بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه مازندران

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد در رشته مهندسی شیمی

موضوع:

بررسی پتانسیل نانولوله های کربنی برای جذب و ذخیره سازی هیدروژن و تعیین ایزوترم های جذب

استاد راهنما:

دکتر علی اصغر قریشی

استاد مشاور:

دکتر محسن جهانشاهی

دانشجو:

مریم ایران نژاد

شهریور ۱۳۸۹

تقدیم به :

پدرم، به پاس تعبیر عظیم و انسانی اش از کلمه ایثار و از خود گذشتگی

مادرم، به پاس عاطفه سرشار و گرمای امید بخش وجودش

و

همسرم، به پاس قلب بزرگ و محبت های بی دریغش

سپاسگذاری:

بی تردید تدوین این رساله مرهون زحمات و کمک های بی دریغ اساتید و بزرگوارانی است که اینجانب را در تهیه و ارائه آن یاری نمودند. پس وظیفه خود دانسته صمیمانه از زحمات بی‌دریغ، تلاش‌های بی‌وقفه و راهنمایی‌های ارزشمند استاد گرامی جناب آقای **دکترعلی اصغر قریشی** که راهنمایی اینجانب در راستای انجام این پروژه را بر عهده داشتند و همچنین راهنمایی های گرانقدر جناب آقای **دکتر محسن جهانشاهی** استاد محترم مشاور تشکر و قدردانی نمایم. همچنین از اعضا آزمایشگاه تحقیقاتی نانوبیو تکنولوژی دانشگاه صنعتی بابل به سبب همکاری بی شائبه شان کمال تشکر را دارم.

چکیده

در این کار ، ظرفیت جذب هیدروژن در کربن فعال و نانولوله ی کربنی تک دیواره در سه دمای مختلف ۲۸۳، ۲۹۳ و ۳۰۳ کلوین و در فشار های بین ۷۵-۰ بار با استفاده از روش حجم سنجی در یک سیستم تک مخزنه انجام شد. در روش حجمی ابتدا مخزن جذب با مقدار مشخصی از نمونه پر شد و سپس تا میزان مورد نظر با گاز هیدروژن تحت فشار قرار گرفت. به خاطر جذب هیدروژن در نمونه، فشار سیستم با گذشت زمان کم شد تا به یک فشار تعادلی رسید. میزان هیدروژن جذب شده از طریق افت فشار و با استفاده از معادله حالت SRK محاسبه شد. در هر سه دما، ظرفیت جذب هیدروژن در هر دو نمونه، کمتر از ۰/۵ درصد وزنی به دست آمد. با کم کردن دمای جذب و افزایش فشار، ظرفیت جذب در مواد کربنی افزایش یافت. برای هر دو نمونه داده های تعادلی جذب با استفاده از مدل لانگمیر به خوبی برازش شد و این نشان دهنده ی این است که جذب هیدروژن فقط در یک لایه ی مولکولی اتفاق افتاد و این ناشی از جاذبه ی وان دروالسی ضعیف بین اتم های کربن و مولکول های هیدروژن است. گرمای جذب هیدروژن در نانولوله ی کربنی تک دیواره با استفاده از معادله ی کلازیوس-کلاپیرون، ۵/۹- کیلو ژول بر مول به دست آمد. در مرحله ی بعدی، نانولوله ی کربنی تک دیواره تحت یک فرایند سه مرحله ای، اکسیداسیون در هوا، شستشو با اسید نیتریک ۲/۵ مولار و اکسیداسیون دوباره، قرار گرفت تا اثر شستشوی اسیدی بر جذب هیدروژن بررسی شود. میزان هیدروژن جذب شده در نانولوله ی شسته شده با اسید در سه دمای ۲۸۳، ۲۹۳ و ۳۰۳ کلوین ،۲۶-۱۰ درصد بیشتر از میزان هیدروژن جذب شده در نانولوله ی اولیه بود. تغییرات جذب هیدروژن با زمان در نانولوله ی تک دیواره نیز بررسی شد و نتیجه گیری شد که سینتیک جذب در نانولوله ی کربنی تک دیواره سریع است. درکل، این نتایج نشان می دهد که میزان جذب هیدروژن در نانولوله ی کربنی تک دیواره بسیار پایین است و به نظر نمی رسد که این ماده یک حامل امید بخش هیدروژن برای کاربرد های عملی باشد.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه ای بر ذخیره سازی گاز هیدروژن..... ۱

۱-۱- مشخصات کلی هیدروژن ۲

۱-۲ - روش های تولید هیدروژن ۳

۱-۳- کاربردهای هیدروژن ۷

۱-۴ - ذخیره سازی هیدروژن ۱۰

۱-۴-۱- فشرده سازی ۱۲

۱-۴-۲- مایع سازی ۱۴

فصل دوم: ذخیره سازی هیدروژن در جاذب های جامد..... ۱۶

۲-۱- مقدمه..... ۱۷

۲-۲- ذخیره سازی هیدروژن درهیدریدهای فلزی..... ۱۸

۲-۳- هیدریدهای کمپلکس..... ۲۳

۲ -۴- جذب فیزیکی هیدروژن در مواد کربنی..... ۲۵

۲-۴-۱- گرافیت..... ۲۹

۲-۴-۲- نانوفیبر های کربنی..... ۳۱

۲-۴-۳- فولرین..... ۳۴

۲-۴-۴- نانو لوله های کربنی..... ۳۸

۲-۴-۴-۱- نانولوله های کربنی تک دیواره..... ۳۹

۲-۴-۴-۲- نانو لوله های کربنی چند دیواره..... ۴۰

۲-۴-۴-۳- دسته بندی فیزیکی نانولوله های کربنی..... ۴۱

۲-۴-۴-۴- روش های تولید نانولوله کربنی..... ۴۴

۲-۴-۴-۴-۱- روش تخلیه قوس الکتریکی..... ۴۴

۲-۴-۴-۴-۲- روش رسوب گذاری بخار شیمیایی..... ۴۶

۲-۴-۴-۴-۳- روش تبخیر لیزری ۴۸

۲-۴-۴-۵- خالص سازی نانولوله های کربنی..... ۴۹

۲-۴-۴-۵-۱- اکیداسیون ۴۹

۲-۴-۴-۵-۲- روش آماده سازی اسیدی..... ۵۰

۲-۴-۴-۵-۳- حرارت دهی ۵۰

۲-۴-۴-۵-۴- تابش امواج مافوق صوتی..... ۵۱

۲-۴-۴-۶- جذب فیزیکی هیدروژن در نانو لوله های کربنی..... ۵۱

۲-۴-۴-۷- ذخیره سازی هیدروژن در نانولوله های کربنی چند دیواره..... ۶۱

۲-۴-۴-۸- جذب شیمیایی هیدروژن در نانو لوله های کربنی.....۶۳

فصل سوم: تکنیک های اندازه گیری جذب فیزیکی هیدروژن در مواد کربنی.....۶۶

۳-۱- روش حجمی.....۶۷

۳-۲- روش وزنی.....۶۹

۳-۳- دفع برنامه ریزی شده با دما.....۷۱

فصل چهارم: روش ها و نتایج آزمایشگاهی.....۷۲

۴-۱- نمونه های استفاده شده و تعیین مشخصات آن ها.....۷۳

۴-۲- سیستم آزمایشگاهی اندازه گیری جذب هیدروژن.....۷۸

۴-۳- بحث و نتایج.....۸۲

۴-۳-۱- اثر دما و فشار روی میزان هیدروژن جذب شده.....۸۵

۴-۳-۲- مدل ایزوترم جذب.....۸۶

۴-۳-۳- محاسبه گرمای جذب.....۹۳

۴-۳-۴- اثر شستشوی اسیدی بر میزان جذب هیدروژن.....۹۵

۴-۳-۵- مطالعه سینتیک جذب.....۹۸

۴-۴-جمع بندی و نتیجه گیری کلی.....۱۰۴

۴-۵- پیشنهاد ها.....۱۰۵

منابع و ماخذ.....۱۰۶

چکیده انگلیسی

فهرست شکل ها

عنوان **صفحه**

شکل۲-۱- تجزیه گاز هیدروژن در هیدرید فلزی..... ۱۹
شکل ۲-۲- انرژی جذب مواد مختلف ذخیره سازی هیدروژن..... ۲۷
شکل ۲-۳- وابستگی جذب هیدروژن به دما و فشار در مواد کربنی..... ۲۸
شکل۲-۴- گرافیت..... ۳۰
شکل ۲-۵- ساختار نانوفیبر کربنی الف)جناقی، ب) نواری، پ) صفحه ای..... ۳۲
شکل ۲-۶- ساختار نانوفیبر با هیدروژن جذب شده بین لایه ها..... ۳۳
شکل ۲-۷- مولکول فولرین (C_{60})..... ۳۵
شکل ۲-۸- مدل مفهومی برای هیدروژن دار کردن و هیدروژن زدایی از فولرین..... ۳۷
شکل ۲-۹- نانولوله کربنی تک دیواره..... ۳۹
شکل ۲-۱۰- نانولوله کربنی چند دیواره..... ٤۱
شکل ۲-۱۱- نمایش صفحه گرافن و بردار کایرال..... ٤۲
شکل ۲-۱۲- ساختارهای مختلف نانولوله های کربنی..... ٤۳
شکل۲- ۱۳- نمایی از دستگاه تخلیه قوس الکتریکی..... ٤٦
شکل۲- ۱۴- نمایی از روش رسوب گذاری بخار شیمیایی..... ۴۸
شکل۲- ۱۵- نمایی از روش تبخیر لیزری..... ٤۹
شکل۲-۱۶- نواحی جذب در نانولوله کربنی تک دیواره..... ۵۳
شکل۲-۱۷- تصویر TEM از نانولوله خالص(تصویر چپ) و نانولوله شسته شده با اسید(تصویر راست)..... ۶۰
شکل۲-۱۸- نمای کلی از دستگاه الکتروشیمیایی برای ذخیره سازی هیدروژن..... ۶۵
شکل۳-۱- نمای کلی روش حجمی برای اندازه گیری جذب..... ۶۸
شکل ۳-۲- نمای کلی روش وزنی برای اندازه گیری جذب..... ۷۰
شکل۴-۱- تصویر SEM برای نانولوله ی کربنی تک دیواره استفاده شده..... ۷۴
شکل۴-۲- تصویر SEM برای کربن فعال استفاده شده..... ۷۴
شکل ۴-۳- طیف رامان در نانولوله کربنی تک دیواره..... ۷۷
شکل۴-۴- مد RBM در نانولوله کربنی تک دیواره..... ۷۷
شکل٤-۵ - نمای کلی سیستم مورد استفاده برای اندازه گیری جذب هیدروژن..... ۷۸
شکل ۴-۶- ایزوترم جذب هیدروژن در کربن فعال..... ۸۳
شکل۴-۷ - ایزوترم جذب هیدروژن در نانولوله کربنی تک دیواره..... ۸۴
شکل٤-۸- ایزوترم های مختلف جذب..... ۸۷
شکل۴-۹- ایزوترم های جذب هیدروژن در کربن فعال با الف)مدل لانگمیر ب)مدل فرندلیچ..... ۹۱

شکل۴-۱۰- ایزوترم های جذب هیدروژن در نانولوله کربنی با الف)مدل لانگمیر ب)مدل فرندلیچ.....۹۲
شکل۴-۱۱- تغییرات Lnp بر حسب $\frac{1}{T}$ برای جذب هیدروژن در نانولوله کربنی تک دیواره (عددهای کنار نمودار درصد وزنی هیدروژن جذب شده را نشان میدهد).....۹۴
شکل ۴-۱۲- تغییرات گرمای جذب با درصد وزنی هیدروژن جذب شده.....۹۵
شکل ۴-۱۳- ایزوترم های جذب هیدروژن در نانولوله کربنی شسته شده با اسید.....۹۷
شکل۴-۱۴- سینتیک جذب در دمای ۲۸۳ کلوین در نانولوله کربنی تک دیواره.....۹۹
شکل۴-۱۵- سینتیک جذب در دمای ۲۹۳ کلوین در نانولوله کربنی تک دیواره.....۱۰۰
شکل۴-۱۶- سینتیک جذب در دمای ۳۰۳ کلوین در نانولوله کربنی تک دیواره.....۱۰۱
شکل ۴-۱۷- مدل سینتیکی نفوذ درون ذره ای برای جذب هیدروژن در نانولوله کربنی تک دیواره.....۱۰۳

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱- استاندرهای مختلف دپارتمان انرژی برای ذخیره سازی هیدروژن..... ۱۱
جدول۲-۱- خلاصه ای از نتایج مختلف آزمایشگاهی و تئوری در مورد جذب هیدروژن در نانو لوله های کربنی..... ۵۵
جدول ۴-۱- مشخصات ساختاری نمونه های استفاده شده..... ۷۵
جدول ۴-۲- پارامترهای به دست آمده در ایزوترم جذب لانگمیر و فرندلیچ در کربن فعال..... ۸۹
جدول ۴-۳- پارامترهای به دست آمده در ایزوترم جذب لانگمیر و فرندلیچ در نانولوله کربنی..... ۹۰

لیست علائم و اختصارات

درجه کلوین	K
درصد وزنی	w.t%
مولار	M
کیلو ژول بر مول	kj/mol

فصل اول : مقدمه ای بر ذخیره سازی گاز هیدروژن

۱-۱- مشخصات کلی هیدروژن

هیدروژن یک عنصر شیمیایی در جدول تناوبی است که با حرف H و عدد اتمی ۱ نشان داده شده است. برای اولین بار در سال ۱۷۶۶ به وسیله هنری کاوندیش[1] به عنوان یک ماده مستقل شناخته شده و آنتونی لاووازیه[2] نام هیدروژن را برای این عنصر انتخاب کرد(واژه یونانی هیدروژن به معنی سازنده آب است)[۲-۱]. هیدروژن عنصری بی رنگ، بی بو، غیر فلز، یک ظرفیتی و گازی دو اتمی با خاصیت شعله وری فوق العاده بالاست. هیدروژن فراوان ترین و سبک ترین عنصر در جهان بوده و در آب و در تمام ترکیبات آلی و موجودات زنده یافت می شود. بیش از ۷۵٪ از جرم مواد طبیعی در جهان از این عنصر ساخته شده و بیش از ۹۰٪ از اتم های تشکیل دهنده ی آن ها اتم های هیدروژن هستند. پروتونیوم[3] معمولی ترین ایزوتوپ هیدروژن، فاقد نوترون است و شامل تنها یک پروتون و یک الکترون است. در شرایط فشار و دمای استاندارد، هیدروژن یک گاز دو اتمی H_2 با نقطه ی جوش ۲۰/۲۵ کلوین و نقطه ی ذوب ۰۲/ ۱۴ کلوین است[۵-۱]. در صورتی که این گاز تحت فشار فوق العاده بالایی قرار گیرد، مولکول های هیدروژن ماهیت خود را از دست داده و هیدروژن به صورت مایع در می آید. اما در فشارهای بسیار پایین مانند شرایطی که در فضا یافت می شود، به این علت که هیچ راهی برای ترکیب اتم هایش وجود ندارد، هیدروژن تمایل دارد که به صورت اتمی درآید و ابرهای هیدروژنی تشکیل دهد که به شکل گیری ستارگان نیز مرتبط است. هیدروژن با بیشتر عناصر ترکیب شده و ترکیبات مختلف را به وجود می آورد. هیدروژن دارای عدد الکترونگاتیوی ۲/۲ است و هنگامی ترکیبات مختلف را می سازد که عناصر غیر فلزی تر و عناصر فلزی تری وجود داشته باشند. در صورت ترکیب با عناصر فلزی ترکیب به دست آمده هیدرید نامیده می شود که هیدروژن یا به صورت یون های H^- یا به صورت حل شده در عنصر

[1] Henry Cavendish
[2] Antoine Lavoisier
[3] protium

دیگر وجود خواهد داشت. در حالت ترکیب با غیر فلز هیدروژن تمایل برای تشکیل پیوند کووالانسی دارد. چون یون های H^+ به صورت یک اتم عریان فاقد الکترون در می آیند، بنابراین تمایل شدیدی به جذب الکترون ها به سمت خود دارند. هر دوی این ها تولید اسید می کنند. هیدروژن با اکسیژن ترکیب شده و تولید آب می کند، H_2O، که در این واکنش مقدار زیادی انرژی را به صورتی آزاد می کند که باعث انفجار در هوا می گردد.

در شرایط عادی گاز هیدروژن ترکیبی از دو نوع متمایز مولکول است که از نظر جهت چرخش الکترون ها و هسته تفاوت دارند. این دو شکل به نام های پارا[1]-هیدروژن و اورتو[2]-هیدروژن معروفند. در شرایط استاندارد هیدروژن معمولی ترکیبی از ۲۵٪ شکل پارا و ۷۵٪ شکل اورتو است. شکل اورتو را نمی توان به صورت حالت خالص آن تهیه کرد. این دو مدل هیدروژن از نظر انرژی با هم متفاوتند که این مسئله موجب می گردد که خصوصیات فیزیکی آن ها کمی متفاوت باشد[۱].

۱-۲- روش های تولید هیدروژن

هیدروژن به عنوان حامل انرژی در آینده شناخته شده است یعنی می تواند انرژی را در شکل مناسب ذخیره کند و انتقال دهد چون دارای دانسیته ی انرژی بالا در واحد وزن خود است. اما چون هیدروژن گازی در زمین وجود ندارد باید از راه های گوناگون و از منابعی که شامل آن هستند، تولید شود. هیدروژن می تواند از منابع تجدید ناپذیر انرژی مانند زغال سنگ، نفت، گاز طبیعی و انرژی هسته ای و همچنین به طور غیر مستقیم از منابع تجدید پذیر انرژی مانند باد وانرژی خورشیدی تولید شود. امروزه تولید گاز هیدروژن از منابع تجدید پذیر به سرعت مراحل

[1] Para
[2] Orto

رشد و توسعه ی خود را می پیماید. زیرا این انرژی ها تمیزتر و استفاده از آن ها در زمان کوتاه مناسب تر است. اما تنها ۶ ٪ از منابع انرژی از منابع تجدید پذیرند چون این منابع نمی توانند همه وقت انرژی تولید کنند، باد همه وقت نمی وزد و خورشید همه وقت نمی تابد[۶].

روش های گوناگونی برای تولید صنعتی و آزمایشگاهی هیدروژن وجود دارد که متداول ترین آن ها روش تبدیل گاز طبیعی[1] با بخار و روش الکترولیز[2] است[۷]. در حال حاضر سوخت های فسیلی منبع اصلی تولید هیدروژن هستند. هیدروژن می تواند از گاز طبیعی یا هیدرکربن های دیگر با درجات مختلف کارایی تولید شود. در این روش به ویژه از متان یا گاز طبیعی برای تولید هیدروژن استفاده می کنند که شامل دو مرحله است:

مرحله اول شامل واکنش متان توسط بخار از روی کاتالیزور نیکل در دمای ۸۰۰-۷۵۰ درجه سانتی گراد برای تولید هیدروژن و مونوکسید کربن است.

$$CH_۴ + ۲H_۲O \longrightarrow CO_۲ + ۴\ H_۲ \qquad (۱-۱)$$

$$CH_۴ + ۲H_۲O \longrightarrow CO + ۳\ H_۲ \qquad (۲-۱)$$

مرحله ی دوم واکنش انتقالی مونوکسید کربن با بخار آب در دمای ۳۵۰ درجه سانتی گراد است. اتم اکسیژن از بخار آب اضافی جدا می شود تا مونوکسید کربن را به دی اکسید کربن تبدیل کند[۹-۷].

$$CO + H_۲O \longrightarrow CO_۲ + H_۲ \qquad (۳-۱)$$

هیدروژن تولید شده از این فرآیند شامل مقادیر کم مونوکسید کربن، دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن به عنوان ناخالصی است و بسته به استفاده ی بعدی ممکن است به خالص سازی

[1] Steam reforming of natural gas
[2] Electrolysis

بیشتری نیاز داشته باشد، که این خالص سازی در دو مرحله انجام می شود: خالص سازی مواد اولیه که شامل حذف سولفور و کلر است و خالص سازی محصول که شامل حذف اکسید های کربن است. برای حذف دی اکسید کربن، مخلوط شامل دی اکسید کربن و هیدروژن را تحت فشار از درون محلول یک آمین عبور می دهند که باعث می گردد دی اکسید کربن حل گردیده اما هیدروژن حل نشود. هیدروژن بسیار خالص برای عملیات پایدار و موثر در پیل سوختی مورد نیاز است چون ناخالصی ها موجب مشکلات گوناگون در طراحی پیل سوختی می شوند مثلا می توانند کاتالیست ها را مسموم کنند و موجب خرابی غشا شوند[۷،۹].

تبدیل گاز طبیعی با بخار گسترده ترین روش مورد استفاده برای تولید صنعتی هیدروژن است. این روش، یک روش توسعه یافته است و در حال حاضر تقریبا ۹۵ ٪ از کل هیدروژن تولید شده در ایالت متحده آمریکا و ۴۸ ٪ از هیدروژن جهانی را تشکیل می دهد. در مقایسه با تکنولوژی های دیگر تولید هیدروژن، تبدیل گاز طبیعی موثر تر و کم هزینه تر است و تقریبا ۶۵ تا ۷۵ درصد بازدهی دارد. گاز طبیعی یک ماده ی خام مناسب، قابل کنترل، با نسبت هیدروژن به کربن بالا است. اما در طول فرآیند تولید هیدروژن، دی اکسید کربن هم تولید می شود و این موجب نشر گازهای گلخانه ای و گرم تر شدن کره ی زمین می شود[۱۰-۶].

با تبدیل کردن زغال سنگ به گاز نیز می توان هیدروژن، دی اکسید کربن و متان تولید کرد. مانند زغال سنگ، توده های زیستی[1] هم می توانند با استفاده از دماهای بالا و تحت فشار در حضور بخار به گاز تبدیل شوند تا هیدروژن تولید کنند. چون منابع زیستی دی اکسید کربن را در اتمسفر به عنوان بخشی از فرآیند رشد طبیعی شان مصرف می کنند. تولید هیدروژن از این روش، گازهای گلخانه ای نزدیک به صفر تولید می کند[۷-۶].

[1] Biomass

هیدروژن بسیار خالص اما گران می تواند با الکترولیز آب تولید شود. در این روش با عبور دادن الکتریسیته از آب، مولکول آب به دو قسمت شکسته می شود و اکسیژن در آند و هیدروژن در کاتد تولید می شود. الکتریسیته ی مورد نیاز می تواند با استفاده از تکنولوژی های انرژی تجدیدپذیر مانند آب و خورشید، و یا از سوخت های فسیلی تامین شود. عامل های کاتالیستی مختلف برای بهبود بازده الکترولیز در حال بررسی هستند، چون الکترولیز حرارتی برای فرآیند ها و تجهیزات لوله کشی در دماهای خیلی بالا اتفاق می افتد و بنابراین کاتالیست های مناسب برای کاهش دما مورد نیاز هستند. در این روش نشر گاز های گل خانه ای وجود ندارد اما روشی بسیار گران و پر هزینه است[۶،۷،۱۱].

گاز هیدروژن همچنین می تواند در اثر واکنش های تخمیری[1] میکروارگانیسم های زنده، به ویژه باکتری ها و مخمر ها روی مواد آلی مانند علوفه و ضایعات گیاهی و فضولات حیوانی به دست آید. در روند تولید گاز هیدروژن باکتری های بی هوازی با استفاده از پدیده تخمیر، مواد آلی وآب را به گاز هیدروژن تبدیل می کنند. برای تولید هیدروژن به وسیله ی باکتری ها دو نوع تخمیر وجود دارد: یک نوع تخمیر نوری است که در آن به منبع نور نیاز است و نوع دیگر تخمیر در تاریکی است که نیازی به نور ندارد. در این واکنش ها منابع کربنی زیادی استفاده می شوند که همگی از توده های زیستی هستند. اما میزان هیدروژن تولید شده در این روش پایین است و از نظر اقتصادی برای مصارف صنعتی و خانگی قابل توجیه نیست. از این رو باید با استفاده از روش هایی مناسب، بازده تولید گاز هیدروژن را افزایش داد ، یکی از این روش ها تغییرات ژنتیکی در این باکتری ها با استفاده از روش های مهندسی ژنتیک و بیوتکنولوژی است. روش دیگر، استفاده از ترکیبی از باکتری های هوازی و بی هوازی در کنار هم است. در این روش چون باکتری های بی هوازی در فرآیند تخمیر تولید اسید های آلی می کنند، رفته رفته محیط واکنش اسیدی می شود.

[1] Fermentative

از این رو تولید هیدروژن کاهش می یابد ولی هنگامی که باکتری های هوازی در محیط باشند از اسید های آلی استفاده و آن ها را از محیط خارج می کنند در نتیجه راندمان تولید گاز هیدروژن بالا می رود[۷].

هیدروژن همچنین، می تواند به عنوان محصول فرعی در واکنش تجزیه کاتالیزوری هیدروکربن ها در دمای بالا به دست آید[۷].

بزرگ ترین مشکل تکنیکی برای تولید هیدروژن کاهش قیمت تمام شده ی آن است. هیدروژن باید از نظر قیمت قابل رقابت با سوخت های مرسوم دیگر باشد. در حال حاضر تکنولوژی های تولید هیدروژن در مراحل مختلف پیشرفت و بررسی هستند. این تحقیقات روی کاهش تجهیزات سرمایه گذاری، عملیاتی و قیمت های نگهداری و کاهش گازهای گل خانه ای متمرکز هستند[۶،۱۲].

۱-۳-کاربردهای هیدروژن

مقدار قابل توجهی از هیدروژن تولید شده در صنعت برای تولید آمونیاک استفاده می شود. در فرآیند های پتروشیمی برای تبدیل نفت سنگین به اجزای سبک تر از طریق هیدروکراکینگ[1] از هیدروژن استفاده می کنند[۷]. هیدروژن برای هیدروژنه کردن[2] چربی ها و روغن ها، برای تولید متانول، برای تصفیه ی فلزات و فرآوری غذاها مورد نیاز است. برای تولید اسید هیدروکلریک، برای جوشکاری و در سوخت های موشکی از هیدروژن استفاده می کنند[۱۰].

[1] Hydrocracking
[2] Hydrogenation

در دنیای امروز با توجه به بحران انرژی، محدودیت سوخت های تجدید ناپذیر و مشکلات ناشی از آلودگی های سوخت های فسیلی، استفاده از منابع جدید انرژی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. در همین راستا دیدگاه نوینی برای استفاده از هیدروژن به عنوان سوخت با توجه به خصوصیات منحصر به فرد آن ایجاد شده است. هیدروژن حامل انرژی است چون نسبت به سوخت های دیگر دارای دانسیته ی انرژی بالاتری در واحد وزن خود است ، هیدروژن بسیار ارزان، تجدید پذیر و در دسترس است و می تواند از منابع اولیه ی تجدید ناپذیر و هم از منابع تجدید پذیر تامین شود.

کاربرد هیدروژن به عنوان سوخت موجب کاهش آلاینده های زیست محیطی و حذف اکسید های گوگرد و اکسید های کربن ناشی از احتراق سوخت های فسیلی می شود. هیدروژن تمیزترین سوخت است چون وقتی با اکسیژن ترکیب می شود تنها آب و گرما تولید می کند[۱۳].

ناسا[1] اولین استفاده کننده ی هیدروژن به عنوان منبع انرژی است. این سازمان سال های متمادی از هیدروژن مایع در برنامه های فضانوردی استفاده کرده است. تنها محصول فرعی در چنین فرآیند هایی آب است که خدمه سفینه برای نوشیدن از آن استفاده می کند[۱۰].

هیدروژن می تواند در موتورهای درون سوز و در پیل های سوختی به عنوان منبع انرژی مورد استفاده قرار گیرد. پیل های سوختی نوعی مبدل انرژی می باشند که انرژی شیمیایی را مستقیما به انرژی الکتریکی تبدیل می کنند. پیل های سوختی مانند باطری ها عمل می کنند اما بر خلاف باطری ها مادامی که به آن ها سوخت رسانده شود، از کار نمی افتند و به شارژ مجدد احتیاجی ندارند. پیل های سوختی پتانسیل شیمیایی هیدروژن را به انرژی الکتریکی تبدیل کرده و محصول جانبی آن آب و گرما است[۱۴]. پیل های سوختی دامنه ی کاربرد وسیعی در صنایع فضانوردی، صنایع نیروگاهی، حمل و نقل و وسایل قابل حمل دارند. پیل های سوختی کوچک می

[1] NASA

توانند منبع تامین نیرو برای ماشین های الکتریکی باشند، همچنین مـی تواننـد بـه عنـوان منبـع تغذیه در تلفن های همراه و کامپیوتر های لپ تاپ استفاده شوند. پیل هـای سـوختی بـزرگ مـی توانند الکتریسیته را در مناطق دوردست که به خط های نیرو دسترسی ندارند منتقل کنند.

پیل های سوختی می توانند در وسایل نقلیه مانند خودرو شخصی و اتوبوس هـا و قـایق هـا، که با موتورهای الکتریکی کار می کنند، استفاده شوند. این خودروها هیدروژن را به صورت گاز یـا مایع ذخیره می کنند و هیدروژن را با استفاده از پیل سوختی به الکتریسـیته ی مـورد نیـاز بـرای موتور تبدیل می کنند. امروزه تقریبا ۳۰۰-۲۰۰ وسیله نقلیه ی آزمایشی با سوخت هیـدروژنی در ایالت متحده وجود دارد که توسط شرکت های مختلف خودروسازی از جمله بی. ام. و. ، مرسـدس بنز و تویوتا ساخته شده اند. تنها تعداد کمی از این خودروها هیـدروژن را بـه طـور مسـتقیم مـی سوزانند. موتور های گازوئیلی موجود در یک وسیله نقلیه، در تبدیل انرژی شـیمیایی گازوئیـل بـه نیروی محرکه ماشین، بازدهی کمتر از ۲۰ ٪ دارند در حالی که وسایل نقلیه ای که با پیل سوختی کار می کنند می توانند ۴۰ تا ۶۰ درصد از انرژی سوخت را مصرف کنند.

هر چند پیل های سوختی کارایی بسیاری دارند اما ساخت آن هـا پـر هزینـه اسـت. قیمـت کنونی وسایل نقلیه ای که با پیل سوختی هیدرژن کار می کنند به میزان قابل تـوجهی از وسـایل نقلیه ی معمولی گران تر است و این به علت هزینه ی بالای تولید پیـل سـوختی اسـت. بنـابراین دستگاه های نیروی هیدروژنی در حال حاضر به صورت تجاری ساخته نخواهنـد شـد و اسـتفاده از هیدروژن به عنوان سوخت در کاربردهای عملی و اقتصادی در آینده ای نزدیک امکان پذیر خواهد شد[۱۰].