرا اکبری[۱]، علی فرزانه[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی شیمی و انرژی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران
* قوچان، ۹۴۷۷۱-۶۷۳۳۵، alifarzaneh@qiet.ac.ir

چکیده

با افزایش سطح رفاه و توسعه‌ی اقتصادی جوامع، تامین انرژی پایدار به عنوان موتور محرک رشد به یکی از چالش‌های اساسی بشر تبدیل شده است. در دهه‌های اخیر مصرف بی رویه سوخت‌های فسیلی نگرانی‌هایی را در مورد امنیت انرژی و تغییرات آب و هوایی ایجاد کرده‌است. از این رو استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و پایدار در اولویت قرار گرفته‌است. یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر که از راندمان تبدیل بالایی برخوردار است فناوری هیدروژن و پیل سوختی می‌باشد. تولید انرژی الکتریکی از سایر منابع تجدیدپذیر نظیر باد، خورشید، برق‌آبی و زمین‌گرمایی به دلیل وابستگی به شرایط محیطی و اقلیمی دارای محدودیت‌های متعددی هستند. در میان گزینه‌های سبز معرفی شده، هیدروژن به دلیل فراوانی و تنوع منابع تولید، به گزینه‌ای منطبق بر مولفه‌های توسعه پایدار برای تولید و ذخیره انرژی تبدیل شده است. هیدروژن به دلیل بهره‌وری انرژی بالقوه بالا و تولید آلاینده‌های کم، یک حامل انرژی جذاب برای تولید انرژی الکتریکی و کاربردهای حمل و نقل محسوب می‌شود. در حال حاضر بخش اعظم (بیش از ۹۰ درصد) هیدروژن مورد نیاز از منابع هیدروکربنی تولید می‌شود. تقاضای جهانی برای مصرف هیدروژن حدود ۷۰ میلیون تن می‌باشد که بیش از ۹۳ درصد آن صرف پالایش سوخت‌های فسیلی و تولید مواد شیمیایی می‌شود. در این پژوهش به بررسی فرایندهای مطرح در حوزه‌ی تولید و ذخیره‌سازی هیدروژن پرداخته شده‌است.

کلیدواژگان: سوخت‌های فسیلی، انرژی تجدیدپذیر، تولید هیدروژن، ذخیره‌سازی، پیل‌های سوختی

An overview on state-of-the-art methods for production and storage of hydrogen as a sustainable

Farhad Maleki[1], Zahra Akbari[1], Ali Farzaneh[2*]

1- Bachelor student of Energy department, Quchan University of Technology, Quchan, Iran
2- Assistant Professor, Department of Chemical and Energy, Quchan, University of Technology, Quchan, Iran

* P.O.B. 94771-67335 Quchan, Iran, alifarzaneh@qiet.ac.ir
Received: 6 August 2020 Accepted: 11 June 2021

Abstract

With the growing level of welfare and economic development of societies, sustainable energy supply as a driver of growth has become one of the fundamental human challenges. In recent decades, excessive consumption of fossil fuels has raised concerns about energy security and climate change. Therefore, the use of renewable and sustainable energy sources has become a priority. One of the renewable sources of energy that has high conversion efficiency is hydrogen and fuel cell technology. Electricity generation from other renewable sources such as wind, solar, hydropower, and geothermal has several limitations due to their dependence on environmental and climatic conditions. Among the introduced green options, hydrogen has converted to an option that meets the essentials of sustainable development for energy production and storage because of its abundance and diversity of production sources. Hydrogen is an attractive energy carrier for electricity generation and transportation applications due to its high potential energy efficiency and low emissions. Currently, most of the hydrogen needs (more than 90 percent) are produced from hydrocarbon sources. The global demand for hydrogen is about 70 million tons, of which more than 90 percent is spent on refining fossil fuels and producing chemicals. In this research, the hydrogen production and storage processes have been studied.
Keywords: fossil fuels, renewable energy, hydrogen production, storage, fuel cells

www.SID.ir
مالکیت معنوی این مقاله تحت گواهی بین المللی تخصیص ۴ کریتیو کامنز محفوظ است

Archive of SID

۱- مقدمه

چوب، زغال سنگ، گاز طبیعی و نفت، از منابع تجدیدناپذیر انرژی می‌باشند و مدت طولانی است که مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. بیش از ۸۰٪ انرژی مصرفی از طریق این سوخت‌ها تامین می‌شود [۲]. این منابع به سرعت در حال کاهش و اتمام می‌باشند و محققان در حال مطالعه جهت یافتن سوخت‌های جایگزین و کم آلاینده می‌باشند [۳]. امنیت انرژی، سازگار بودن آن با محیط زیست و قیمت مناسب آن امروزه به یک امر مهم برای بسیاری از کشورها تبدیل شده‌است. برای این منظور انرژی‌های تجدیدپذیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. انرژی خورشیدی و بادی به دلیل بلوغ نسبی فناوری‌های بهره‌برداری از آن‌ها و دسترسی مطلوب بیشترین سهم از منابع تجدیدپذیر را به خود اختصاص داده‌اند [۴]. بنابراین توسعه منابع جدید انرژی به دلیل مسائل زیست محیطی امری ضروری می‌باشد. برای تولید توان، فناوری‌هایی نظیر پیل‌های سوختی در حال گسترش بوده و به عنوان یکی از سیستم های آتی تولید انرژی پاک شناخته شده‌اند. امروزه با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در فناوری پیل‌های سوختی، نیاز به هیدروژن به عنوان سوخت در این سیستم‌ها افزایش یافته‌است. ذخایر اثبات‌شده زغال‌سنگ، نفت و گازطبیعی جهان تقریباً پاسخگوی ۲۰۰، ۴۰ و ۶۰ سال نیاز در نرخ مصرف فعلی می‌باشند. در یک دهه اخیر، اوج تولید نفت‌خام در سال ۲۰۱۸ بوده‌است. در این سال میزان تولید نفت خام به ۳/۹۶ و در سال ۲۰۱۹ به ۳/۹۳ بیلیون تن رسید [۵]. در شرایط فعلی، حدود ۸۰٪ کل تأمین انرژی اولیه و ۶۰٪ تولید برق بر پایه سوخت‌های فسیلی طبیعی است. افزایش تولید CO_2 به دلیل سوزاندن زغال‌سنگ نفتی، تهدید جدی برای تغییرات آب و هوایی است [۶]. در سال های اخیر، خطر بالقوه اتمام سوخت‌های فسیلی تبدیل به چالشی جدی شده‌است. در سال ۱۹۴۹، هابرت[1] برای اولین بار تمایل به کاهش سوخت‌های فسیلی را پیش‌بینی کرد [۷]. از جمله کاربردهای هیدروژن می‌توان به گوگردزدایی، از گاز طبیعی، سنتز آمونیاک و سنتز متانول، در صنعت پتروشیمی برای اصلاحات نفت خام در صنایع به عنوان یک عامل کاهنده در پزشکی به عنوان ضد عفونی کننده‌های روغن نباتی هیدروژنه در صنایع غذایی در صنعت کود و رنگ، سوخت موتورهای موشکی یک مایع خنک‌کننده در ژنراتورهای برقی، کاربرد جدید هیدروژن در بازیافت پلاستیک و استفاده به عنوان سوخت در پیل‌های سوختی نیز می‌توان استفاده کرد [۸-۱۰].

۲- معرفی هیدروژن

هیدروژن به عنوان فراوان‌ترین عنصر در جهان و دهمین عنصر فراوان در پوسته زمین در ترکیب با سایر عنصرها یافت می‌شود. تقریباً ۷۵٪ از کل ماده را تشکیل می‌دهد. هیدروژن دارای سه ایزوتوپ به نام‌های، پروتیوم، دوتریوم و تریتیوم می‌باشد. پروتیوم با تشکیل یک پروتون و یک الکترون، ماده اصلی هیدروژن، ساده‌ترین عنصر است. اگرچه هیدروژن سبک‌ترین عنصر شناخته می‌شود، اما هیدروژن بیشترین میزان انرژی را در هر واحد وزن در بین تمام سوخت‌ها دارد [۱۱]. در جدول ۱ به معرفی برخی از ویژگی‌های مهم عنصر هیدروژن و ایزوتوپ‌های آن پرداخته شده‌است.

جدول ۱ اطلاعات اتمی ایزوتوپ‌های هیدروژن [۱۲]

مشخصات	پروتیوم	دیتریوم	تریتیوم
جرم اتمی	۱/۰۰	۲/۰۱	۳/۰۱
فراوانی طبیعی (٪)	۹۹/۹۸	۰/۰۱	$\approx 10^{-18}$
نیمه عمر			۱۲/۲۶
انرژی یونیزاسیون	۱۳/۵۹	۱۳/۶۰	۱۳/۶۰
مقطع عبوری از نوترون حرارتی $(\times 10^{-24} cm)$	۰/۳۲	$۰/۵۱\times10^{-3}$	$<۶\times10^{-6}$
چرخش هسته‌ای	$+\frac{1}{2}$	+۱	$+\frac{1}{2}$
لحظه مغناطیسی هسته ای ، آهنرباهای هسته ای	+۲/۷۹	+۰/۸۵	+۲/۹۷

۳- روش‌های تولید هیدروژن

هیدروژن به عنوان یک عنصر تشکیل دهنده زمین نقش مهمی در حیات دارد . امروزه از این عنصر به عنوان یک گاز صنعتی استفاده می شود در برخی از صنایع از هیدروژن به عنوان خوراک استفاده می‌شود.

چندین فرآیند جهت تولید هیدروژن وجود دارد. هیدروژن را می‌توان از سوخت‌های فسیلی، الکل، هیدروکربن‌ها و متان تولید کرد [۱۳-۱۵]، اکسیداسیون جزئی از ته مانده‌های سنگین روغنی و زغال‌سنگ [۱۶،۱۷]، زیست توده (بیوگاز) [۱۸،۱۹]، الکترولیز [۲۰،۲۱]، هیدروژن سولفید [۲۲] و انرژی تجدیدپذیر [۲۳] می‌باشد. در این پژوهش به معرفی برخی از روش‌های تولید هیدروژن در ایران پرداخته می‌شود.

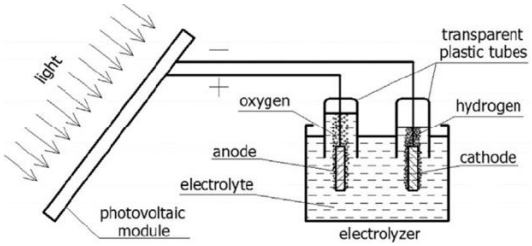
۳-۱- الکترولیز

الکتروشیمی با الکترولیز شروع می‌شود مطالعات عملی و نظری در سال‌های اولیه قرن نوزدهم انجام شده است. معادله گیبس- هلمهلتز $dG=dH-TdS$ ترمودینامیک واکنش را نشان می‌دهد. بر طبق این معادله برای T های بسیار بزرگ است که امکان تجزیه خود به خودی رخ می‌دهد [۲۴]. یکی از روش‌های تولید هیدروژن استفاده از خورشید است که به چهارنوع اصلی فتوولتائیک، انرژی حرارتی خورشیدی، الکترولیز و بیو فوتالیز طبقه بندی می‌شود. از سال ۱۹۷۰ استفاده از سلول‌های فتوولتائیک برای تولید H_2 آغاز شده است [۲۵]. با استفاده از برق مولکول‌های آب تقسیم می‌شوند و هیدروژن تولید می‌شود. واحد اصلی الکترولیز آب شامل یک کاتد، یک آند، منبع تغذیه و الکترولیت می‌باشد [۲۶]. در شکل ۱ نمای یک واحد تولید هیدروژن با سلول فتوولتائیک نمایش داده شده است. از چالش‌های این فناوری می‌توان به هزینه بالای پنل-های خورشیدی و برق تولید شده نسبت به هیدروژن تولید شده هزینه بالایی دارد.

1. Hobbert

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱ نمای یک واحد تولیدهیدروژن با سلول‌های فتوولتائیک [۲۷].

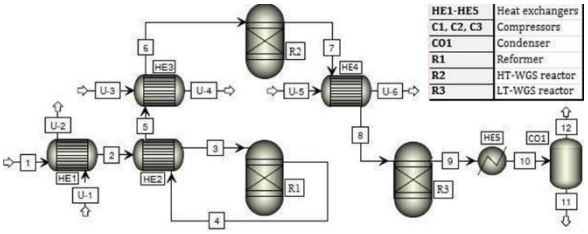
در این روش با عبور جریان الکتریکی از درون الکترود موجود در درون آب، مولکول‌های آب تجزیه شده و هیدروژن و اکسیژن تولید می‌شود [۲۸] که این هیدروژن تولید شده به دلیل خلوص بالایی که دارد می‌تواند در صنایع دارویی، مصارف پزشکی و صنایع حساس غذایی مورد استفاده قرار گیرد [۲۹].

۳-۲- فرآیند اصلاح متان بخار[1]

گازطبیعی یکی از منابع فسیلی محسوب می‌شود که در مخازن متخلخل زیر زمینی در برخی مناطق در پوسته زمین یافت می‌شود [۳۰]. هیدروژن به صورت تجاری از گاز متان تولید می‌شود. گاز متان بخش عمده‌ای از گازطبیعی را تشکیل می‌دهد. واکنش تشکیل هیدروژن از گاز متان به شرح زیر می‌باشد [۳۱]:

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2 \qquad (۱)$$

در این فرآیند از انرژی گرمایی برای جداسازی هیدروژن از کربن با استفاده از بخار آب و بر روی کاتالیزور استفاده می‌شود. فرآیند SMR از لحاظ صنعتی یک فرآیند کارآمد می‌باشد. در شکل ۲ نمای یک واحد اصلاح متان بخار آورده شده است.



شکل ۲ نمای یک واحد SMR [۳۲]

هزینه تولید هیدروژن با روش SMR نسبت به سایر روش‌ها در صورت عدم نوسان قیمت گازطبیعی مقرون به صرفه می‌باشد [۳۳]. کاتالیزور مورد استفاده در این فرآیند نیکل می‌باشد. مهم‌ترین عیب این فرآیند ایجاد کک بر کاتالیست می‌باشد [۲۸].

۳-۳- تولید هیدروژن از هیدروژن سولفید

هیدروژن سولفید یکی از ترکیبات همراه نفت و گازطبیعی می‌باشد. که آزادسازی و عدم تصفیه آن باعث مشکلات زیست‌محیطی می‌گردد. هیدروژن سولفید می‌تواند برکیفیت هوا تاثیرگذارد و باعث بارش باران اسیدی شود [۳۴]. در دهه ۱۹۷۰ ترمولیز مستقیم برای بازیافت هیدروژن و گوگرد به فرم H_2S پیشنهاد شد. با توجه به ناپایدار بودن مولکول H_2S با مقدار مشخصی از انرژی می‌توان پیوندهای بین H و S را شکاند. بر این اساس تجزیه حرارتی در دمایی حدود ۱۰۰۰°C انجام می‌شود [۳۵]:

$$H_2S \rightarrow (H_2 + S) \quad \Delta G = 33.3 \frac{kJ}{mol}, \Delta H = 20.4 \frac{kJ}{mol} \qquad (۲)$$

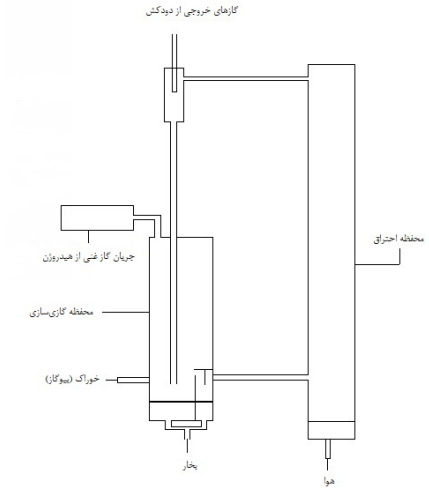
(T = 298 K)

۳-۴- تولید هیدروژن از بیوگاز

یکی از منابع احتمالی که برای تولید هیدروژن در نظر گرفته می‌شود، بیوگاز است؛ بیوگاز به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر نسبت به سوخت‌های فسیلی دارای تاثیرات کمتر زیست‌محیطی می‌باشد. بیوگاز با داشتن کربن خنثی و مقدار کم گوگرد هیدروژن تولید می‌کند [۳۶]. زیست‌توده در دمای بالای $1000\,K$ گازی کرده. مراحل تبدیل فرآیند آن به شرح زیر می‌باشد:

بیوگاز+ گرما+ بخار آب← هیدروژن+ کربن‌منواکسید+ کرین‌دی اکسید+ هیدروکربن‌های سبک و سنگین+ char [۳۷].

فرآیند گازی‌سازی برای زیست توده (بیوگاز) با رطوبت کمتر از ۳۵٪ قابل استفاده است. در صورتی که رطوبت بیشتر باشد با استفاده از خشک کردن یا پیش گرم کردن می‌توان رطوبت را کاهش داد. با این حال انرژی مورد نیاز برای گازی سازی افزایش می‌یابد که باعث کاهش بهره‌وری می‌شود [۳۸]. در شکل ۳ نمای تولید یک واحد تولید هیدروژن از زیست توده (بیوگاز) نمایش داده شده است.



شکل ۳ نمای یک واحد تولید هیدروژن از بیوگاز

۳-۵- اکسیداسیون جزئی[2]

اکسیداسیون جزئی یک واکنش گرمازا با اکسیژن و بخار می‌باشد. در این فرآیند میزان اکسیژن و بخارآب به گونه‌ای کنترل می‌شود که واکنش بدون نیاز به انرژی خارجی انجام شود برای مثال[۳۹]:

$$2C_8H_{18} + 2H_2O + 9O_2 \rightarrow 12CO + 4CO_2 + 2OH_2 \qquad (۳)$$

اکسیداسیون جزئی می‌تواند انواع سوخت‌ها مانند زغال‌سنگ و مواد نفتی باقی مانده کنترل کند و بدون حضور کاتالیزو عمل نماید و معمولا دمای آن ۱۲۰۰-۱۵۰۰°C و فشار ۸۰-۲۵ bar برای جلوگیری از تشکیل دوده و کربن انجام می‌شود. کاتالیزورهای این فرآیند معمولا نیکل یا رودیوم هستند [۴۰]. نتایج بررسی‌ها نشان داده‌است در بین هیدروکربن‌ها بیشترین بازده تبدیل متان به هیدروژن، مربوط به روش SMR می‌باشد. در این فرآیند بازده تبدیل در حدود ۹۸٪ بوده است. در حدود ۹۸٪ کل هیدروژن تولید شده در جهان از سوخت‌های فسیلی بدست می‌آید. بیش از ۹۰٪ از هیدروژن تولید شده در

1. Steam methane reforming (SMR)
2. Partial oxidation (POX)

www.SID.ir

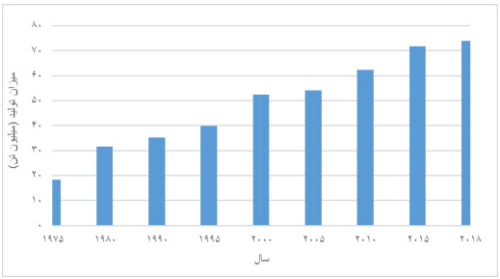
Archive of SID

جهان به عنوان یک فرآورده شیمیایی شناخته می‌شود و کمتر از ۱۰٪ از آن به عنوان سوخت مورد استفاده قرار می‌گیرد. این به آن معنی می‌باشد که ۹۰٪ از هیدروژن تولید شده در همان محل تولید مورد استفاده قرار می‌گیرد و وارد بازار نمی‌شود [۴۱]. برای مثال در نیروگاه‌های حرارتی نیز هیدروژن تولید می‌شود، که برای خنک‌سازی ژنراتور برق مورد استفاده قرار می‌گیرد. در پالایشگاه‌ها نیز عمده هیدروژن تولید شده صرف فرآورش و تولید سایر محصولات می‌شود. در جدول ۲ میزان گازطبیعی مصرف شده در واحدهای هیدروژن‌سازی ایران از سال ۱۳۸۸-۱۳۹۶ آورده شده‌است.

جدول ۲ مصرف گازطبیعی در واحدهای هیدروژن‌سازی ایران [۴۲]

سال	مقدار مصرف(میلیون متر مکعب)
۱۳۸۸	۶۵۴
۱۳۸۹	۷۱۲
۱۳۹۰	۸۰۸
۱۳۹۱	۶۸۲
۱۳۹۲	۷۹۰
۱۳۹۳	۳۶۵
۱۳۹۴	۵۸۰/۴
۱۳۹۵	۶۰۷/۶
۱۳۹۶	۵۴۰

تقاضا برای هیدروژن از سال ۱۹۷۵ بیش از ۳ برابر رشد داشته‌است. ۶٪ از هیدروژن جهان از طریق گازطبیعی، ۲٪ از طریق زغال‌سنگ و مابقی از سایر منابع (هیدروکربنی و الکترولیز) تامین می‌شود. در حال حاضر تقاضای جهانی برای مصرف هیدروژن ۷۰ میلیون تن می‌باشد [۴۳]. در شکل ۴ تقاضای جهانی هیدروژن خالص از سال ۲۰۱۸-۱۹۷۵ آورده شده است.



شکل ۴ تقاضای جهانی برای هیدروژن خالص از سال ۲۰۱۸-۱۹۷۵ [۵]

۴- فناوری ذخیره‌سازی هیدروژن

هیدروژن جز فراوان‌ترین عنصرها در زمین می‌باشد. هیدروژن یکی از گزینه‌های قطعی برای جایگزین شدن با سوخت‌های فسیلی می‌باشد. از این رو باید شرایطی را ایجاد کرد تا بتوان این منبع پاک انرژی را ذخیره کرد. در شکل ۵ فناوری‌های رایج در زمینه ذخیره‌سازی هیدروژن نمایش داده شده‌است.

شکل ۵ طبقه بندی فناوری ذخیره سازی هیدروژن [۴۴]

۴-۱- هیدرید کمپلکس

در ذخیره‌سازی هیدروژن به روش هیدریدهای کمپلکس تراکم جرم و حجم هیدروژن نسبت به آلیاژها اولویت دارد. به عنوان نمونه، در ذخیره‌سازی به روش هیدرید کمپلکس در مخزنی که حاوی هیدروژن می‌باشد از هیدرید سدیم[1] و لیتیم آلومینیوم هیدرید[2] با درصد وزنی هیدروژن ۷/۴ و ۱۰/۵ استفاده می‌نماییم. این روش، یکی از روش‌های ذخیره‌سازی موفق هیدروژن در آینده می‌تواند باشد [۴۵،۴۶].

۴-۲- مایع‌سازی هیدروژن

برای قرار دادن هیدروژن در فاز مایع دمای آن حداقل می‌بایست ۲۵۳°C- باشد هیدروژن در فاز مایع بی رنگ بوده و به ذخیره‌سازی کریوژنیک نیاز دارد. مخازن هیدروژن مایع می‌توانند $\frac{kg}{l}$ ۰/۰۷۰ هیدروژن مایع را در مقایسه با $\frac{kg}{l}$ ۰/۰۳۰ هیدروژن فشرده در خود ذخیره کنند. برای حفظ دمای زیر صفر درجه مخازن هیدروژن به خوبی عایق بندی می‌شوند [۴۷].

۴-۳- ذخیره‌سازی هیدروژن به صورت فشرده

چهار نوع مخزن تحت فشار وجود داردکه می‌توان از آن‌ها برای ذخیره‌سازی هیدروژن استفاده کرد.

نوع اول- مخازن تحت فشار کاملا فلزی: این نوع مخازن معمولی ترین، ارزان ترین و در عین حال سنگین‌ترین نوع مخازن هستند. جنس این مخازن معمولا آلومینیوم یا فولاد می‌باشد و می‌توانند فشارهایی تا ۵۰ MPa تحمل نمایند.

نوع دوم- مخازن تحت فشار فولاد با یک کامپوزیت الیاف شیشه: فولاد و مواد کامپوزیت در حدود یکسان بار ساختاری دارند. ساخت این نوع مخازن نسبت به مخازن نوع اول تقریبا ۵۰٪ هزینه بیشتری دارد. مخازن نوع دوم بیشترین تحمل فشار را دارند.

نوع سوم- بسته بندی کاملا کامپوزیتی با بوش فلزی: عمده بار سازه توسط ساختار کامپوزیتی تحمل می‌شود و از بوش آلومینیومی برای آب بندی استفاده می‌شود. این نوع مخازن با بوش فلزی ۵٪ بار مکانیکی مخزن را دارا می‌باشد و برای فشار کاری ۴۵ MPa قابل استفاده می‌باشد.

نوع چهارم- کاملا کامپوزیتی: معمولا از پلیمر مانند پلی اتیلن با چگالی بالا به عنوان بوش استفاده می‌شود و کامپوزیت‌های الیاف کربن یا شیشه کربن برای حمل بار ساختاری استفاده می‌شود. این نوع مخازن سبک و در عین حال قیمت نسبتا بالایی دارند و می‌توانند تا ۱۰۰MPa فشار تحمل کنند [۴۵].

1. $NaALH_4$
2. $LiALH_4$

www.SID.ir

Archive of SID

۴-۴- هیدریدهای فلزی

یکی از راه‌های تولید هیدروژن هیدرید کلسیم می‌باشد که واکنش آن به شرح زیر می‌باشد:

$$CaH_2 + 2H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 2H_2 \quad (۴)$$

هیدروژن موجود در هیدرید توسط آب آزاد می‌شود. هیبریدهای سدیم و لیتیوم نیز برای آزادسازی هیدروژن با آب واکنش می‌دهند و به عنوان مواد ذخیره ساز استفاده می‌شوند [۴۵].

۴-۵- ذخیره‌سازی جامد

مواد جامد می‌توانند هیدروژن را به طور برگشت‌پذیر جذب و یا آزاد نمایند. در سیستم ذخیره‌سازی حالت جامد، هیدروژن را با جذب فیزیکی یا جذب شیمیایی، جذب می‌شوند. نانو لوله‌های کربنی، الیاف، فولرن‌ها، زئولیت، چارچوب‌های فلزی-آلی و همچنین چارچوب‌های ارگانیک کووالانسی و اخیرا پلیمرهای ریز پاشی درونی (PiM_s) می‌توانند هیدروژن را در صورت نیاز به تحریک حرارتی یا روش‌های دیگر آزاد کرد ظرفیت پایین ذخیره‌سازی هیدروژن در شرایط محیط و نیاز به دمای بسیار پایین هیدروژن از محدودیت-های این روش محسوب می‌شود. با این حال هیدریدهای فلزی یکی از مقرون به صرفه ترین روش‌های ذخیره‌سازی هیدروژن شناخته شده اند [۴۸].

۵- معیارهای اولویت بندی پیل سوختی در کاربرد نیروگاهی

یکی از مهم ترین کاربردهای پیل سوختی، استفاده از آن برای تولید الکتریسیته در مقیاس نیروگاهی می‌باشد. البته از فناوری پیل سوختی جهت تولید توان در مقیاس کوچک هم می‌توان استفاده نمود. در این پژوهش ابتدا به معرفی مختصر از نیروگاه‌های پیل سوختی پرداخته خواهد شد و سپس پیل‌های سوختی مورد استفاده در این نیروگاه ها مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۶- تعریف انواع نیروگاه‌های پیل سوختی

نیروگاه‌های پیل سوختی به دو دسته کلی تقسیم بندی می‌شوند:

۱- نیروگاه های تولید توان متمرکز

۲- نیروگاه های تولید توان توزیع شده

نیروگاه تولید توان متمرکز، نیروگاهی که الکتریسیته تولیدی آن توسط خطوط انتقال به مراکز مصرف منتقل می‌شود و توان خروجی آن دربازه ۵ تا ۵۰۰ مگاوات می‌باشد.

نیروگاه تولید توان توزیع شده، نیروگاهی که الکتریسیته تولیدی در محل مصرف و یا نزدیک آن قرار دارد. واحدهای کوچک مصرف کننده الکتریسیته مانند منازل مسکونی، مراکزتجاری از این نوع نیروگاه‌ها استفاده می‌نمایند توان خروجی این نوع نیروگاه ها در بازه ۲۰۰ کیلووات تا ۲۰ مگاوات می‌باشد [۴۹].

۷- ارزیابی پیل‌های سوختی مورد استفاده در نیروگاه‌های پیل سوختی

در جدول ۳ ویژگی‌های انواع پیل‌های سوختی متناسب با نوع کاربرد، دمای عملیاتی و ویژگی‌های فنی هر یک آورده شده‌است. همانطور که ملاحظه می‌شود، پیل‌های سوختی دما بالا برای کاربردهای نیروگاهی و دما پایین برای کاربردهای خانگی و حمل و نقل مورد استفاده قرار می‌گیرند.

جدول ۳ ویژگی های پیل های سوختی توان متمرکز و و توان توزیع [۴۹-۵۲]

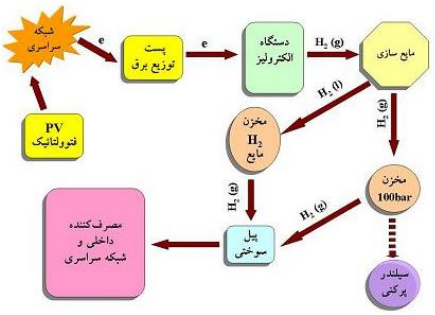
نوع پیل سوختی	نوع کاربرد	دمای عملیاتی°C	ویژگی‌های فنی
الکترولیت پلیمری	خانگی، حمل و نقل و تجهیزات الکترونیکی قابل حمل	دمای عملیاتی پایین ۳۰- ۱۰۰°C	محدودیت دمای عملیاتی غشا، مسمومیت الکتروکاتالیست، بازده در حدود ۵۵٪، الکترولیز و غشای گران، سهولت مدیریت الکترولیز
اسید فسفریک	نیروگاهی	۲۰۰°C	تولید همزمان برق و حرارت،الکترولیت مایع، دمای محیط باید بالای ۴۲ درجه سانتی گراد باشد
اکسید جامد	نیروگاهی	دمای عملیاتی بالا ۷۰۰-°C ۱۰۰۰	الکترولیت آن سرامیک و به صورت جامد است، زمان راه اندازی ۸ ساعت، بازده ۵۰-۶۰٪، عدم حساسیت به ناخالصی موجود درسوخت، تنوع سوخت مصرفی،تبدیل بازده بالا
کربنات مذاب	تولید توزیع شده برق، سامانه ترکیبی گرما و توان	۶۰۰-۷۰۰°C	عدم حساسیت به ناخالصی موجود در سوخت، ایجاد محیط خورنده، تنوع سوخت، بازده تبدیل بالا

www.SID.ir

Archive of SID

۸- نیروگاه پیل سوختی در ایران

به منظور توسعه و گسترش استفاده از انرژی‌های نو و سازگار با محیط زیست از سال ۱۳۸۰ در منطقه طالقان واقع در استان البرز یک نیروگاه با استفاده از انرژی هیدروژن و فناوری پیل سوختی به صورت پایلوت مورد راه اندازی قرار گرفت. فاز اول این پروژه با اهدافی نظیر، تولید هیدروژن با خلوص ۹۹/۹۹٪ به میزان $\frac{Nm^3}{hr}$ ۳۰، ذخیره‌سازی هیدروژن به ظرفیت m^3 ۲۰ و فشار bar ۱۰، تولید برق با استفاده از سیستم‌های پیل سوختی، راه اندازی یک واحد سلیندر پر کنی هیدروژن در سال ۱۳۸۷ مورد بهره‌برداری قرار گرفت. در واحد الکترولیز، هیدروژن مورد استفاده نیروگاه تولید می‌شود و سپس در به فاز مایع تبدیل می‌شود. هیدروژن مایع شده را می‌توان به دو فاز مایع و گاز به صورت مجزا به پیل سوختی تزریق نمود و برق تولید شده توسط پیل سوختی را به شبکه سراسری برق وصل نمود [۵۳،۵۴]. شکل ۶ به طور مختصر فرآیند تولید انرژی الکتریکی از طریق پیل سوختی و استفاده از سوخت هیدروژن در نیروگاه طالقان را نشان می‌دهد.



شکل ۶ فاز اول نیروگاه پیل سوختی طالقان [۵۳]

در مرداد ماه سال ۱۳۸۶ دو دستگاه پیل سوختی مجموعاً با ظرفیت kW ۲۵ از نوع پیل سوختی الکترولیت پلیمری در طالقان نصب و مورد بهره‌برداری قرار گرفت. در جدول ۴ برخی از ویژگی‌های فنی پیل سوختی پلیمری استفاده شده در سایت طالقان آورده شده‌است. شکل‌های ۷، ۸، ۹ و ۱۰ تجهیزات نصب شده در سایت طالقان می‌باشد.

شکل ۷ پیل سوختی۱/۲ کیلووات استفاده شده در نیروگاه طالقان [۵۵]

شکل ۸ مخزن گاز هیدروژن نیروگاه طالقان [55]

شکل ۹ پیل سوختی ۲۵ کیلووات مورد استفاده در نیروگاه طالقان [۵۵]

شکل ۱۰ الکترولیز ۲۰۰ کیلووات نیروگاه طالقان [۵۵]

جدول ۴ مشخصات هر دو دستگاه پیل سوختی نصب شده در طالقان [۵۴]

مشخصات	مقدار
محدوده ولتاژ خروجی	۳۶-۵۷ VDC
بیشترین جریان	۳۵۰A
راندمان پیل سوختی	۵۵٪
دمای کارکرد پیل سوختی	۵۵-۶۵ °C
میزان خلوص سوخت	۹۹٪
فشار ورودی	۵-۶ bar
وزن	۷۸ کیلوگرم
ابعاد	۸۳/۷×۴۲/۷×۳۸ سانتی‌متر

۹- بررسی معایب و مزایای انواع پیل‌های سوختی

پیل‌های سوختی انواع مختلفی دارند، که عملکرد و استفاده از آن‌ها با توجه به ساختار آن‌ها متفاوت است. اساس کار پیل‌های سوختی بسیار ساده به نظر می‌رسد. پیل سوختی، سوخت(هیدروژن) و اکسیژن را دریافت نموده و طی

www.SID.ir

Archive of SID

یک فرآیند الکتروشیمیایی، الکتریسیته تولید می‌نماید. گرما و آب از محصولات جانبی پیل سوختی می‌باشند. در جدول ۵ مزایا و معایب پیل‌های سوختی رایج آورده شده است.

جدول ۵ بررسی مزایا و معایب پیل‌های سوختی [۵۴،۵۵]

نوع پیل سوختی	مزایا	معایب
اسید فسفریک	ارزان بودن الکترولیت، عدم حساسیت به CO_2، زمان عملکرد طولانی	استفاده از کاتالیست گران قیمت پلاتین، حساسیت به مسموم شدن توسط منواکسید کربن و گوگرد، الکترولیت مایع خورنده
الکترولیت پلیمری	بکارگیری نفیون در الکترولیت، امکان اندک شکستن و ترک خوردگی الکترولیت، شرایط کاری دما پایین این پیل سوختی را برای کارکرد در حمل و نقل مناسب کرده است	حساسیت به CO و گوگرد جهت مسمومیت کاتالیست، استفاده کاتالیست گران قیمت پلاتین، مدیریت آب، غشای پیلمری گران قیمت
قلیایی	تولید ارزان قیمت، تنوع انتخاب در کاتالیست(نیکل، نقره و اکسید فلزات)	حساسیت زیاد آن به CO_2 موجود در هوا یا سوخت، استفاده از هیدروژن و اکسیژن خالص، نیاز به تجدید الکترولیت
کربنات مذاب	عدم استفاده از فلزات کمیاب در الکترود، کاتالیست ارزان قیمت نسبت به پیل سوختی قلیایی و پیل سوختی اسید فسفریک، حساسیت مسمومیت کمتری به CO دارند، تولید بخار و انتقال بخار حاصل به توربین جهت تولید الکتریسیته	پیچیدگی کار با الکترولیت، خوردگی، واکنش‌های شیمیایی باقی مانده، مواد نسبتا گران قیمت
اکسید جامد	تنوع در سوخت، راندمان بالا، تبدیل مستقیم سوخت‌های هیدروکربنی بدون نیاز به مبدل سوخت، کاتالیست ارزان قیمت، الکترولیت جامد	مواد و ساخت گران قیمت، محدودیت کاربرد در دماهای بالا، مسئله پوشش

۱۰- نتیجه‌گیری

طی تحقیقات و مطالعات انجام شده قدیمی ترین روش تولید هیدروژن الکترولیز می‌باشد و روش بیوگاز یکی از روش های احتمالی و مقرون به صرفه برای تولید هیدروژن در آینده می‌باشد. همچنین تولید هیدروژن در ایران به دلیل داشتن منابع عظیم هیدروکربنی با استفاده از روش SMR می‌تواند از لحاظ اقتصادی نسبت به روش الکترولیز به صرفه تر باشد. البته اگر انرژی الکتریکی مورد نیاز در روش الکترولیز از منابع انرژی تجدیدپذیر تامین شود، این روش نیز یک روش به صرفه جهت تولید هیدروژن در ایران می‌باشد. در پالایشگاه‌های ایران هیدروژن تولید شده بیشتر برای پالایش و فرآورش سایر محصولات به کار برده می‌شود و بیش از ۹۰٪ هیدروژن تولید شده در ایران در همان واحدهای تولیده شده مصرف می‌شوند. در نیروگاه‌های حرارتی نیز از هیدروژن تولید شده برای خنک‌سازی ژنراتور استفاده می‌شود. فرایندهای ذخیره سازی که به سه دسته شیمیایی، فیزیکی و جذب تقسیم می‌شود. در ذخیره‌سازی هیدروژن به روش فیزیکی این امکان فراهم می‌شود تا هیدروژن را در فازهای مایع و گاز به توان ذخیره نمود. با ذخیره‌سازی هیدروژن به صورت فاز مایع این امکان فراهم می‌شود تا حجم بیشتری هیدروژن ذخیره گردد. در روش ذخیره‌سازی جامد هیدروژن این امکان فراهم می‌شود تا هیدروژن در مواد جامد به صورت برگشت‌پذیر جذب یا آزاد شوند. این روش یکی از مقرون به صرفه‌ترین روش‌ها می‌باشد. سایر روش‌ها از جمله فشرده سازی، مایع سازی و هیدرید فلزی، دارای معایبی همچون هزینه بالا و بازده کم می‌باشند. در حال حاضر تنها نیروگاه هیدروژنی بهره‌برداری شده در کشور، با ظرفیت ۲۵ kW سایت طالقان می‌باشد که هیدروژن مورد نیاز خود را از با روش الکترولیز تامین می‌نماید. پیل‌های سوختی یکی از فناوری‌های نوید بخش قابلیت تبدیل مستقیم هیدروژن به انرژی الکتریکی را دارند. از نظر کارایی پیل‌های الکتولیت پلیمری بیشتر در مصارف خانگی و پیل‌های دیگر (دما بالا) برای مصارف نیروگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۱۱- علایم

G	انرژی آزاد گیبس	$(\frac{kJ}{mol})$
H	آنتالپی	$(\frac{kJ}{mol})$
S	آنتروپی	$(\frac{kJ}{mol\,K})$
T	دما	(K)

۱۲- مراجع

[1] H. Caliskam, I. Dincer, A. Hepbasli, Energy exergy and sustainability analyses of hybrid renewable energy based hydrogen and electricity production and storage systems: Modeling and case study, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 61, No. 2, pp. 784-798, 2013.

[2] M. E. Demir, I. Dincer, Development of a hybrid solar thermal system with TEG and PEM electrolyzer for hydrogen and power production,

www.SID.ir

Archive of SID

[24] J. Töpler, J. Lehmann, *Hydrogen and Fuel Cell Technologies and Market Perspectives*, *Springer*, Berlin, Heidelberg, *Book Chapter 11,* pp. 187-207, 2016.

[25] A. M. Abdalla, Sh. Hossain, O. B. Nisfindy, A. T. Azad, M. Dawood, A. K. Azad, Hydrogen Production, Storage, Transportation and key challenges with applications: A review, *Energy Conversion and Management,* Vol. 165, pp. 602-627, 2018.

[26] K. Zeng, D. Zhang, Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications, *Progress in energy and combstion seience*, Vol. 36, No. 3, pp. 307-326, 2010.

[27] M. Fereidooni, A. Mostafaeipour, V. Kalantar, H. Goudarzi, A Comprehensive evaluation of hydrogen production from photovoltaic power station, *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* Vol. 82, pp. 415-423, 2018.

[28] F. Maleki, A. Farzaneh, An overview of some methods of hydrogen production and introduction of fuel cells and reviewing the advantages and disadvantages of fuel cells, *Third National Conference on Technology Development in Mechanical and Aerospace Engineering* ,Tehran, Iran, 2020. (in Persian)

[29] A. Khosrouvani, R. Zeynali, K. GhasemZadeh, Hydrogen production using new solar membrane reactor technology, *National iranian Oil Refinery and Distribution,* Tehran, Iran,Vol 11, No. 3, pp. 50-68, 2015. (in persian)

[30] K. Liu, Ch. Song, V. Subramani, Hydrogen and Syngas Production and Purification Technologies, *WILEY*, 2010.

[31] B. Sørensen and G. Spazzafumo, *Hydrogen and Fuel Cells: Emerging Technologies and Applications*, Elsevier Science, 2018.

[32] T. Younus, A. Anwer, Z. Asim, M. S. Surahio, Production of Hydrogen by Steam Methane Reformation Process, *Third International Conference on Advances on Clean Energy Research (ICACER),* Vol. 51, No. 5, 2018.

[33] International Energy Agency, Hydrogen and Fuel Celles Review of National R&Dprograms, Accessed 31 July 2020; https://www.iea.org/fuels-and-technologies/hydrogen

[34] A. G. De Crisci, A. moniri, Y. Xu, Hydrogen from hydrogen sulfide: towards a more sustainable hydrogen economy, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 3, pp. 1299-1327, 2019.

[35] M. Dan, Sh. Yu, Y. Li, Sh. Wei, J. Xiang, Y. Zhou, Hydrogen sulfide Decomposition: How to capture Hydrogen and Sulfur by photocatalysis, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, Vol 42, 2019.

[36] Zh. Ma, S. Zhang, D. Xie, Y. Yan, A novel integrated process for hydrogen production from biomass, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol 39, No. 3, pp. 1274-1279, 2014.

[37] M. Ni, D. Y. C. Leung, M. K. H. Leung, K. Sumathy, An overview of hydrogen production from biomass, *Fuel Processing Technology*, Vol 87, No. 5, pp. 461-472, 2006.

[38] A. Abuadala, I. Dincer, G. F. Naterer, Exergy analysis of hydrogen production from biomass gasification, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, No. 10, pp. 4981-4990, 2010.

[39] M. Balat, Possible Methods for Hydrogen Production, *Energy Sources*, Vol. 31, No. 1, pp. 39-50, 2008.

[40] G. Voitic, B. Pichler, A. Basile, A. lulianelli, K. Malli, S. Bock, V. Hacker, Hydrogen production, Fuel Cells and Hydrogen, Chapter 10, pp. 215-241, 2018.

[41] A. Ebrahimi Moghaddam, M. Deymi Dasht Bayyaz, Investigation of hydrogen production methods from various fossil fuel sources, *Iranian Journal of Mechanical Engineers,*Vol. 27, No. 6, pp. 35-41, Tehran, 2019. (in persian)

[42] Energy balance sheet of the Ministry of Energy of Iran, 2019. (in persian)

[43] International Energy Agency, Accessed 31 July 2020; https://www.iea.org/fuels-and-technologies/hydrogen

[44] J. Andersson, S. grönkvist, Large-scale storag of hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy,* Vol. 44, No. 23, pp. 11901-11919, 2019.

[45] N. Rouyayi, R. S. Movakhar, F. Dabier, N. Riyahi Nouri, New technologies for storage and transfer of hydrogen fuel, *Sixth National Conference on Nanotechnology in the Electricity Industry,* Niroo Researech Insttute, Tehran, 2018.(in persian)

[46] Y. Luo, Q. Wang, J. Li, F. Xu, L. Sun, Y. Zou, H. Chu, K. Zhang, Enhanced Hydrogen Storage/Sensing of metal Hydrides by Nanomodification, *Materials Today Nano,* Vol. 9, 2020.

International Journal of Hydrogen Energy, Vol.42, No. 53, pp. 30044-30056, 2017.

[3] T. Özgür, A. C. Yakaryilmaz, Thermodynamic analysis of a proton Exchange Membrane fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 38, pp. 18007-18013, 2018.

[4] M. Eroglu, E. Dursun, S. Sevencan, J. Song, S. Yazici, O. Kilic, A mobile renewable house using pv/wind/fuel cell hybrid power system, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 13, pp. 7985-7992, 2011.

[5] International Energy Agency, Accessed 31 July 2020; https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Oil&indicator=OilProd

[6] M. Anwar, S. Lou, L. Chen, H. Li, Z. Hu, Recent advancement and strategy on bio-hydrogen production from photosynthetic microalgae, *Bioresource Technology*, Vol. 292, pp. 121972, 2019

[7] S.Z. Baykara, E.H. Figen, A. Kale, T. Nejat Veziroglu, Hydrogen from hydrogen sulphide in Black Sea, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, No. 9, pp. 1246-1250,2007.

[8] D. B. Levin, R. Chahine, Challenges for renewable hydrogen production from biomass, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, No. 10, pp. 4962-4969, 2010.

[9] R. Ramachandran, R. K. Menon, An overview of industrial uses of hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 23, No. 7, pp. 593-598, 1998.

[10] Hydrogen applications, Accessed 31 July 2020; https://www.hydrogeneurope.eu

[11] Z. B. Sema, Hydrogen: A brief overview on it's sources, production and environmental impact, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.43, No. 23, pp. 10605-10614, 2018.

[12] A. M. Amin, E. Croiset, W. Epling, Review of methane catalytic cracking for hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 4, pp. 2904-2935, 2011.

[13] Y.Jamal, M. L.Wyszynski, On-Board generation of hydrogen-richi gaseous fuels-a review, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.19, No. 7, pp. 557-572, 1994.

[14]H. A. Abbas, W. M. A. Wand Daud, Hydrogen production by methane decomposition: A review, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, No. 3, pp.1160-1190, 2010.

[15] A. M. Amin, E. Croiset, W. Epling, Review of methane catalytic cracking for hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 4, pp. 2904-2935, 2011.

[16] K. Damen, M. V. Troost, A. Faaij, W. Turkenburg, A comparision of electricity and hydrogen production systems with Co_2 capture and storage. Part A: Review and selection of promising conversion and capture technologies, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 32, No. 2, pp. 215-246, 2006.

[17] K. Zeng, D. Gauthier, J. Soria, G. Mazza, G. Flamant, Solar pyrolysis of carbonaceous feedstocks: A review, *Solar Energy*, Vol. 156, pp.73-92, 2017.

[18] G. Nahar, D. Mote, V. Dupont, Hydrogen production from reforming of biogas: Review advances and an indian perspective, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 76, pp. 1032-1052, 2017.

[19] N. Ibrahim, S. K. kamarudin, L. J. Minggu, Biofuel from biomass via photo-electrochemical reactions: An overview, *Journal of Power Sources*, Vol. 259, pp. 33-42, 2014.

[20] M. M. Rashid, M. K. Al Mesfer, Hamid. Naseem, M. Danish, Hydrogen Production by Water Electrolysis: A Review Of Alkaline WaterElectrolysis, PEM Water Electrolysis and High Temperature Water Electrolysis, *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, Vol. 4, No. 3, 2015.

[21] M. Wang, Zh. Wang, X. Gong, Zh. Guo, The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production-A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 29,pp. 573-588, 2014.

[22] K. Zhang, W. Bao, L. Chang, H. Wang, A review of recent researches on Busen reaction for hydrogen production via S-I water and H_2S splitting cycles, *Journal of Energy Chemistry*, Vol. 33, pp. 46-58, 2019.

[23] A. Ozawa, Y. Kudoh, K. N, Kitagawa. R. Muramatsu, Life cycle CO_2 emissions from power generation using hydrogen energy carriers, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 21, pp.11219-11232, 2019.

www.SID.ir

Archive of SID

[47] S. Niaz, T. Manzoor, A. H. Pandith, Hydrogen storage: Materials,methods and perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 50, pp. 457-469,2015.
[48] R. Moradi, K. M. Groth, Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.44, No. 23, pp.12254-12269, 2019.
[49] M. R. Arasteh, N. Bageri Moghaddam, A. Iran Khah, J. Hashemi, S. Rad pour, *Book of Fuel Cell and Hydrogen Technology: Development Priorities and Strategies in the Country*, 2008. (in persian)
[50] R. Hayre, S. Cha, W. G. BColella , F. B. Prinz, *Hand Book Fuel cell Fundamentals*, *Wiley*,Chapter8, 2016.
[51] T.Maiyalagah, V. S. Saji, Electrocatalysts for Low Temperature Full Cells: Fundamentals and Recent Trends, *Wiley*, 2017.
[52] Comparison of Full cell Technologies Available, Accessed 5 October 2020; https://www.energy.gov/eere/fuelcells/comparison-fuel-cell-technologies
[53] Construction of a semi-industrial hydrogen pilot with a capacity of 200 kW and purchase and installation of an electrolysis device of 30 N / cubic meters (150 kW) and equipment for liquefaction system and purchase of ancillary systems for gas analysis, Renewable Energy Organization and Electricity Efficiency (SATBA), Accessed 31 July 2020; http://www.satba.gov.ir
[54] Purchase, installation and commissioning of 25 kW polymer fuel cell connected to the grid, Renewable Energy Organization and Electricity Efficiency (SATBA), Accessed 31 July 2020; http://www.satba.gov.ir
[55] Images of projects of Hydrogen Office, Renewable Energy Organization and Electricity Efficiency (SATBA), Accessed 31 July 2020; http://www.satba.gov.ir
[56] A. Ahmad pour, M. Kalbasi, Investigating the performance of different types of fuel cells in the production of clean energy, *International Conference on New Approaches to Energy Conservation (ETEC)*, 2016. (in persian)
[57] S. Faroukhi Souraki, M. Nimafar, R. Azadi, *book of renewable energy,* Tehran, *Azarfar*, 2019. (in persian)

www.SID.ir