

الحمد لله الذي
خلقنا من
الحمم



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد - مهندسی مکانیک گرایش سیستم های انرژی - فناوری انرژی

طراحی و ساخت الکترو لایزر تولید کننده گاز هیدروکسی و بررسی تاثیر این گاز در فرآیند احتراق

نگارنده: رضا شهرکی شهدآبادی

استاد راهنما

دکتر محمد ضامن

استاد مشاور

دکتر سید وحید حسینی

شهریور ۱۴۰۰

□

ۛ



مدیریت تحصیلات تکمیلی

باسمه تعالی

فرهنگی آموزشی، پایان نامه کارشناسی ارشد

مربوط به ورودی‌های ۹۴ به بعد

شماره:

۲۰/۲۴-۱۹۸

تاریخ:

۱۴۰۱/۹/۱

ویرایش:

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای رضا شهرکی شهدآبادی با شماره دانشجویی ۹۸۰۷۶۴۴ رشته سیستم‌های انرژی گرایش فناوری انرژی تحت عنوان طراحی و ساخت الکتروولایزر تولید کننده گاز هیدروکسی و بررسی تاثیر این گاز در فرآیند احتراق که در تاریخ ۱۴۰۰/۰۶/۳۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار شد به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☐ (ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۸/۹۹ ☒ ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹ ☐ (د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹ ☐ هـ) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐ نوع تحقیق: نظری ☐ عملی ☒			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر محمد ضامن	استادیار	
۳- استاد مشاور	دکتر سید وحید حسینی	استادیار	
۴- استاد داور اول	دکتر محمد حسین احمدی	دانشیار	
۵- استاد داور دوم	دکتر علی عباس نژاد	استادیار	
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر اکبر ملکی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مهدی گردویی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ۱۴۰۱/۹/۱



تقدیم اثر

تقدیم به مهربان ترین همراهان زندگییم پدر و مادر عزیزم که حضورشان همیشه گرما بخش روح من بوده است و در سختی ها و دشواری های زندگی همواره یآوری دلسوز و فداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بودند.

تشکر و قدردانی

سپاس بی کران پروردگار یکتا را که، هستی‌مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به هم‌نشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت. اکنون که با لطف و عنایت پروردگار توفیق یافته‌ام تا این تحقیق را به پایان برسانم، برخود لازم میدانم که از کلیه بزرگوارانی که به نحوی مرا در انجام این پایان نامه یاری رساندند تشکر و قدردانی کنم.

جناب دکتر محمد ضامن که با همراهی و راهنمایی خویش مرا در انجام این پایان نامه یاری رساندند و در مدت تحصیلم نیز مطالب بسیار زیادی از ایشان آموختم. همچنین از تمامی دوستان و اعضای خانواده‌ام که این حقیر را در تهیه این پایان نامه یاری نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تعمدنامه

اینجانب رضا شهرکی شهیدآبادی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش سیستم- های انرژی - فناوری انرژی دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی و ساخت الکترو لایزر تولید کننده گاز هیدروکسی و بررسی تاثیر این گاز در فرآیند احتراق تحت راهنمایی دکتر محمد ضامن متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

گاز هیدروژن با توجه به امکان تولید آن از آب دریا به عنوان یکی از منابع انرژی در آینده مطرح می‌باشد. یکی از روش‌های پر کاربرد تولید گاز هیدروژن، الکترولیز آب است. الکترولیز آب توسط الکترولیزر و با عبور جریان الکتریکی از میان مولکول‌های آب، با استفاده از یک غشا بین سلولی باعث تجزیه مولکول‌های آب به هیدروژن و اکسیژن می‌شود. در صورتی که غشا بین سلولی حذف شود، گاز هیدروژن و اکسیژن مخلوط شده و گاز هیدروکسی تولید می‌شود که می‌توان از این گاز در جهت بهبود فرآیند احتراق و کاهش مصرف سوخت استفاده کرد. به همین منظور در این پژوهش به طراحی و ساخت الکترولیزر چند سلولی تولید کننده گاز هیدروکسی با استفاده از ورق استیل ۳۱۶ پرداخته شده و برای ایجاد رسانایی الکتریکی آب از هیدروکسید پتاسیم استفاده شده است. همچنین برای تامین انرژی مصرفی مورد نیاز الکترولیزر از سه منبع تغذیه DC با محدوده جریانی مختلف استفاده شده است. سپس در نتایج آزمایش‌ها به بررسی تاثیر شدت جریان مصرفی بر ولتاژ الکترولیزر، بررسی تاثیر شدت جریان بر میزان تولید گاز هیدروکسی، تاثیر تعداد صفحات بر میزان گاز هیدروکسی تولیدی، شدت مصرف انرژی، بررسی اثر سری و موازی بودن صفحات الکترولیزر و تولید به ازای سطح پرداخته شده است. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که ولتاژ هر سلول الکترولیزر در محدوده ۲ تا ۳ ولت است و برای دستیابی به ولتاژهای بالاتر باید از آرایش سری صفحات استفاده کرد و شدت مصرف انرژی بهینه در الکترولیزر بین ۱۰ تا ۱۵ آمپر است و همچنین با توان مصرفی ۴۰۰ وات می‌توان به ۱۳۰ لیتر بر ساعت گاز هیدروکسی دست یافت. پس از ارزیابی الکترولیزر، به بررسی تاثیر تزریق این گاز در فرآیند احتراق پرداخته

شد. به همین منظور تزریق گاز هیدروکسی تولیدی توسط الکترولایزر به مسیر هوای ورودی به مشعل احتراقی با ظرفیت حرارتی ۴۰۰۰۰ کیلو کالری بر ساعت صورت پذیرفت. مواردی مانند تاثیر تزریق این گاز بر شکل ظاهری شعله، آلاینده‌های خروجی مانند Hc ، Nox ، Co و دما ... مورد بررسی قرار می‌گیرد. به طور کلی در آزمایش‌ها کاهش ۲۵ درصدی Co و کاهش ۷ درصدی Hc و افزایش ناچیزی در Nox و همچنین افزایش ۶ درجه‌ای دما شعله مشاهده گردید.

کلمات کلیدی: الکترولایزر چند سلولی، گاز هیدروکسی، سوخت پاک، انرژی تجدید پذیر، مشعل احتراق، Co

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه و معرفی موضوع ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- سوخت هیدروژنی و روش‌های تولید آن ۳

۱-۳- فرآیند الکترولیز آب ۵

۱-۴- واکنش‌های کاتد و آند در الکترولیز آب ۷

۱-۵- کاربردهای صنعتی فرآیند الکترولیز ۸

۱-۶- عوامل تاثیرگذار بر واکنش برقکافت ۹

۱-۷- کاربردهای هیدروژن و گاز هیدروکسی ۹

فصل دوم: پیشینه پژوهش ۱۳

۲-۱- مقدمه ۱۴

۲-۲- مروری بر تحقیقات گذشته ۱۴

۲-۳- معرفی پژوهش حاضر و نوآوری آن ۲۱

فصل سوم: طراحی و آماده سازی بستر آزمایش ۲۳

۳-۱- مقدمه ۲۴

۳-۲- آماده کردن سلول‌های الکترولایزر ۲۴

۳-۳- منبع تغذیه ۲۸

۳-۴- نحوه اندازه گیری گاز هیدروکسی تولیدی	۲۹
۳-۵- مشعل احتراق	۳۰
۳-۶- تجهیزات اندازه گیری	۳۱
۳-۶-۱- مولتی متر	۳۱
۳-۶-۲- دستگاه آنالیزور گاز احتراق	۳۲
۳-۷- دوربین حرارتی	۳۳
۳-۸- شکل نهایی بستر آزمایش	۳۵

۳۷

فصل چهارم: نتایج

۴-۱- مقدمه	۳۸
۴-۲- تاثیر شدت جریان بر ولتاژ عبوری از الکترولایزر	۳۸
۴-۳- بررسی تاثیر توان مصرفی الکترولایزر بر میزان تولید گاز هیدروکسی	۴۰
۴-۴- میزان شدت مصرف انرژی بر حسب شدت جریان مصرفی الکترولایزر	۴۱
۴-۵- میزان تولید به ازای سطح بر حسب شدت جریان مصرفی	۴۲
۴-۶- میزان تولید گاز هیدروکسی با شدت جریان ۱۶ و ۲۶ آمپر با تعداد صفحات متغیر	۴۳
۴-۷- بررسی اثر سری بودن اتصال صفحات الکترولایزر	۴۴
۴-۷-۱- تاثیر شدت جریان بر ولتاژ مصرفی الکترولایزر در حالت اتصال سری صفحات الکترولایزر	۴۴
۴-۷-۲- میزان تولید گاز هیدروکسی بر حسب توان مصرفی در حالت اتصال سری صفحات الکترولایزر	۴۶
۴-۷-۳- میزان شدت مصرف انرژی بر حسب شدت جریان مصرفی الکترولایزر	۴۷
۴-۸- جمع بعدی نتایج آزمایش‌ها الکترولایزر	۴۸
۴-۹- اثر تزریق گاز هیدروکسی بر آلاینده های خروجی احتراق مشعل گازسوز	۵۰

۱۰-۴- تغییرات ظاهری شعله با تزریق گاز هیدروکسی ۵۱

۱۱-۴- بررسی تغییرات حرارتی شعله با استفاده از دماسنج ۵۲

۵۵ فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۵- جمع بندی و نتیجه گیری ۵۶

۲-۵- پیشنهادات ۵۸

۵۹ پیوست

۶۰ مراجع

فهرست جداول

- جدول ۱-۳: مشخصات کامل الکترو لایزر ۲۶
- جدول ۱-۴: مقایسه میزان تولید گاز هیدروکسی در پژوهش حاضر با دیگر پژوهش‌ها ۴۱
- جدول ۲-۴: مقادیر اندازه گیری شده توسط دستگاه آنالیزور گاز در گازهای خروجی از مشعل احتراقی ۵۰
- جدول ۳-۴: تاثیرات گاز هیدروکسی بر دما شعله ۵۲

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: نمونه ای از یک دستگاه الکترولیز موسوم به دستگاه هافمن ۶
- شکل ۲-۱: شماتیک تولید گاز هیدروژن (الف) و هیدروکسی (ب) ۷
- شکل ۱-۲: مدار منبع تغذیه مورد استفاده توسط شیمیزو و همکارانش ۱۶
- شکل ۲-۲: شماتیک الکترولایزر ساخته شده توسط ساکسونو و همکارانش ۱۷
- شکل ۳-۲: شماتیک پژوهش چوی و همکارانش ۱۸
- شکل ۴-۲: شماتیک پژوهش سالک و همکارانش ۱۹
- شکل ۱-۳: شماتیک الکترولایزر و صفحات آن ۲۶
- شکل ۲-۳: آماده سازی صفحات الکترولایزر ۲۶
- شکل ۳-۳: الکترولایزر و مخزن آن ۲۸
- شکل ۴-۳: مخزن تعبیه شده در بالا دست الکترولایزر ۲۹
- شکل ۵-۳: منبع تغذیه مورد استفاده برای شدت جریان های الف) بالاتر از ۳۰ آمپر و ب) کمتر از ۱۰ آمپر ۳۰
- شکل ۶-۳: پنل های خورشیدی مورد استفاده جهت تامین شدت جریان های بین ۱۰ تا ۳۰ آمپر ۳۰
- شکل ۷-۳: نحوه اندازه گیری گاز هیدروکسی تولید توسط سیستم گاز جمع کن ۳۱
- شکل ۸-۳: مشعل احتراقی استفاده شده در این پژوهش ۳۲
- شکل ۹-۳: مولتی متر مورد استفاده در آزمایش ها ۳۲
- شکل ۱۰-۳: دستگاه آنالیزور گاز احتراق مدل Testo 350 ۳۳
- شکل ۱۱-۳: نحوه ارزیابی گازهای خروجی توسط دستگاه آنالیزور دود ۳۴
- شکل ۱۲-۳: دوربین حرارتی مورد استفاده در آزمایش ها ۳۵
- شکل ۱۳-۳: شکل نهایی بستر آزمایش ۳۶
- شکل ۱-۴: شماتیک نحوه اتصال صفحات الکترولایزر به یکدیگر در حالت موازی ۳۹
- شکل ۲-۴: نمودار ولتاژ مصرفی الکترولایزر بر حسب شدت جریان در حالت موازی ۳۹
- شکل ۳-۴: نمودار میزان تولید گاز هیدروکسی بر حسب توان مصرفی الکترولایزر ۴۰

شکل ۴-۴: نمودار شدت مصرف انرژی بر حسب شدت جریان مصرفی الکترولایزر در حالت موازی بودن صفحات الکترولایزر

۴۲.....

شکل ۴-۵: نمودار میزان تولید به ازای سطح بر حسب شدت جریان مصرفی

شکل ۴-۶: نمودار میزان تولید گاز هیدروکسی با شدت جریان ۱۶ و ۲۶ آمپر با تعداد صفحات متغیر

شکل ۴-۷: شماتیک نحوه اتصال صفحات الکترولایزر به یکدیگر در حالت سری

شکل ۴-۸: نمودار ولتاژ مصرفی الکترولایزر بر حسب شدت جریان در حالت سری

شکل ۴-۹: تولید گاز هیدروکسی بر حسب توان مصرفی در حالت آرایش سری و موازی صفحات الکترولایزر

شکل ۴-۱۰: نمودار شدت مصرف انرژی بر حسب شدت جریان مصرفی الکترولایزر در حالت سری بودن صفحات الکترولایزر

۴۷.....

شکل ۴-۱۱: نمودار میزان تغییرات کاهشی مونوکسید کربن با مقادیر تزریقی مختلف گاز هیدروکسی

شکل ۴-۱۲: تغییرات شعله با تزریق ۰,۰۰۸ لیتر بر ثانیه گاز هیدروکسی

شکل ۴-۱۳: تغییرات شعله با تزریق ۰,۰۱۰۷ لیتر بر ثانیه گاز هیدروکسی

شکل ۴-۱۴: تغییرات شعله با تزریق ۰,۰۱۴ لیتر بر ثانیه گاز هیدروکسی

شکل ۴-۱۵: سمت راست شکل تزریق بدون گاز هیدروکسی و سمت چپ تزریق گاز هیدروکسی با دبی ۰,۰۰۸ لیتر بر ثانیه

۵۳.....

شکل ۴-۱۶: سمت راست شکل تزریق بدون گاز هیدروکسی و سمت چپ تزریق گاز هیدروکسی با دبی ۰,۰۱۴ لیتر بر ثانیه

۵۴.....

شکل ۵-۱: کالیبراسیون دستگاه آنالیزور گاز

۵۹.....

فصل اول: مقدمه و معرفی موضوع

۱-۱- مقدمه

انرژی تجدید پذیر انرژی سودمندی است که تمام شدنی نیست و بر خلاف سوخت‌های فسیلی دوباره جایگزین می‌شوند. از جمله این منابع می‌توان به نور خورشید، باد، باران، جزر و مد، امواج و گرمایش زمین گرمایی اشاره کرد [۱].

سوخت‌های تجدیدپذیر مانند دیگر منابع تجدید پذیر تمام شدنی نیستند و جایگزین می‌شوند به‌طور مثال: سوخت‌های زیستی (مثلا روغن گیاهی که به عنوان سوخت، اتانول، متانول از انرژی تمیز و کربن دی اکسی یا بیومس، و بیودیزل) و سوخت هیدروژن (زمانی که با فرایندهای تجدیدپذیر تولید شده باشد) [۲]. این در حالی است که سوخت‌های تجدید ناپذیر مانند گاز طبیعی، گاز مایع (پروپان)، نفت و دیگر سوخت‌های فسیلی و انرژی هسته‌ای در مقابل آن هستند. سوخت‌های تجدید پذیر می‌تواند شامل سوخت‌هایی باشند که از منابع انرژی تجدید پذیر، مانند باد و انرژی خورشیدی سنتز شده باشد. سوخت‌های تجدید پذیر به دلیل پایداری، سهم کم شان در چرخه کربن و در برخی موارد به دلیل مقادیر کمتر گازهای گلخانه‌ای محبوبیت زیادی بدست آورده‌اند. انشعابات جغرافیای سیاسی این سوخت‌ها نیز مورد علاقه هستند، به خصوص برای اقتصادهای صنعتی که طرفدار عدم وابستگی به نفت خاورمیانه هستند [۳]. استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر در چند سال گذشته به دلیل مصرف بیش از حد سوخت-های فسیلی و آلودگی محیط زیست رو به افزایش بوده است [۴]. همچنین بیشتر تحقیقات در چند سال گذشته در زمینه کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و یافتن جایگزینی مناسب برای آن بوده است [۵]. هیدروژن یکی از بهترین سوخت‌هایی است که به دلیل بهره وری بالا و فراوانی زیاد می‌تواند جایگزین مناسبی سوخت‌های فسیلی باشد [۶]. هیدروژن به ندرت به عنوان یک عنصر در طبیعت یافت می‌شود اما به فراوانی در ترکیب کربن با هیدروکربن‌ها و آب یافت می‌شود و آسیبی به محیط زیست نیز وارد نمی‌کند [۷، ۸]. از مزایای استفاده از هیدروژن به عنوان جایگزین برای سوخت‌های فسیلی، می‌توان به بازدهی بالا، فراوانی، شکل‌های مختلف ذخیره سازی، حمل و نقل از راه دور و همچنین روش‌های

مختلف برای تولید آن مانند گاززدایی زغال سنگ و بیومس، فرآیند ترموشیمیایی، فرآیند استخراج از گاز طبیعی و الکترولیز آب اشاره کرد [۹].

هیدروژن فراوان‌ترین عنصر در جهان است، بطوریکه ۷۵٪ جرم مواد طبیعی از این عنصر ساخته شده و بیش از ۹۰٪ اتم‌های تشکیل دهنده آن‌ها اتم‌های هیدروژن است. این عنصر به مقدار زیاد در ستارگان و سیارات یافت می‌شود. به نسبت فراوانی زیاد آن در جاهای دیگر، هیدروژن در اتمسفر زمین بسیار رقیق است (1ppm برحسب حجم). متعارف‌ترین منبع برای این عنصر در زمین آب است که از دو قسمت هیدروژن و یک قسمت اکسیژن (H_2O) ساخته شده است [10].

منابع دیگر عبارتند از مواد آلی که در اندام تمام موجودات زنده شناخته شده وجود دارند، زغال، سوخت فسیلی و گاز طبیعی متان (CH_4) که یکی از محصولات فرعی ترکیبات آلی است.

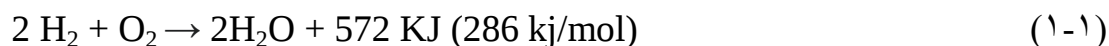
۲-۱- سوخت هیدروژنی و روش‌های تولید آن

هیدروژن کلمه فرانسوی به معنی سازنده آب است و برای اولین بار در سال ۱۷۷۶ بوسیله "هنری کاوندیش" بعنوان یک ماده مستقل شناخته شده، "آنتونی لاوازیه" نام هیدروژن را برای این عنصر انتخاب کرد [11].

هیدروژن با اکثر عناصر ترکیب شده و ترکیبات مختلف را بوجود می‌آورد. هیدروژن هنگامی ترکیبات را می‌سازد که عناصر غیر فلزی‌تر و عناصر فلزی‌تری وجود داشته باشند. در این حالت (غیر فلزی) تشکیل دهنده‌ها هیدریدها نامیده می‌شوند که هیدروژن یا بصورت یونهای H^- یا بصورت حل شده در عنصر دیگر وجود خواهد داشت (مانند هیدرید پالادیوم). در حالت دوم (ترکیب با فلز) هیدروژن تمایل برای تشکیل پیوند کووالانسی دارد، چون یونهای H^+ بصورت یک اتم عریان فاقد الکترون در می‌آیند، بنابراین تمایل شدیدی به جذب الکترون‌ها به سمت خود دارند. هر دوی این‌ها تولید اسید می‌کنند، لذا حتی در یک محلول اسیدی می‌توان یون‌هایی مثل H_3O^+ را دید که گویی پروتون‌ها به جایی محکم به چیزی

چسبیده‌اند [12].

گاز هیدروژن بسیار آتش‌گیر است و می‌تواند در هوا و در بازه گسترده‌ای از غلظت، میان ۴٪ تا ۷۵٪ حجمی، بسوزد. آنتالپی استاندارد سوختن برای هیدروژن ۲۸۶ کیلوژول بر مول است.



سوخت هیدروژن به استفاده از گاز هیدروژن به عنوان حامل انرژی اشاره دارد. به‌طور کلی، تولید سوخت هیدروژن تجدید پذیر را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد: تولید بیولوژیک و تولید شیمیایی که در ادامه به بررسی این دو روش پرداخته شده است. تحولات و فن‌آوری‌های جدید باعث می‌شوند این زمینه به سرعت تکامل یابد [13].

گاز هیدروژن را می‌توان از منابع بیومس مثل کشاورزی و باقی مانده‌های جنگل، زباله‌ها و سایر محصولات زراعی خاص کشاورزی تولید کرد. به‌طور خاصی، می‌توان سوخت هیدروژن را در فرایندی به نام تبخیر شدگی، که در آن بیومس با گازی قابل احتراق فرآوری شده و سپس سوزانده می‌شود بدست آورد. روش دیگر هم این است که بیومس را در گرماکافت و فرایند مرتبطی که به گاز هیدروژن مناسب برای کاربردهای سلول سوختی می‌رسد شرکت داده شود. موضوعی که به‌طور مداوم در مورد آن تحقیق می‌شود، تولید مشترک ناخواسته در این دو فرایند است [۱۴]. حضور گازهای آلاینده اغلب به ترکیب خاص منبع بیومس که کنترل آن مشکل است، بستگی دارد. یک منبع دیگر برای تولید بیولوژیکی سوخت هیدروژن، جلبک است. در اواخر ۱۹۹۰ میلادی دانشمندان پی بردند که اگر به جلبک‌ها گوگرد نرسد، آنها به جای تولید اکسیژن در فتوسنتز طبیعی، هیدروژن تولید می‌کنند. در مزارع آزمایشی جلبک تلاش بر این است که جلبک به یک منبع انرژی به صرفه تبدیل شود.

عبور بخار از روی کربن داغ، تجزیه هیدروکربن بوسیله حرارت، واکنش هیدروکسید سدیم یا پتاسیم بر آلومینیوم، الکترولیز آب یا از جابجائی آن در اسیدها توسط فلزات خاص است [۱۵]. تولید گاز هیدروژن در الکترولیز توسط فرآیند تجزیه مولکول‌های آب به هیدروژن و اکسیژن به کمک انرژی

الکتریکی انجام می‌شود. این فرآیند زمانی رخ می‌دهد که دو الکترود درون آب قرار گرفته و جریان مستقیم انرژی الکتریکی از بین دو الکترود عبور کند [۱۶].

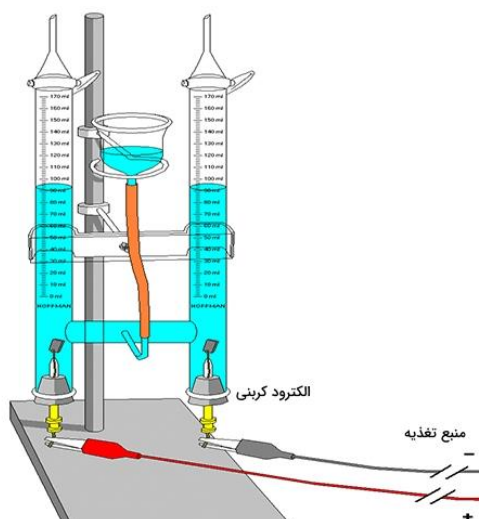
۳-۱- فرآیند الکترولیز آب

در الکترولیز با استفاده از یک جریان الکتریکی مستقیم مبادله اتم‌ها و یون‌ها به وسیله جا به جایی الکترون‌ها انجام می‌شود. در این فرآیند یک منبع جریان الکتریکی DC (وظیفه تامین انرژی را دارد)، به دو الکترودی که داخل الکترولیت قرار داده شده است، وصل می‌شود. الکترولیت در این سیستم، محلولی از یون‌های آزاد است که وظیفه انتقال جریان الکتریکی را بر عهده دارد. در فرآیند الکترولیز الکترودها یون‌های با بار مخالف را به سمت خود جذب می‌کنند. یون‌های مثبت به سمت کاتد و یون‌های منفی به سمت آنود می‌روند. در کاتد نیم واکنش کاهش و در آنود نیم واکنش اکسایش انجام می‌شود [۱۷].

اولین بار الکترولیز آب توسط کارلسیل و نیکولسن در سال ۱۸۰۰ انجام شد. در الکترولیز آب دو الکترود با صفحه فلزی مانند پلاتین و ایریدیم به یک منبع وصل می‌شود و الکترودها داخل الکترولیت اسید یا باز و یا نمک فلزی قرار داده می‌شوند. بعد از اعمال ولتاژ عمل الکترولیز انجام شده و واکنش اکسایشی - کاهش انجام می‌شود. در مجاورت الکترود آنود، آب اکسید شده و اکسیژن تولید می‌شود که به صورت حباب از ظرف خارج می‌شود. در مجاورت کاتد آب کاهش یافته و تولید حباب‌های هیدروژن می‌کند. در این الکترولیز به ازای یک مول اکسیژن تولید شده، دو مول هیدروژن تولید می‌شود [۱۸].

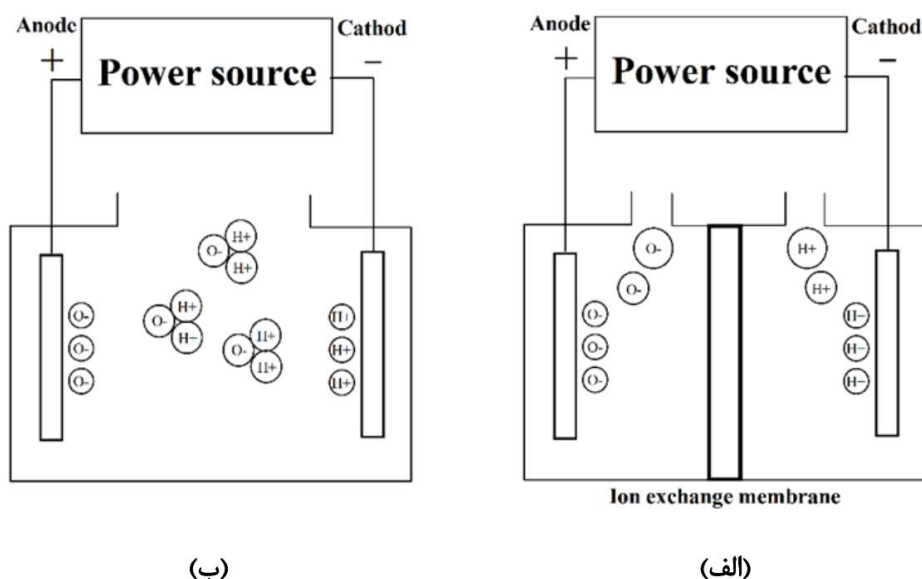
در شکل ۱-۱ نمونه ای از یک دستگاه الکترولیز موسوم به دستگاه هافمن نشان داده شده است [۱۹]. فرآیند اصلی در برقکافت، تبادل اتم‌ها و یون‌ها بوسیله حذف یا اضافه کردن الکترون‌ها از طریق یک مدار خارجی است. حالت فیزیکی محصول نهایی در این فرآیند به طور معمول با الکترولیت متفاوت است و با استفاده از مراحل فیزیکی می‌توان آن را از الکترولیت جدا کرد. به کمک الکترودهایی که در الکترولیت قرارداده شده‌اند، یک ولتاژ الکتریکی اعمال می‌شود. هر الکترود، یون‌های با بار ناهمنام را به خود جذب

می‌کند. یون‌های با بار مثبت، به طرف کاتد و یون‌های با بار منفی، به طرف آنود حرکت می‌کنند. در این فرآیند، الکترون‌ها ممکن است آزاد یا جذب شوند. اتم‌های خنثی با گرفتن یا آزاد کردن الکترون باردار می‌شوند و در طول الکترولیت حرکت می‌کنند. زمانی که یک یون به تعداد کافی الکترون بگیرد یا از دست بدهد تا خنثی شود، اتم جدیدی که ایجاد شده است از الکترولیت جدا خواهد شد.



شکل ۱-۱: نمونه ای از یک دستگاه الکترولیز موسوم به دستگاه هافمن [۲۰]

در الکترولیزرها از غشا نیمه تراوا برای جداسازی گاز هیدروژن و اکسیژن استفاده می‌شود، که در این صورت خروجی الکترولیزر هیدروژن خالص خواهد بود. اما با حذف غشا نیمه تراوا، جداسازی میان هیدروژن و اکسیژن انجام نمی‌شود و گاز هیدروکسی تولید می‌شود [۲۱، ۲۲]. در شکل ۱-۲ تفاوت تولید گاز هیدروژن در الکترولیزر و تولید گاز هیدروکسی نشان داده شده است.



شکل ۱-۲: شماتیک تولید گاز هیدروژن (الف) و هیدروکسی (ب) [۲۳]

۴-۱- واکنش های کاتد و آند در الکترولیز آب

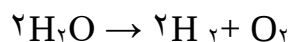
در هر فرآیند الکترولیز واکنش های اکسایشی - کاهش می شود که شامل دو نیم واکنش اکسایش و کاهش است. نیم واکنش اکسایشی در آند و نیم واکنش کاهش در کاتد انجام می شود. در الکترولیز آب، در آند با اکسایش آب پروتون، الکترون و اکسیژن طبق نیم واکنش زیر انجام می شود [24].



در کاتد نیم واکنش کاهش صورت می گیرد. به این ترتیب که الکترون های حاصل از نیم واکنش اکسایشی، به طرف الکتروود کاتد می رود و یون های هیدروژنی با حرکت به سمت الکتروود کاتد و به وسیله الکترون های مهاجرت کرده از طریق محلول الکتروولیت کاهش یافته و گاز هیدروژن تولید می کند.



واکنش کلی الکترولیز به شکل زیر خواهد بود:



(۱-۴)

۵-۱- کاربردهای صنعتی فرآیند الکترولیز

الکترولیز در صنعت استفاده‌های متعددی دارد که نمونه‌هایی از آن در زیر آورده شده است:

- کاربرد در الکترو متالورژی: فرآیند کاهش فلزات از ترکیبات فلزی و بدست آوردن آنها به شکل خالص است که از طریق الکترولیز صورت می‌گیرد. برخی فلزات قلیایی و قلیایی خاکی مانند لیتیم، سدیم، پتاسیم، منیزیم، کلسیم به همراه برخی فلزات دیگر همچون مس و آلومینیوم از این روش بدست می‌آیند [۲۵].
- تولید کلر و سدیم هیدروکسید
- تولید سدیم کلرات و پتاسیم کلرات
- تولید ترکیبات آلی پرفلوئوری مانند تری فلوئورو استیک اسید
- تولید مس الکترولیتی (مس کاتدی) از مس تصفیه شده با کیفیت پایین‌تر
- تولید اکسیژن برای فضاپیماها و زیردریایی‌های هسته‌ای
- تولید سوخت هیدروژنی

از الکترولیز همچنین در تمیز کردن و حفاظت از آثار هنری قدیمی نیز استفاده می‌شود. به دلیل اینکه این فرآیند موجب جداسازی اجزای غیر فلزی از فلز خواهد بود، از آن در تمیز کردن وسایل فلزی از سکه گرفته تا سرسیندرهای زنگ‌زده اتومبیل‌ها بهره می‌گیرند. همچنین از بین بردن زنگ آهن به سادگی و با ابزارهای خانگی نیز امکان‌پذیر است.

۶-۱- عوامل تاثیرگذار بر واکنش برقکافت

- **ولتاژ زیاد:** این امر به معنی اعمال ولتاژ بیش از حد انتظار است و در مواقعی استفاده می‌شود که به غلبه بر واکنش‌هایی نیاز داریم که در خود الکتروود صورت می‌گیرد. این مورد بیشتر در گازها کاربرد دارد [26].
- **نوع الکتروود:** یک الکتروود خنثی، به عنوان محلی برای وقوع واکنش عمل می‌کند و خود در واکنش شرکت نمی‌کند اما یک الکتروود فعال، بخشی از یک نیم‌واکنش خواهد بود.
- **واکنش‌های همزمان در الکتروود:** اگر دو نوع مختلف از نیم‌واکنش‌ها همزمان اتفاق بیافتند، برخی از نیم‌واکنش‌ها باید از بین بروند تا جفت نیم واکنش مناسب برای برقکافت مشخص شوند [27].
- **حالت واکنش‌دهنده‌ها:** اگر واکنش‌دهنده‌ها در حالت استاندارد خود قرار نداشته باشند، مقدار ولتاژ در هر نیم سلول با مقدار استاندارد متفاوت خواهد بود. در این حالت، محلول در بخش آند، pH بیشتر یا کمتر از ۴ خواهد داشت [28].

۷-۱- کاربردهای هیدروژن و گاز هیدروکسی

گاز هیدروژن کاربردهای مختلفی دارد و برای تولید سنگ معدن فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این گاز در شیمی صنعتی برای تولید اسید هیدروکلریک مورد استفاده قرار می‌گیرد و برای جوشکاری هیدروژن اتمی نیز کاربرد دارد. در ژنراتورهای برق نیز برای خنک کردن موتور ژنراتور استفاده می‌شود. بسیاری از کارخانه‌های تولیدی برای چک کردن نشت‌های خود بر این گاز تکیه کرده‌اند [29]. هیدروژن می‌تواند به تنهایی یا در کنار عناصر دیگر مورد استفاده قرار گیرد. همچنین

تولید آمونیاک از کاربرد های دیگر گاز هیدروژن می باشد. از آمونیاک برای تغییر روغن های اشباع نشده و ناسالم به اشباع شده و سالم استفاده می شود [30]. هم چنین برای تولید متانول و تولید تریتیوم (در واکنش هسته ای) نیز مورد استفاده قرار می گیرد که یک ایزوتوپ رادیواکتیو می باشد و برای تولید بمب از آن استفاده می شود. [31].

از گاز هیدروژن همچنین به عنوان سوخت به دلیل ارزش حرارتی بالای آن استفاده می شود. احتراق مقدار زیادی انرژی تولید می کند و ارزش حرارتی هیدروژن نیز ۲۸۶ کیلوژول به ازای هر مول است و هنگامی که هیدروژن به شکل مایع باشد از آن به عنوان سوخت موشک استفاده می شود. هیدروژنی دیگر نیز به اسم دوتریوم که هیدروژنی سنگین است در واکنش همجوشی هسته ای در راکتورهای هسته ای مورد استفاده قرار می گیرد [32].

بدلیل سبک بودن هیدروژن، پژوهشگران به استفاده از آن در بالن ها پرداختند. در بالن آب و هوای هواشناسان نیز این عنصر نصب گردیده است. این بالن ها با تجهیزاتی نصب شده اند که اطلاعات لازم راجع به مطالعه آب و هوا را ثبت کنند. طی جنگ جهانی اول، هیدروژن در بالن کشتی های هوایی مصرف می شد [33].

از استفاده های دیگر گاز هیدروژن در صنعت می توان به استفاده در صنعت های کود و رنگ و هم چنین صنایع غذایی و شیمیایی اشاره کرد. صنایع غذایی از این عنصر استفاده می کنند تا روغن های نباتی هیدروژنه مانند مارگارین و کره تولید کنند. در این روش، روغن های گیاهی با هیدروژن ترکیب میشوند و با استفاده از نیکل به عنوان کاتالیزور، مواد چربی جامد تولید می شوند [34].

در صنعت پتروشیمی هیدروژن برای اصلاحات نفت خام مورد نیاز می باشد. هیدروژن به عنوان یک عامل کاهنده در صنایع مورد نیاز می باشد. در شیمی صنعتی برای استخراج نفت استفاده می شود و

هم چنین از این گاز در دستگاه آنالایزر کروماتوگرافی گازی به عنوان گاز حامل استفاده می‌شود. از دیگر کاربردهای هیدروژن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۳۵]:

- مقدار قابل توجهی در برای تولید آمونیاک، هیدروژنه کردن چربی‌ها و روغن‌ها و تولید متانول.

- تولید اسید هیدروکلریک، جوشکاری، سوخت‌های موشک و احیاء سنگ معدن فلزی

- هیدروژن مایع در تحقیقات سرما شناسی مانند مطالعات ابررسانایی بکار می‌رود.

- هیدروژن چهارده و نیم بار از هوا سبکتر است و سابقاً بعنوان عامل بالا برنده در بالون‌ها و کشتی‌های هوایی مورد استفاده قرار می‌گرفت تا وقتی که فاجعه هیندنبورگ ثابت کرد که استفاده از این گاز برای این منظور بسیار خطرناک است.

- هیدروژن می‌تواند در موتورهای درون سوز سوخته شود. پیل های سوختی هیدروژنی، بعنوان راه کاری برای تولید توان بالقوه ارزان و بدون آلودگی، مورد توجه قرار گرفته است.

در الکترولایزرها با حذف غشا نیمه تراوا می‌توان هیدروژن و اکسیژن تولیدی را با هم مخلوط کرده و به گاز هیدروکسی دست یافت. از گاز هیدروکسی می‌توان در فرآیندهای احتراقی در جهت بهبود فرآیند احتراق، کاهش آلاینده‌های حاصل از احتراق، بهبود راندمان احتراق و همچنین افزایش دما شعله استفاده کرد. در این پژوهش در ادامه، در فصل دوم به بررسی پیشینه پژوهش در زمینه الکترولایزرها و تولید گاز هیدروژن و همچنین تولید گاز هیدروکسی و بررسی تاثیرات تزریق این گاز در فرآیندهای احتراقی پرداخته شده است. در فصل سوم به بررسی شرایط انجام آزمایش و مراحل آماده سازی سیستم آزمایشگاهی و دستگاه‌های مورد استفاده پرداخته شده است. در فصل چهارم به بررسی نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها مانند میزان تولید گاز هیدروکسی، شدت مصرف انرژی بهینه، میزان تولید به ازای سطح و... گزارش شده است. سپس به بررسی تاثیر میزان گاز هیدروکسی تولیدی در مشعل احتراقی پرداخته شده است. از گاز هیدروکسی تولیدی در جهت کاهش آلاینده‌های مشعل احتراقی و بررسی

تأثیر این گاز بر تغییرات شعله مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل پنجم به بررسی نتیجه گیری کلی و ارائه پیشنهاداتی پرداخته شده است.

فصل دوم: پیشینه تحقیق

۱-۲- مقدمه

هیدروژن فراوان‌ترین عنصر در جهان است بطوریکه ۷۵٪ جرم مواد طبیعی از این عنصر ساخته شده و بیش از ۹۰٪ اتم‌های تشکیل دهنده آنها اتم‌های هیدروژن است [36]. در سال ۱۶۷۱، رابرت بویل دریافت و توضیح داد که از واکنش میان آهن و یک اسید رقیق، باعث تولید گاز هیدروژن می‌شود. پس از او در سال ۱۷۶۶ هنری کاوندیش نخستین کسی بود که گاز هیدروژن را به عنوان یک ماده جداگانه شناخت. در سال ۱۹۳۱، هارولد یوری توانست دوتریوم و پس از او در ۱۹۳۴ ارنست رادرفورد، مارک اولیفانت و پاول هارتمک توانستند تریتیوم را بدست آورند. بعد از کشف هیدروژن، به علت خواص این عنصر مانند ارزش حرارتی بالا، قابل استفاده بودن به جای سوخت‌های فسیلی، آلودگی کمتر نسبت به نفت و گاز و زغال سنگ، استفاده از این عنصر تا به امروز رو به افزایش بوده است [۳۷-۳۹].

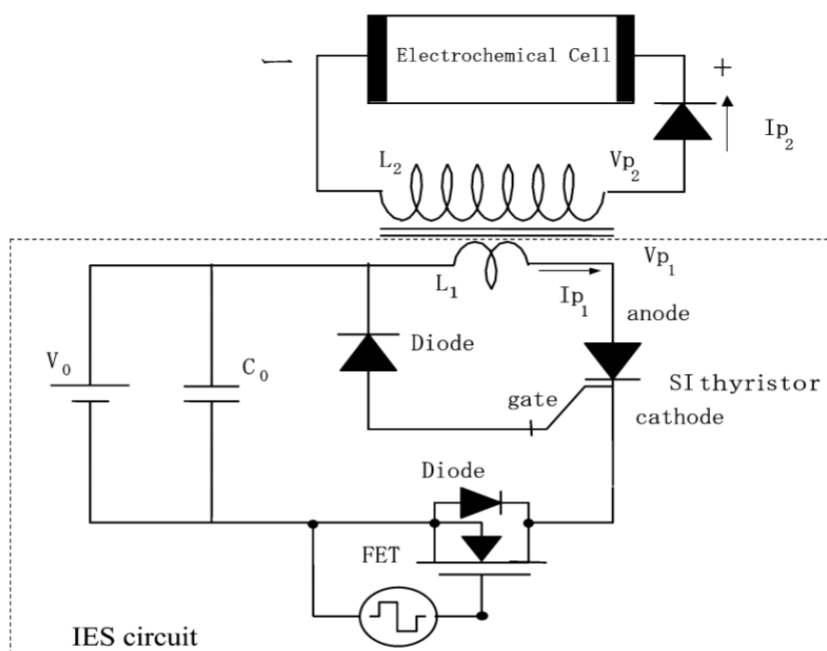
آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) پیش‌بینی می‌کند که تا سال ۲۰۵۰ هیدروژن می‌تواند بیش از ۱۰ درصد نیازهای جهانی انرژی را با بیش از ۱۱ میلیون گیگاوات ساعت انرژی در سال تامین کند. که این امر به بیش از ۴ تریلیون دلار سرمایه‌گذاری در زیرساخت برای تولید، ذخیره‌سازی و حمل هیدروژن نیاز دارد. اروپا به تنهایی تا سال ۲۰۳۰، تولید ۴۰ گیگاوات ظرفیت الکترولیز را هدف‌گذاری کرده است که حدود ۲ درصد پیش‌بینی IEA می‌باشد [40].

۲-۲- مروری بر تحقیقات گذشته

گاز هیدروژن به ندرت به عنوان یک عنصر در طبیعت یافت می‌شود اما به فراوانی در ترکیب کربن با هیدروکربن‌ها و آب یافت می‌شود و آسیبی به محیط زیست نیز وارد نمی‌کند [۷، ۸]. یکی از روش‌های تولید هیدروژن، الکترولیز آب است که هیچ گونه آلودگی منتشر نمی‌کند و به عنوان یک مسیر امیدوارکننده برای تولید هیدروکسی شناخته می‌شود. از مزایای استفاده از هیدروژن به عنوان جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی، می‌توان به بازدهی بالا، فراوانی، شکل‌های مختلف ذخیره‌سازی، حمل و نقل از راه دور و همچنین

روش‌های مختلف برای تولید آن مانند گاززدایی زغال سنگ و بیومس، فرآیند ترموشیمیایی، فرآیند استخراج از گاز طبیعی و الکترولیز آب اشاره کرد [۹]. تولید گاز هیدروکسی توسط فرآیند تجزیه مولکول‌های آب به هیدروژن و اکسیژن به کمک انرژی الکتریکی انجام می‌شود. این فرآیند زمانی رخ می‌دهد که دو الکتروود درون آب قرار گرفته و جریان مستقیم انرژی الکتریکی از بین دو الکتروود عبور کند [۱۶]. در الکتروالایزرها از غشا نیمه تراوا برای جداسازی گاز هیدروژن و اکسیژن استفاده می‌شود، که در این صورت خروجی الکتروالایزر هیدروژن خالص خواهد بود. اما با حذف غشا نیمه تراوا، جداسازی میان هیدروژن و اکسیژن انجام نمی‌شود و گاز هیدروکسی تولید می‌شود [۲۱، ۲۲]. در ادامه به بررسی پژوهش‌های دیگر محققان در زمینه تولید و استفاده از گاز هیدروکسی پرداخته خواهد شد.

میزانو و همکارانش [۴۱] در سال ۲۰۰۵ به بهینه سازی سطح الکتروود، دمای الکترولیت، دانسیته جریانی و ولتاژ ورودی با استفاده از الکترولیت K_2CO_3 با اعمال ولتاژ ۳۵۰ ولت پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تولید هیدروژن به میزان ۸۰ برابر از الکترولیز معمولی بیشتر است. شیمیزو و همکارانش [۴۲] در سال ۲۰۰۶ در تحقیقاتشان بر روی روش پالسی به این نتیجه رسید که افزایش جریان اعمالی به سلول، در زمان به کارگیری جریان پالسی، باعث کاهش بازده سلول نخواهد شد. مدار منبع تغذیه پالسی مورد استفاده توسط آنها در شکل ۲-۱ نشان داده شده است. به علاوه، آنها به این نتیجه رسیدند که هرچه سیکل کاری پالس کوتاه‌تر باشد، بازده الکترولیز بالاتر خواهد بود و بیشترین راندمان به دست آمده توسط آنها ۴۴٪ بود.



شکل ۲-۱: مدار منبع تغذیه مورد استفاده توسط شیمیزو و همکارانش [۴۲]

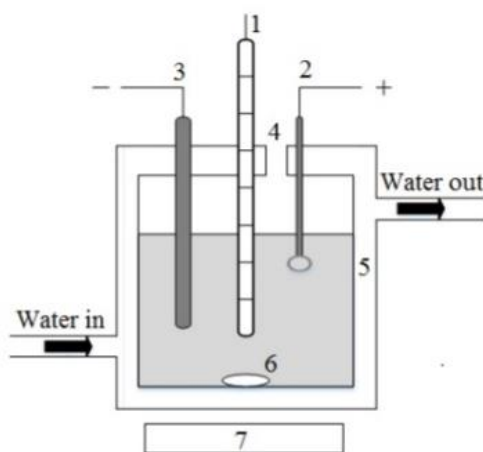
لاوتون [۴۳] در سال ۲۰۱۰ با القای امواج مربعی DC با فرکانس حدود 40 کیلوهرتز، باعث افزایش بازده قابل توجه گاز هیدروکسی توسط الکترولایزر شد. وی به این نتیجه رسید که فرکانس رزونانس سلول‌های الکترولایزر بستگی به پارامترهای زیادی دارد و این فرکانس در هر الکترولایزر با اندازه‌ها و مشخصات مختلف متفاوت است.

هانگ ون چانگ و چنگ چه سو [۴۴] در سال ۲۰۱۲ به بررسی میزان خوردگی الکترودها، میزان پایداری پلاسما، میزان مصرف انرژی و اثرات فرکانس با استفاده از محلول آب شور پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در فرکانس ۱۰۰ هرتز و ولتاژ اعمالی ۳۵۰ ولت، احتراق پلاسمایی پایداری صورت می‌گیرد و همچنین امواج DC در مقابل امواج AC، فرسایش کمتری در سطح الکترودها ایجاد می‌کنند.

ماندال و همکارانش [۴۵] در سال ۲۰۱۲ به آزمایش الکترودهای استوانه‌ای قلمی و صفحه‌ای و مقایسه راندمان مصرف انرژی و تولید هیدروژن در زمان بکارگیری هریک از الکترودها و همچنین مقایسه راندمان مصرف انرژی و تولید هیدروژن در زمان اعمال جریان پالسی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که راندمان الکترولیز به میزان ۲۵ تا ۳۰ درصد در هنگام استفاده از الکترودهای استوانه‌ای در مقایسه با الکترودهای

صفحه‌ای افزایش می‌یابد و راندمان مصرف انرژی ۳۴٪ در زمان استفاده از تکنولوژی پالسی به جای جریان DC بیشتر می‌شود.

ساکسونو و همکارانش [۴۶] در سال ۲۰۱۵ به بررسی اثرات ولتاژ، غلظت الکترولیت و عمق الکترود آند در فرایند الکترولیز با استفاده از پتاسیم هیدروکساید و استفاده از تنگستن در الکترود آند و استیل ضد زنگ در الکترود کاتد پرداختند. شماتیک الکترولایزر آن‌ها در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بیشترین راندمان تولید گاز هیدروکسی در شرایط اعمال ولتاژ ۶۰۰ ولت، ۰٫۰۲ مول محلول پتاس سدیم و ۰٫۵ سانتی متر عمق الکترود آند رسیدند. همچنین به تولید ۳٫۵۱ میلی مول هیدروکسی با مصرف ۲۳۷ کیلوژول توان دست یافتند.

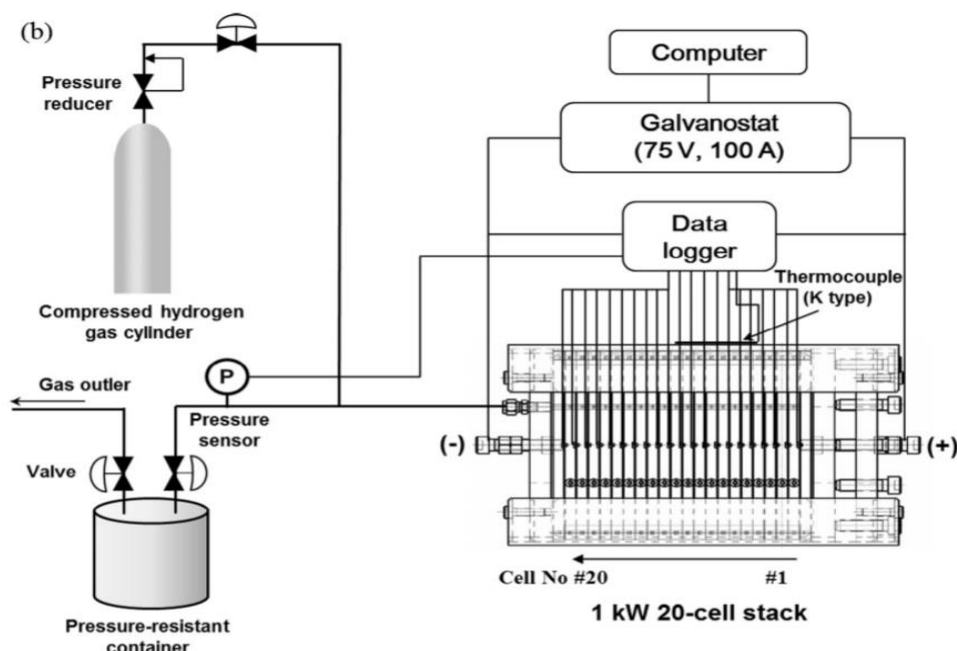


شکل ۲-۲: شماتیک الکترولایزر ساخته شده توسط ساکسونو و همکارانش [۴۶]

کایا و همکارانش [۴۷] در سال ۲۰۱۷ به بررسی یک الکترولایزر که از جنس استیل ۳۰۴ ساخته شده است، با استفاده از روش میدان مغناطیسی پرداختند. آن‌ها تاثیر غلظت میزان الکترولیت پتاسیم هیدروکساید را نیز مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که نیروی لورنتس اگر به سمت بالا باشد، تولید هیدروژن را برای ۵ درصد وزنی و ۱۵ درصد وزنی محلول پتاسیم هیدروکساید تقریباً ۱۷ درصد افزایش می‌دهد. افزایش چگالی جریان برای ۵٪ وزنی، ۱۰٪ وزنی و ۱۵٪ وزنی غلظت به ترتیب ۱۹٪، ۵٪، ۱۳٪ است اما اگر این نیرو به سمت پایین وارد شود، برای ۵ درصد وزنی، ۱۰ درصد وزنی و

۱۵ درصد وزنی غلظت پتاسیم هیدروکساید ، تولید هیدروژن به ترتیب ۱۴ درصد، ۸ درصد و ۷ درصد کاهش می یابد.

چوی و همکارانش [۴۸] در سال ۲۰۱۷ یک الکترولایزر ۲۰ سلولی با توان ۱ کیلووات که جنس صفحات مثبت از نیکل هیدروکسید و جنس صفحات منفی از فلز هایدراید است، ساختند. در شکل ۲-۳ شماتیک پژوهش آن‌ها نشان داده شده است. پس از انجام آزمایش‌ها آنها به این نتیجه رسیدند که الکترودهای نازک و متخلخل شارژ الکتریکی بیشتری انتقال می‌دهند و تولید هیدروژن را ۲۵۹,۱ میلی لیتر به ازای هر وات ساعت گزارش کردند.



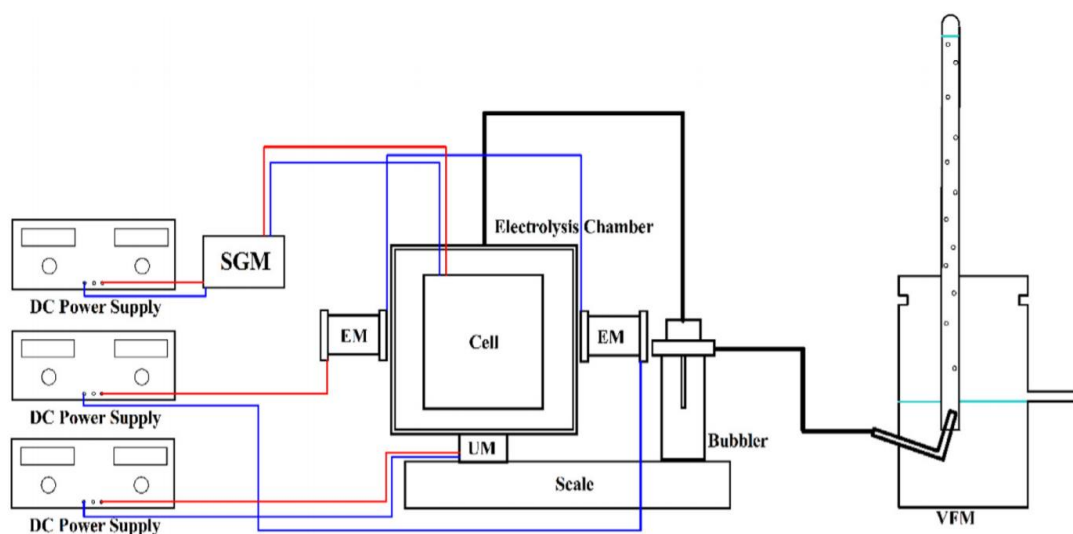
شکل ۲-۳: شماتیک پژوهش چوی و همکارانش [۴۸]

امانوئل و همکارانش [۴۹] در سال ۲۰۱۸ به استفاده از سیکل الکتروشیمیایی و تولید هیدروژن و اکسیژن در زمان‌های مختلف با اعمال جریان پالسی منقطع پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بیشترین راندمان الکترولیز با اعمال دانسیته جریانی ۰,۲ آمپر بر سانتی متر مربع رخ می‌دهد و زمان دستیابی به بیشترین راندمان، ولتاژ سلول برابر ۱,۶۹ ولت و دمای محلول ۲۵ درجه سانتی‌گراد در فرکانس ۵۰۰ هرتز اندازه‌گیری شده است.

افندی و همکارانش [۵۰] در سال ۲۰۱۹ به ساخت و بررسی یک الکترولایزر از جنس فولاد زنگ نزن با استفاده از کاتالیزور پتاسیم هیدروکساید پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزایش غلظت کاتالیزورهای پتاسیم هیدروکساید منجر به افزایش مصرف برق می شود و بالاترین راندمان تولید کننده گاز هیدروکسی ۷۶،۵۴٪ در غلظت ۷۰ گرم در لیتر کاتالیزور پتاسیم هیدروکساید است.

روسدینساری و همکارانش [۵۱] در سال ۲۰۱۹ به بررسی چگونگی تولید گاز هیدروکسی توسط الکترولایزر پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد بهینه ترین حالت برای تولید گاز هیدروکسی با غلظت ۵٪ و اعمال جریان ۱۵ آمپر است. همچنین با توجه به بهینه ترین حالت برای سیستم میزان تولید گاز هیدروکسی ۰،۱۰۲۸ لیتر بر دقیقه با بازده ۸۹،۱۳٪ است.

سالک و همکارانش [۲۳] در سال ۲۰۲۰ به بررسی اثرات شکل و فاصله الکترودها و تأثیرات فن آوری های بهبود امواج فراصوت، امواج پالس DC با فرکانس های مختلف و میدان مغناطیسی برای بهبود میزان تولید گاز هیدروکسی پرداختند. شماتیک پژوهش سالک و همکارانش در شکل ۴-۲ نشان داده شده است. نتایج آن‌ها نشان داد که با استفاده از روش پالس DC با فرکانس ۳۰۰ کیلو هرتز به سلول الکترولایزر، بالاترین میزان تولید گاز هیدروکسی، بازده انرژی و کمترین شدت انرژی در میان سایر فن آوری ها حاصل می شود.



شکل ۲-۴: شماتیک پژوهش سالک و همکارانش [۲۳]

سابراماریان و همکارانش [۵۲] در سال ۲۰۲۰ به محاسبه عددی و تجربی میزان تولید گاز هیدروکسی و تجزیه و تحلیل عملکرد الکترولایزر با القای جریان 40 A/H در دمای 80°C درجه سانتیگراد پرداختند. آنها با توجه به شرایط بیان شده به میزان تولید 0.75 L/MIN دست یافتند و مدل عددی ارائه شده توسط آنها میزان تولید گاز هیدروکسی را با شرایط آزمایش اول میزان 1.3 L/MIN پیش‌بینی کرد. روند هر دو آزمایش و مدل برای تغییر در جریان و میزان تولید گاز هیدروکسی یکسان بود. همچنین تأثیر پارامترهایی مانند غلظت محلول الکترولیت بر پتانسیل، اثر زمان و تأثیر دما بر میزان تولید را ارائه دادند و انرژی مورد نیاز و تعداد ماژول‌ها یا واحدهای تولید گاز هیدروکسی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

کادی و همکارانش [۵۳] در سال ۲۰۲۰ به بررسی الکترولایزر تولید کننده گاز هیدروکسی با صفحات استیل 316 با ضخامت 3 میلی‌متر و الکترولیت NaOH و هیدروکسی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش ولتاژ از 2 ولت به 4 ولت باعث افزایش کارایی الکترولیز تا 51.12% می‌شود اما در ولتاژهای بیشتر از 4 کارایی الکترولیز کاهش یافت. سپس با جریان 6 آمپر میزان تولید گاز هیدروکسی را 137 میلی لیتر در دقیقه و با شدت آمپر 42 میزان تولید 654 میلی لیتر در دقیقه است. همچنین آن‌ها بهینه ترین حالت را با غلظت 5% و آمپر 14 بیان کردند.

جانا و همکارانش [۵۴] در سال ۲۰۲۱ به بررسی الکترولایزر تولید کننده گاز هیدروکسی با جنس برنج و آلومینیوم با شدت جریان‌های 20 ، 30 ، 40 و 50 آمپر پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که کمترین میزان تولید گاز هیدروکسی با جریان 20 آمپر و الکتروکد آلومینیومی 0.0033554 متر مکعب بر ثانیه است. از طرفی بیشترین میزان تولید مربوط با الکتروکد برنجی و جریان 50 آمپر، 0.01657 متر مکعب بر ثانیه است.

محمد و همکارانش [۵۵] در سال ۲۰۲۱ به ساخت الکترولایزر چند سلولی از جنس استیل 316 پرداختند و با استفاده از سلول خورشیدی و کنترل شارژ توان مورد نیاز الکترولایزر را تامین کردند. نتایج

آن‌ها نشان داد که به راحتی می‌توان از سلول خورشیدی برای فرآیند الکترولیز آب استفاده کرد و میزان تولید گاز هیدروکسی با جریان ۱۵ آمپر برابر ۳ لیتر در دقیقه است.

الکسابی و همکارانش [۱۳] به بررسی تاثیر تزریق گاز هیدروکسی بر بازده موتور و آلاینده‌گی پرداختند. آن‌ها به ساخت الکترولايزر تولید گاز هیدروکسی پرداختند و با افزایش غلظت الکترولیت و فاصله بین سلولی میزان تولید گاز هیدروکسی را بهبود بخشیدند. نتایج تزریق گاز هیدروکسی به موتور نشان می‌دهد که راندمان حرارتی تا ۱۰٪ افزایش داشته و آلاینده‌های CO، HC، NOx به ترتیب ۳۴٪، ۱۸٪ و ۱۵٪ کاهش می‌یابد.

کاراگوز و همکارانش [۵۶] در سال ۲۰۱۸ به بررسی تاثیر تزریق گاز هیدروکسی بر بازده موتور و آلاینده‌گی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که تزریق گاز هیدروکسی باعث افزایش توان موتور داخلی و همچنین آلاینده‌گی‌های CO و HC به ترتیب ۲۱٫۳٪ و ۸۶٫۱٪ کاهش داشته است. از طرفی آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در زمان تزریق گاز هیدروکسی مقدار آلاینده‌گی NOx افزایش ناچیزی دارد. تاثیر پاشش گاز هیدروکسی درون موتور در چند پژوهش دیگر نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آن‌ها نیز نشان می‌دهد که گاز هیدروکسی باعث کاهش مونوکسید کربن و همچنین مقادیر هیدروکربن خواهد شد [۵۷، ۵۸].

۲-۳- معرفی پژوهش حاضر و نوآوری آن

بررسی پژوهش‌های دیگران در زمینه تولید گاز هیدروکسی با استفاده از فرآیند الکترولیز نشان می‌دهد که این فرآیند، روشی امیدوار کننده برای تولید گاز هیدروکسی و کاهش آلاینده‌گی و همچنین کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی خواهد بود. به همین منظور در این پژوهش به ساخت الکترولايزر تولید کننده گاز هیدروکسی چند سلولی، با استفاده از ورق استیل ۳۱۶ پرداخته شده است. برای افزایش رسانایی آب مقطر از الکترولیت پتاسیم هیدروکساید با غلظت ۵٪ استفاده شده است. برای تامین انرژی مصرفی الکترولايزر از یک منبع تغذیه با ولتاژ ۳۲ ولت و شدت جریان ۲۰۰ آمپر، سلول خورشیدی و منبع تغذیه

کوچکتر (برای شدت جریان‌های پایین) با شدت جریان ۱۰ آمپر و ولتاژ ۳۲ ولت استفاده شده است. سپس به اندازه گیری میزان تولید گاز هیدروکسی در حالت‌های مختلف و تعداد صفحات الکترولایزر پرداخته شده است. سپس میزان گاز هیدروکسی تولید شده توسط الکترولایزر مستقیماً در مسیر هوا یک مشعل احتراقی گاز سوز به صورت کنترل شده جهت جلوگیری از انفجار ناگهانی، تزریق شده است و ارزیابی اثرات آن در فرآیند احتراق صورت گرفته است.

بیشتر پژوهش‌های گذشته در زمینه تزریق گاز هیدروکسی به موتورهای احتراق داخلی بوده، که مقادیر مختلف تزریق گاز و تاثیر این گاز را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش با ساخت یک الکترولایزر چندسلولی، گاز هیدروکسی تولیدی در مسیر هوای ورودی به مشعل احتراقی تزریق شده است و تاثیر این گاز بر طول شعله، میزان انتشار کربن مونوکسید، انتشار کربن دی اکسید کربن و دیگر آلاینده‌ها در شدت جریان‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است.

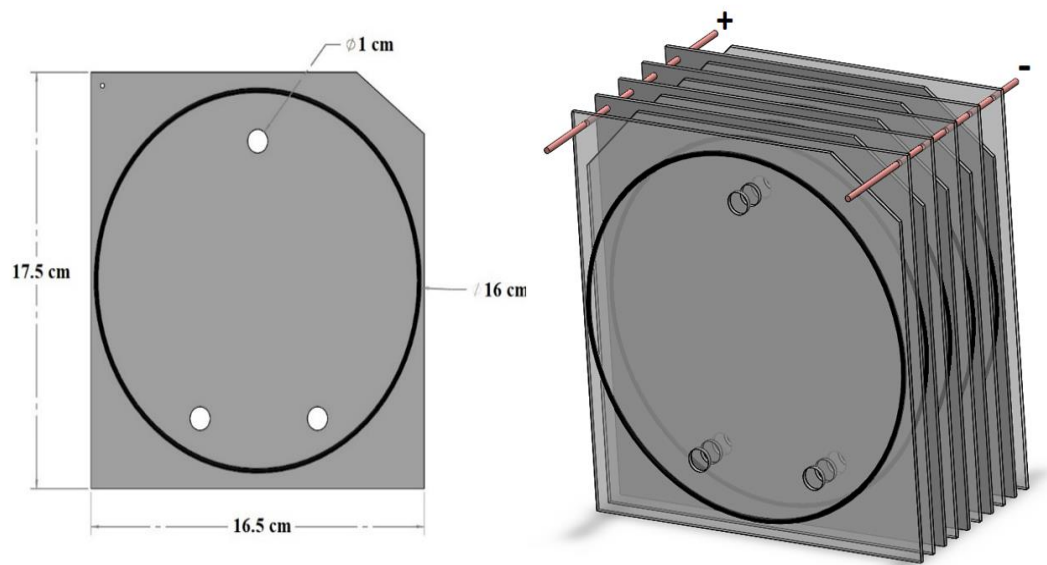
فصل سوم: طراحی و آماده سازی بستر آزمایش

۱-۳- مقدمه

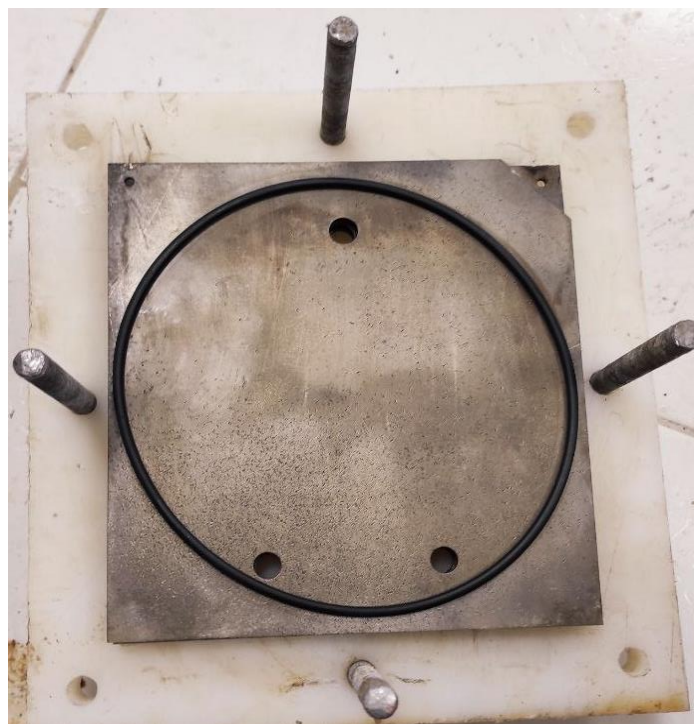
جهت ارزیابی الکترولاایزر برای بهبود مصرف انرژی آن، در این پژوهش یک الکترولاایزر چند سلولی تولید کننده گاز هیدروکسی طراحی و ساخته شد. در ادامه به بررسی اندازه صفحات و هندسه سلول‌ها، اورینگ استفاده شده بین صفحات و بررسی کامل الکترولاایزر پرداخته خواهد شد.

۲-۳- آماده کردن سلول‌های الکترولاایزر

در شکل ۱-۳ شماتیک الکترولاایزر و صفحات آن نشان داده شده است. ابعاد صفحات الکترولاایزر $17/5 \times 16/5$ سانتی متر و صفحات آن از جنس استیل ۳۱۶ متخلخل با ضخامت ۲ میلی متر است که در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. برای جلوگیری از اتصال صفحات به یکدیگر، از اورینگ با ضخامت ۲ میلیمتر به صورت دایره‌ای استفاده شده است. نحوه عملکرد سیستم به این صورت است که مخلوط آب و پتاسیم هیدروکساید از دو حفره پایینی به دیگر صفحات منتقل می‌شود و گاز هیدروکسی تولید شده، از حفره بالایی صفحات خارج می‌شود. ورودی مخلوط آب و الکترولیت و همچنین خروجی گاز هیدروکسی هر دو وارد مخزن تعبیه شده در بالادست می‌شود. در بالای مخزن لوله خروجی گاز هیدروکسی تعبیه شده، که گاز از آنجا خارج می‌شود. این الکترولاایزر از صفحات استیل با تعداد دلخواه تشکیل شده است و صفحات به صورت دو به دو توسط سیم با ضخامت مناسب مطابق شکل به یکدیگر متصل شده اند. همچنین صفحات به ترتیب دارای قطب مثبت و منفی می‌باشند. سپس توسط دو صفحه پلاستیکی با ضخامت ۲ سانتی‌متر که در ابتدا و انتها صفحات قرار می‌گیرد، صفحات به یکدیگر فشرده می‌شوند تا گاز هیدروکسی تولیدی بتواند مسیر مورد نظر به سمت مخزن را طی کند. البته این نحوه اتصال موازی صفحات است که به طور معمول در پژوهش‌های دیگر مورد استفاده قرار گرفته است (درفصل‌های بعد درخصوص روش‌های اتصال صفحات توضیح داده خواهد شد). در شکل ۳-۲ مراحل آماده سازی سلول - های الکترولاایزر نشان داده شده است.



شکل ۳-۱: شماتیک الکترو لایزر و صفحات آن



شکل ۳-۲: آماده سازی صفحات الکترو لایزر

در جدول ۳-۱ نیز مشخصات کامل الکترولایزر تولید کننده گاز هیدروکسی نشان داده شده است.

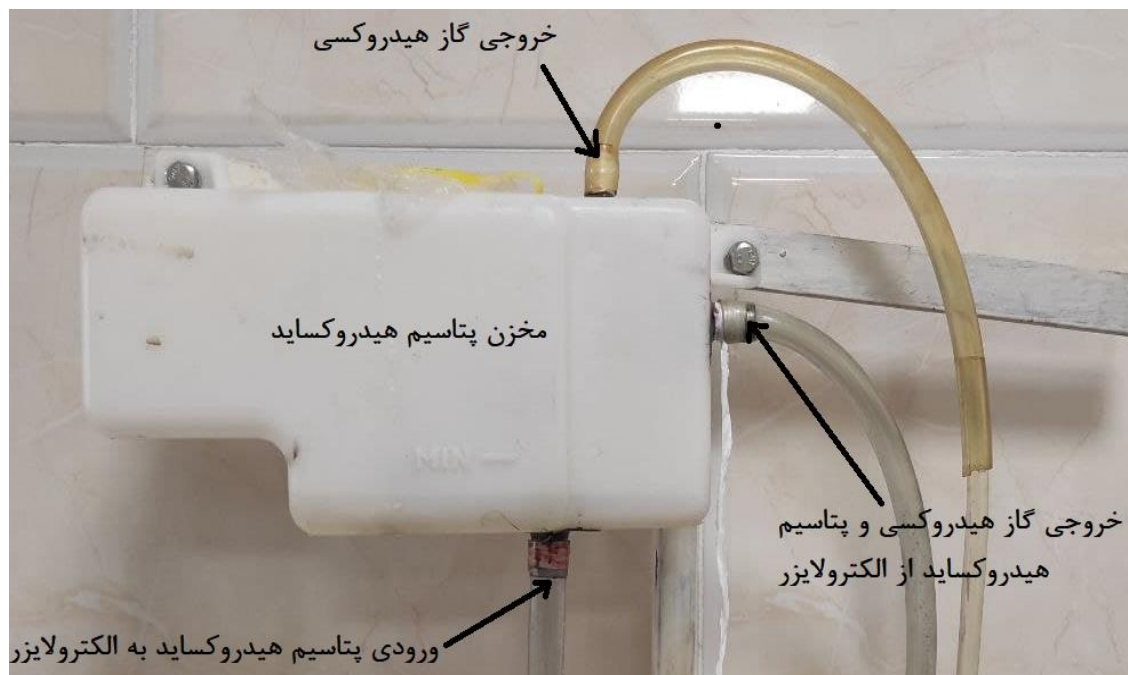
جدول ۳-۱: مشخصات کامل الکترولایزر	
جنس صفحات	استیل ۳۱۶
طول صفحات	۱۷,۵ سانتی متر
عرض صفحات	۱۶,۵ سانتی متر
ضخامت صفحات	۲ میلی متر
نوع الکترولیت	پتاسیم هیدروکساید
سطح صفحات	متخلخل
ضخامت اورینگ	۲,۵ میلی متر
قطر اورینگ	۱۶ سانتی متر

در شکل ۳-۳ شکل واقعی الکترولایزر تولید کننده گاز هیدروکسی و مخزن گاز هیدروکسی و پتاسیم هیدروکساید نشان داده شده است. نحوه عملکرد سیستم به این صورت است که مخلوط آب و پتاسیم هیدروکساید از دو حفره پایینی به دیگر صفحات منتقل می شود و گاز هیدروکسی تولید شده، از حفره بالایی صفحات خارج می شود. ورودی مخلوط آب و الکترولیت و همچنین خروجی گاز هیدروکسی هر دو وارد مخزن تعبیه شده در بالادست می شود. در بالای مخزن لوله خروجی گاز هیدروکسی تعبیه شده، که گاز از آنجا خارج می شود. صفحات به صورت دو به دو توسط سیم با قطر مناسب مطابق شکل به یکدیگر متصل شده اند. همچنین صفحات به ترتیب دارای قطب مثبت و منفی می باشند. سپس توسط دو صفحه پلاستیکی با ضخامت ۲ سانتی متر که در ابتدا و انتها صفحات قرار می گیرد، صفحات به یکدیگر فشرده می شوند تا گاز هیدروکسی تولیدی بتواند مسیر مورد نظر به سمت مخزن را طی کند.



شکل ۳-۳: الکترولایزر و مخزن آن

در شکل ۳-۴ مخزن استفاده شده در بالادست و لوله‌های ورودی و خروجی آن شرح داده شده است. الکترولایزر در حین واکنش الکترولیز تحت فشار قرار می‌گیرد و ممکن در قسمت خروجی گاز هیدروکسی مقداری پتاسیم هیدروکساید نیز وجود داشته باشد. به همین جهت ابتدا خروجی گاز هیدروکسی از الکترولایزر وارد یک مخزن می‌شود و سپس در بالادست مخزن لوله خروجی گاز تعبیه شده است که گاز هیدروکسی با توجه به سبک بودن آن از قسمت بالا دست مخزن خارج می‌شود و حتی در صورت تحت فشار بالا قرار گرفتن الکترولایزر نیز خروجی آن شامل پتاسیم هیدروکساید نخواهد بود.



شکل ۳-۴: مخزن تعبیه شده در بالا دست الکترولایزر

۳-۳- منبع تغذیه

در این پژوهش برای تامین انرژی مورد نیاز الکترولایزر از منابع مختلف DC برای تامین شدت جریانهای مختلف از ۱ تا ۱۴۰ آمپر و ولتاژ ۰ تا ۳۲ ولت استفاده شده است. انرژی تولیدی توسط منبع تغذیه با استفاده از کابل های فشار قوی به الکترولایزر منتقل می شود. در شکل ۳-۵ منابع تغذیه مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است. برای شدت جریان های زیر ۱۰ آمپر از یک منبع تغذیه کوچک و برای آمپر های برای شدت جریان های بالاتر از ۳۰ آمپر از مبدل جریان جوشکاری استفاده شده است. همچنین از سلول های خورشیدی که در شکل ۳-۶ نشان داده شده است، برای تامین شدت جریان های بین ۱۰ تا ۳۰ آمپر استفاده شده است.



شکل ۳-۵: منبع تغذیه مورد استفاده برای شدت جریان‌های الف) بالاتر از ۳۰ آمپر و ب) کمتر از ۱۰ آمپر

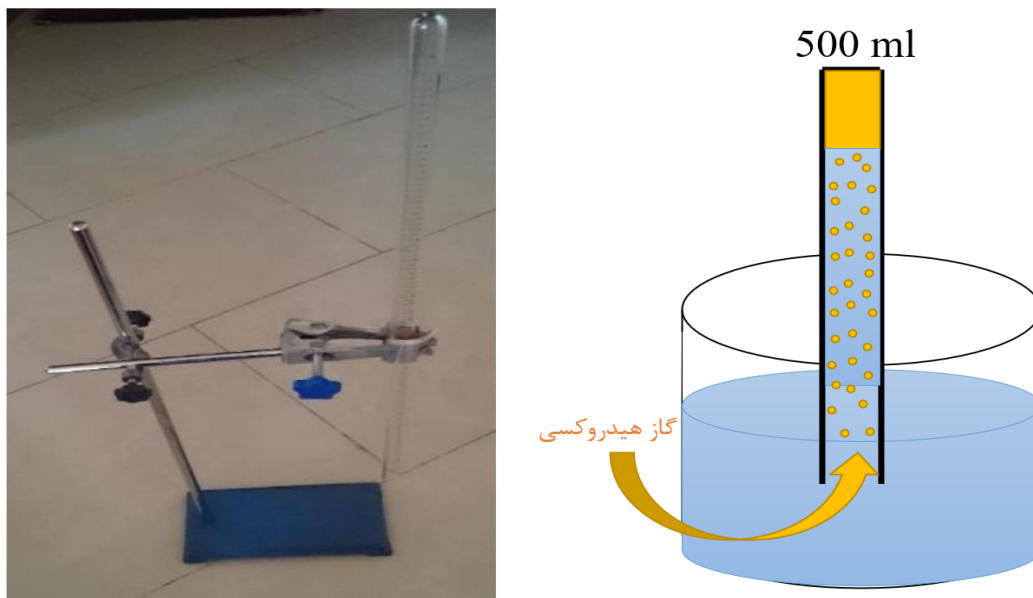


شکل ۳-۶: پنل‌های خورشیدی مورد استفاده جهت تامین شدت جریان‌های بین ۱۰ تا ۳۰ آمپر

۴-۳- نحوه اندازه‌گیری میزان گاز هیدروکسی

برای اندازه‌گیری گاز هیدروکسی تولیدی توسط الکترولایزر، از یک استوانه مدرج پر از آب که این استوانه مدرج، داخل یک مخزن آب قرار دارد، استفاده شده است. گاز هیدروکسی تولیدی توسط الکترولایزر با استفاده از شلنگ به درون استوانه پر از آب منتقل می‌شود و با گذشت زمان گاز هیدروکسی جایگزین آب

درون آن خواهد شد و مدت زمان پر شدن استوانه توسط گاز هیدروکسی، اندازه گیری می‌شود. شماتیک و تصویری از نحوه اندازه گیری گاز هیدروکسی تولیدی در شکل ۳-۷ نشان داده شده است.



شکل ۳-۷: نحوه اندازه گیری گاز هیدروکسی تولید توسط سیستم گاز جمع‌کن

۵-۳- مشعل احتراق

در این پژوهش گاز هیدروکسی تولیدی توسط الکترولایزر به یک مشعل احتراقی با ظرفیت حرارتی ۴۰۰۰۰ کیلو کالری بر ساعت تزریق می‌شود. دبی هوای ورودی توسط دمپر هوایی که در بدنه مشعل نصب شده است، براساس ظرفیت آن بصورت دستی یا موتوری کنترل می‌شود. این مشعل گازسوز برای احتراق گاز طبیعی طراحی شده است و گاز لازم برای احتراق در این مشعل‌ها، پس از عبور از فیلتر گاز توسط شیر برقی کنترل شده و هوای لازم برای احتراق آن‌ها نیز توسط یک دمنده که بر روی محور موتور نصب شده است، تأمین می‌گردد. در شکل ۳-۸ مشعل احتراقی استفاده شده در این پژوهش نشان داده شده است. همچنین ناحیه مشخص شده محل دقیق تزریق گاز هیدروکسی توسط لوله آلومینیومی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۸: مشعل احتراقی استفاده شده در این پژوهش

۳-۶- تجهیزات اندازه گیری

۳-۶-۱- مولتی متر

در این پژوهش برای قرائت دقیق جریان و ولتاژ الکترولایزر از مولتی متر مدل UT-203 با دقت $\pm 0.1\%$ ولت و $\pm 0.2\%$ آمپر استفاده شده است. این مولتی متر توانایی اندازه گیری جریان متناوب و مستقیم تا ۴۰۰ آمپر و همچنین قابلیت اندازه گیری ولتاژ تا ۶۰۰ ولت را دارد. (کاتالوگ دستگاه در شکل ۵-۲ پیوست نشان داده شده است)



شکل ۳-۹: مولتی متر مورد استفاده در آزمایش‌ها

۲-۶-۳- دستگاه آنالیزور گاز احتراق

در این پژوهش برای بررسی تاثیر گاز هیدروکسی بر میزان آلاینده‌گی مشعل احتراق، از دستگاه آنالیزور گاز مدل Testo 350 استفاده شده است. این دستگاه ابزاری ایده آل برای تجزیه و تحلیل گازهای خروجی به صورت حرفه ای و انواع اندازه گیری های انتشار گازهای صنعتی می باشد و قابلیت اطمینان اندازه گیری این دستگاه بالای ۹۵٪ است (در قسمت پیوست، نتایج کالیبراسیون و دقت اندازه گیری قسمت‌های مختلف دستگاه نشان داده شده است). همچنین دارای نمایشگر گرافیکی با وضوح بالا، چهار برنامه مختلف با منو برای انتخاب وجود دارد: مشعل، توربین گاز، موتورها و سایر برنامه های تعریف شده توسط کاربر می باشد. در شکل ۳-۱۰ شکل واقعی دستگاه آنالیزور گاز مدل Testo 350 نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۰: دستگاه آنالیزور گاز احتراق مدل Testo 350

برای استفاده از دستگاه آنالیزور دود، مشعل احتراقی درون یک لوله قرار گرفته و سپس با استفاده از اتصالات دستگاه آنالیزور دود، قسمتی از لوله سوراخ شده تا بتوان تاثیر گاز هیدروکسی را مانند شکل ۳-۱۱ به طور دقیق ارزیابی کرد.



شکل ۳-۱۱: نحوه ارزیابی گازهای خروجی توسط دستگاه آنالیزور دود

۷-۳- دوربین حرارتی

دوربین حرارتی مادون قرمز جهت تهیه نقشه حرارتی پدیده های مختلف طراحی و ساخته شده است. دوربین حرارتی نیازی به نور محیط ندارد و صرفاً با تغییرات دمایی واکنش نشان داده و این تغییرات را ثبت و قابل بررسی می نماید. در واقع همانطور که دوربین های معمولی با ثبت میزان انعکاس نور بازگشتی از پدیده ها در محدوده مرئی، این اجسام را مشخص می نماید، دوربین حرارتی همین عملیات را در محدوده امواج الکترو مغناطیس مادون قرمز حرارتی انجام می دهد با این تفاوت که وضوح عکس های این نوع دوربین بسیار کمتر از دوربین های معمولی است و به عنوان مثال توانایی ثبت جزئیات چهره افراد را در فواصل دور ندارد. همچنین قیمت این تجهیز نسبت به دوربین های مرئی بسیار بالاتر می باشد و دقت اندازه گیری آن ۱ درجه سانتیگراد است. برخی از انواع این دوربین با قابلیت عکسبرداری در ناحیه مرئی و حرارتی امکان تحلیل های مختلف را مهیا می سازد. یکی از پارامترهای مهم در استفاده از این دستگاه امکان مشاهده و ذخیره سازی عکس ترکیبی که از روی هم گذاری عکس های حرارتی و مرئی به دست می آید می باشد. این تجهیز کاربردهای مختلفی را در بر دارد که از مهمترین آن ها استفاده آن در صنعت و کارخانه های صنعتی جهت تحلیل های حرارتی تولیدات می

باشد. همچنین قابلیت تشخیص و نمایش عیوب الکتریکی و مکانیکی تجهیزات مورد استفاده نیز به وسیله این تجهیز انجام می شود. این عمل به وسیله ثبت تغییرات حرارتی که با تغییر جریان الکتریسیته عبوری به وجود می آید انجام می شود. عمده استفاده خاص آن در آزمایشگاه های محیطی سنجش از دور برای تحلیل ویژگی های حرارتی پدیده های مختلف در آزمایشگاه و کالیبراسیون سنجنده های فضایی می باشد که در روند کالیبراسیون باندهای حرارتی به کار گرفته خواهد شد. در این پژوهش برای ثبت تغییرات دمایی شعله از دوربین حرارتی مدل NEC-AVIO-R300SR-HD که در شکل ۳-۱۲ نشان داده شده، استفاده شده است.



شکل ۳-۱۲: دوربین حرارتی مورد استفاده در آزمایش ها

۸-۳- شکل نهایی بستر آزمایش

در شکل ۳-۱۳ شکل نهایی بستر آزمایش نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که ابتدا انرژی مصرفی الکترولایزر توسط منبع تغذیه تامین می‌گردد و گاز هیدروکسی وارد مخزن در بالا دست می‌شود. سپس گاز هیدروکسی توسط لوله از مخزن ذخیره به مسیر هوای ورودی به مشعل احتراق منتقل می‌شود و تغییرات شعله و آلاینده‌گی آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۳-۱۳: شکل نهایی بستر آزمایش

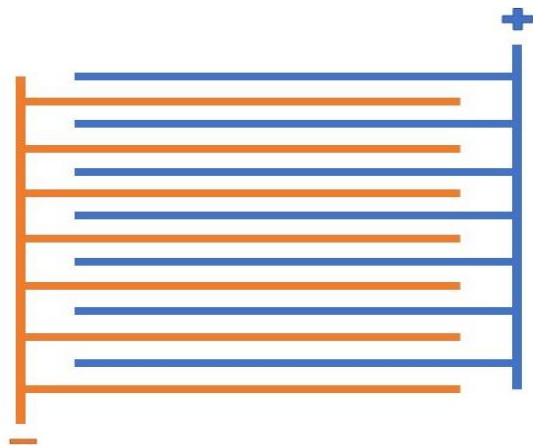
فصل چهارم: نتایج آزمایش‌ها

۴-۱- مقدمه

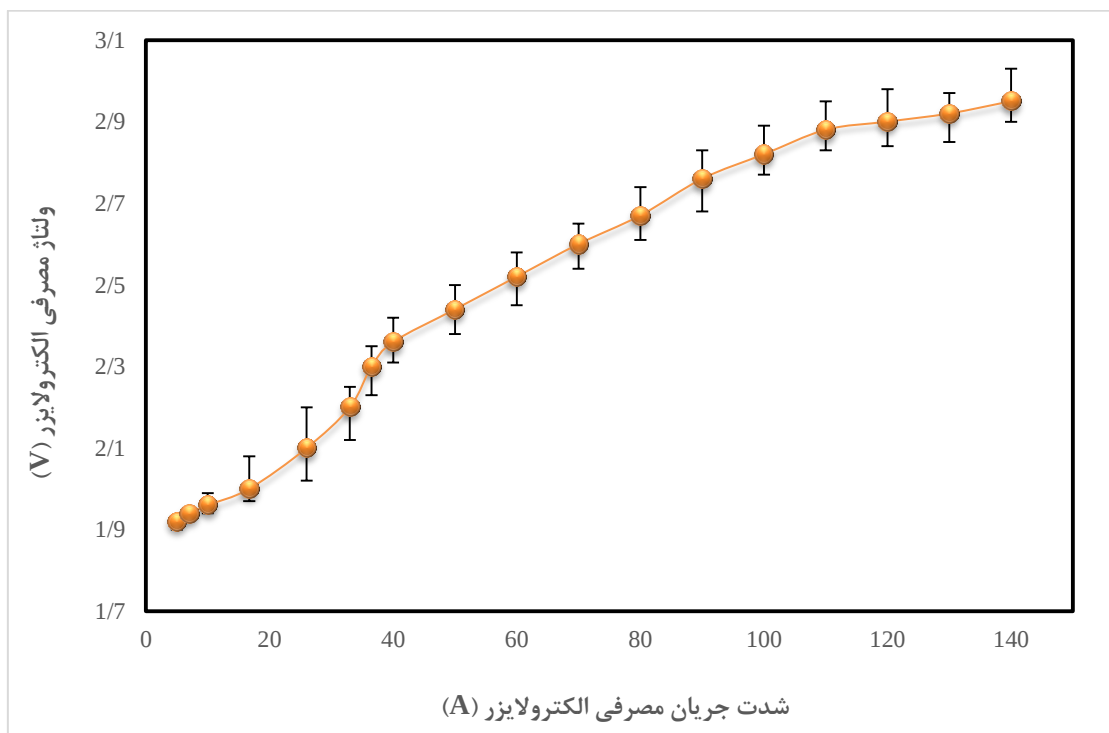
در این پژوهش ابتدا به ارزیابی الکترولایزر ۹ سلولی (۱۰ صفحه) تولیدکننده گاز هیدروکسی پرداخته شده است. تاثیر پارامترهایی مانند شدت جریان مصرفی، بررسی تاثیر تعداد صفحات الکترولایزر، بررسی شدت مصرف انرژی، میزان تولید گاز هیدروکسی به ازای سطح، بررسی تاثیر نحوه اتصال صفحات الکترولایزر (سری و موازی کردن صفحات الکترولایزر) و تاثیر شدت جریان بر ولتاژ مورد بررسی قرار گرفته است. سپس در ادامه به اثر تزریق گاز هیدروکسی در مشعل احتراق و ارزیابی آلاینده‌گی پرداخته خواهد شد. لازم به ذکر است جهت صحت آزمایش‌ها، هر آزمایش سه بار تکرار شده است.

۴-۲- تاثیر شدت جریان بر ولتاژ عبوری از الکترولایزر

با توجه به بررسی پژوهش‌های گذشته، برای بررسی الکترولایزر و با توجه به عملکرد الکترولایزر از اتصال موازی صفحات برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است. ابتدا در شکل ۴-۱ نحوه اتصال صفحات الکترولایزر به یکدیگر در حالت موازی نشان داده شده است. سپس در شکل ۴-۲ نمودار ولتاژ بر حسب شدت جریان مصرفی الکترولایزر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که الکترولایزر مانند یک مقاومت الکتریکی عمل نموده و بر اساس رابطه $V=RI$ ولتاژ و شدت جریان مصرفی الکترولایزر به هم وابسته هستند. یعنی در صورت افزایش شدت جریان مصرفی، ولتاژ نیز افزایش پیدا می‌کند و در صورت کاهش شدت جریان، ولتاژ نیز کاهش پیدا خواهد کرد. اما این شکل مشخص می‌کند که مقاومت الکتریکی این دستگاه به صورت ثابت نیست چراکه در این صورت باید این نمودار به صورت خطی درمی‌آمد. همچنین مشاهده می‌شود که تغییرات شدت جریان بین ۵ تا ۱۴۰ آمپر است و تغییرات ولتاژ بین ۱٫۹ تا ۳٫۱ ولت است که نشان دهنده ولتاژ مصرفی هر یک از صفحات الکترولایزر است. بر اساس ساختار الکتروشیمی الکترولایزر ولتاژ هر سلول پایین بوده و در محدوده کمی با جریان تغییر می‌کند.



شکل ۴-۱: شماتیک نحوه اتصال صفحات الکترولایزر به یکدیگر در حالت موازی

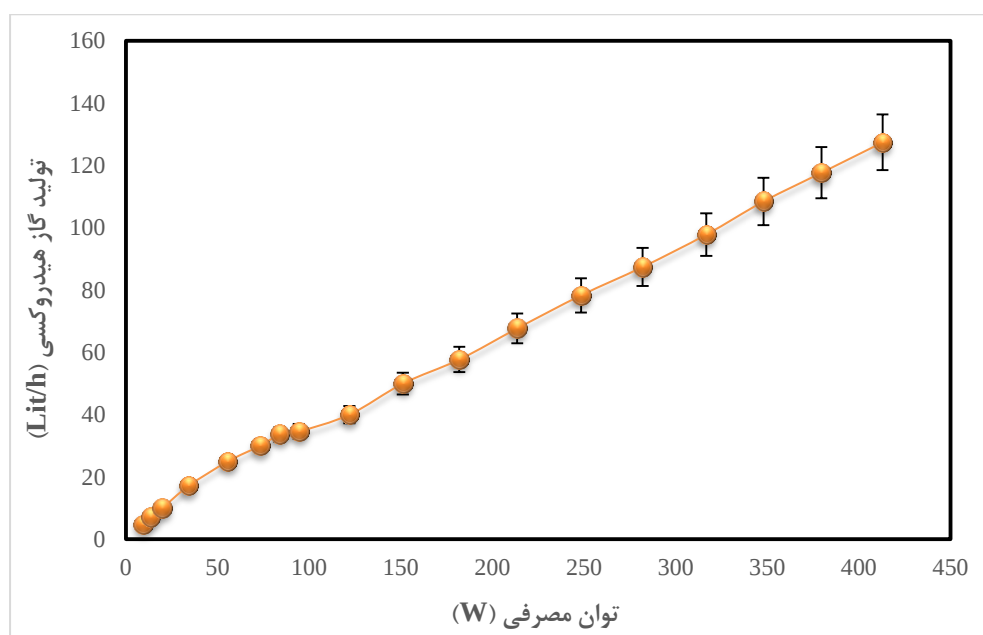


شکل ۴-۲: نمودار ولتاژ مصرفی الکترولایزر بر حسب شدت جریان در حالت موازی

۳-۴- بررسی تاثیر توان مصرفی الکترولایزر بر میزان تولید گاز

هیدروکسی

در شکل ۳-۴ نمودار میزان تولید گاز هیدروکسی بر حسب توان مصرفی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش توان مصرفی الکترولایزر، میزان تولید گاز هیدروکسی نیز به طور خطی افزایش پیدا می‌کند. مصرف انرژی بیشتر توسط الکترولایزر باعث سرعت بخشیدن به فرآیند جدایش مولکول‌های آب به هیدروژن و اکسیژن می‌شود که با ترکیب این دو عنصر، گاز هیدروکسی حاصل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با توان مصرفی ۱۰ وات، ۴٫۸ لیتر بر ساعت هیدروکسی تولید خواهد شد. همچنین با توان مصرفی ۴۱۰ وات، ۱۲۷٫۵ لیتر بر ساعت گاز هیدروکسی تولید خواهد شد که مقدار قابل توجهی است.



شکل ۳-۴: نمودار میزان تولید گاز هیدروکسی بر حسب توان مصرفی الکترولایزر

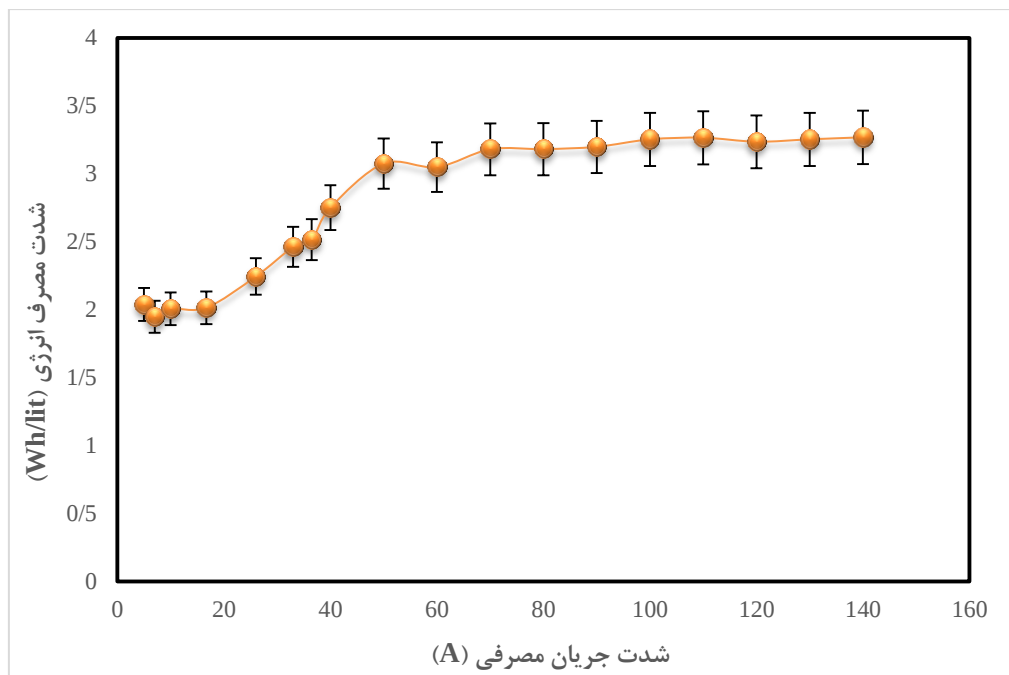
در جدول ۱-۴ مقایسه میزان تولید گاز هیدروکسی در این پژوهش با دیگر پژوهش‌ها در یک توان مصرفی ثابت نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که پژوهش حاضر قادر به تولید ۰٫۵۵ لیتر بر دقیقه گاز هیدروکسی در توان مصرفی ۱۰۰ وات می‌باشد که نسبت به پژوهش‌های اخیر انجام شده بیشتر بوده و توانایی رقابت با آن‌ها را دارد. لازم به ذکر است که میزان تولید گاز هیدروکسی به پارامترهای دیگری مانند غلظت الکترولیت، میزان شدت جریان مصرفی و ولتاژ مصرفی و همچنین نوع الکترولایزر نیز وابسته

است.

جدول ۴-۱: مقایسه میزان تولید گاز هیدروکسی در پژوهش حاضر با دیگر پژوهش‌ها				
نویسنده	سال	توان مصرفی (W)	میزان تولید (L/min)	شماره مرجع
سابرامیان	2020	100	0.4	[۵۹]
کادی	2020	100	0.45	[۵۳]
سولی	2021	100	۰,۴۸۵	[۶۰]
پژوهش حاضر	۲۰۲۱	۱۰۰	۰,۵۵	-

۴-۴- میزان شدت مصرف انرژی بر حسب شدت جریان مصرفی الکترولایزر

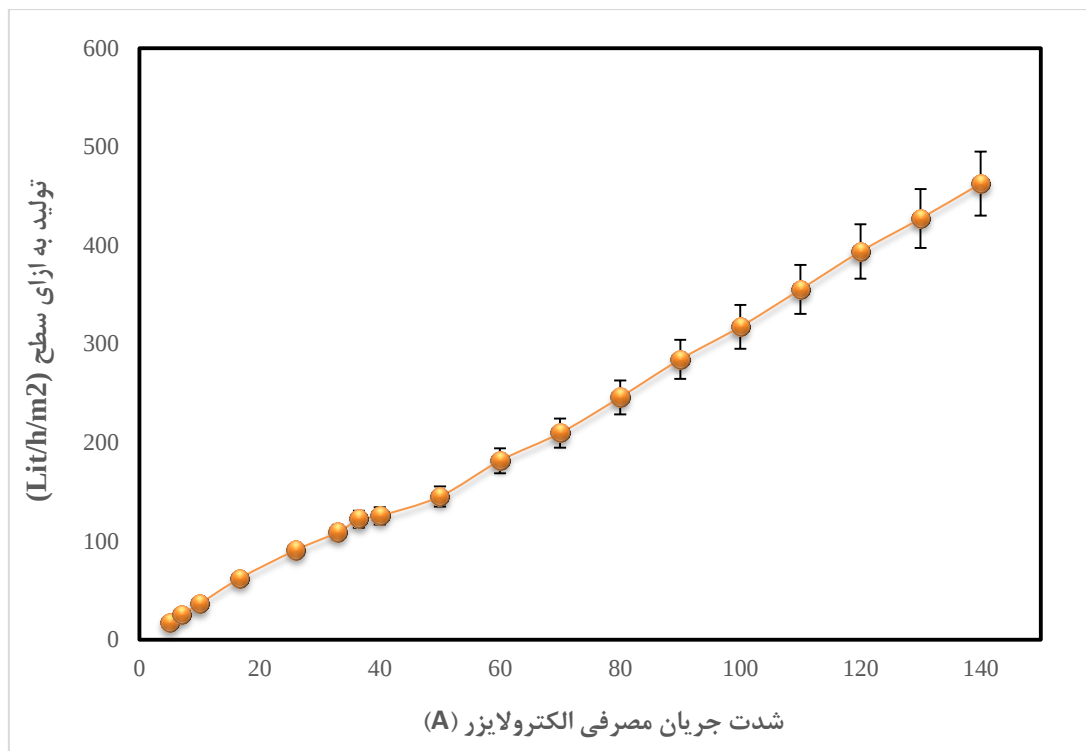
در شکل ۴-۴ نمودار شدت مصرف انرژی بر حسب شدت جریان مصرفی الکترولایزر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که شدت مصرف انرژی بهینه، بین شدت جریان بین ۱۰ تا ۱۵ آمپر می‌باشد که الکترولایزر کمترین شدت مصرف انرژی را داراست. افزایش و یا کاهش شدت جریان نسبت به حالت بهینه باعث افزایش شدت مصرف انرژی الکترولایزر می‌شود. هر چند افزایش شدت جریان، باعث افزایش میزان تولید گاز هیدروکسی می‌شود، اما شدت مصرف انرژی الکترولایزر را با توجه به میزان تولید گاز هیدروکسی نیز افزایش می‌دهد و هدر رفت انرژی نیز بیشتر می‌شود. لذا برای داشتن میزان تولید بالاتر باید به نظر می‌رسد باید تعداد صفحات را افزایش داد.



شکل ۴-۴: نمودار شدت مصرف انرژی بر حسب شدت جریان مصرفی الکترولایزر در حالت موازی بودن صفحات الکترولایزر

۵-۴- میزان تولید به ازای سطح بر حسب شدت جریان مصرفی

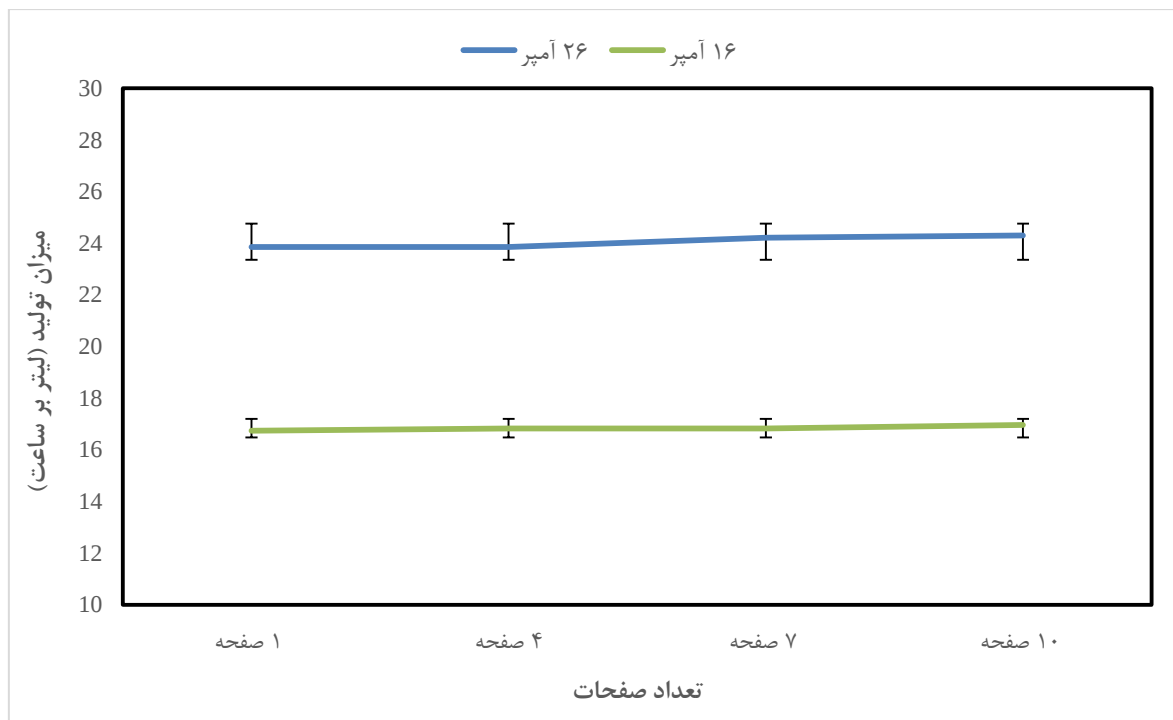
در شکل ۵-۴ نمودار تولید گاز هیدروکسی به ازای سطح بر حسب شدت جریان مصرفی نشان داده شده است. برای محاسبه پارامتر تولید به ازای سطح، ابتدا میزان تولید گاز هیدروکسی بر حسب ساعت گزارش شده و سپس بر سطح تمامی سلول‌های به کار رفته در الکترولایزر تقسیم شده است. از طرفی افزایش شدت جریان مصرفی الکترولایزر باعث می‌شود تا جدایش مولکول‌های آب با سرعت بیشتری رخ دهد که در نتیجه باعث افزایش میزان تولید گاز هیدروکسی خواهد شد. همچنین افزایش توان مصرفی الکترولایزر تلفات و دما را نیز افزایش می‌دهد و عملکرد الکترولایزر را تحت تاثیر قرار خواهد داد.



شکل 4-5: نمودار میزان تولید به ازای سطح بر حسب شدت جریان مصرفی

۴-۶- میزان تولید گاز هیدروکسی با شدت جریان ۱۶ و ۲۶ آمپر با تعداد صفحات متغیر

در این پژوهش صفحات الکترولایزر می‌تواند بین ۲ تا ۲۰ صفحه متغیر باشد. در شکل ۴-۶ اثر تعداد صفحات الکترولایزر در تولید گاز هیدروکسی برای دو شدت جریان ۱۶ و ۲۶ آمپر در حالت اتصال موازی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد صفحات الکترولایزر در حالت اتصال موازی، به علت افزایش مقاومت‌های موازی، تاثیر قابل توجهی بر میزان تولید مشاهده نمی‌شود و هر شدت جریانی که الکترولایزر مصرف کند در میام تمام سلول‌ها تقسیم خواهد شد. لذا میزان شدت جریان عبوری از کل دستگاه دارای اهمیت می باشد که با افزایش آن میزان تولید گاز هیدروکسی افزایش پیدا می‌کند و با کاهش آن میزان تولید گاز هیدروکسی کاهش پیدا می‌کند.



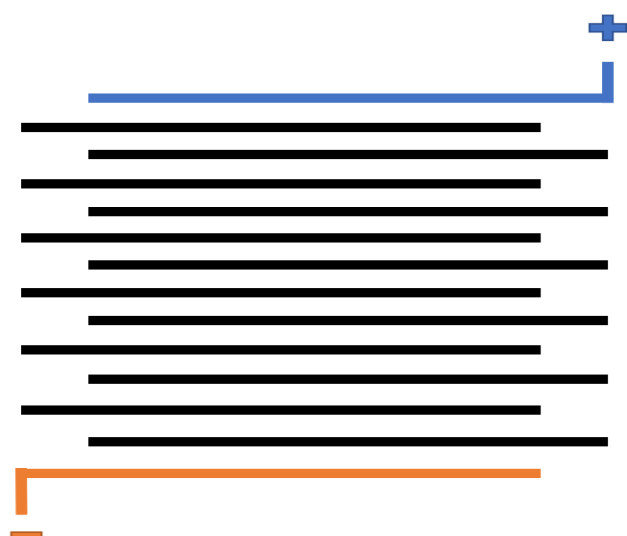
شکل ۴-۶: نمودار میزان تولید گاز هیدروکسی با شدت جریان ۱۶ و ۲۶ آمپر با تعداد صفحات متغیر

۴-۷- بررسی اثر سری بودن اتصال صفحات الکترولایزر

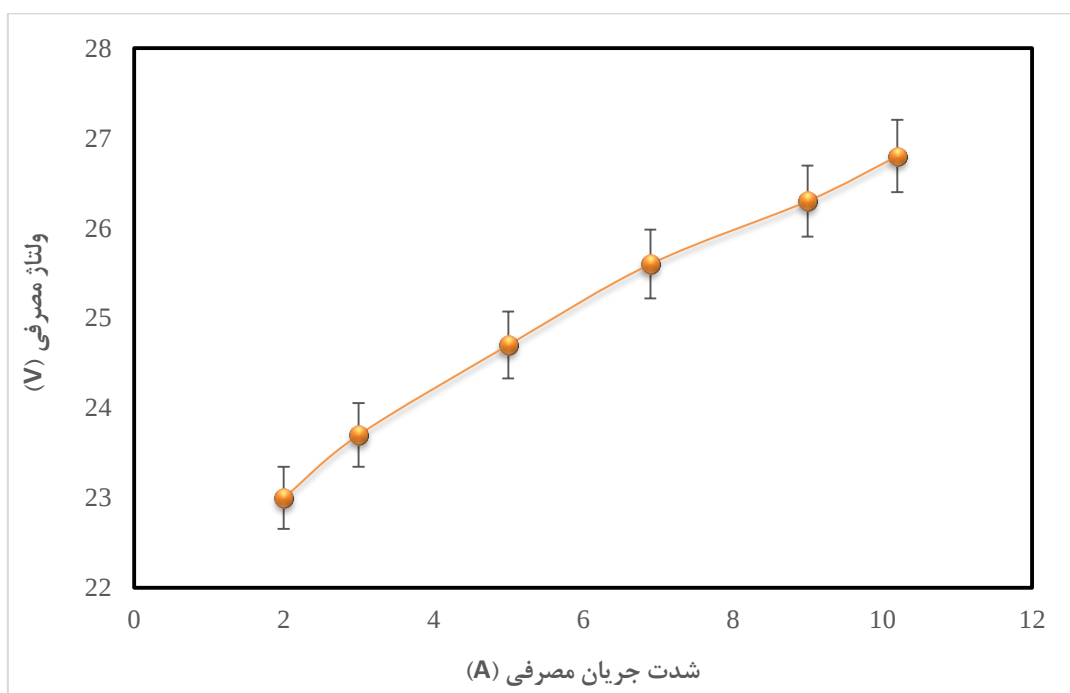
۴-۷-۱- تاثیر شدت جریان بر ولتاژ مصرفی الکترولایزر در حالت اتصال

سری صفحات الکترولایزر

در شکل ۴-۷ نحوه اتصال صفحات الکترولایزر به یکدیگر در حالت سری با تعداد صفحات ۱۰ (۹ سلول) نشان داده شده است. در شکل ۴-۸ نمودار ولتاژ بر حسب شدت جریان مصرفی الکترولایزر در حالت سری مشاهده می‌شود. همانطور که در ابتدای این فصل برای حالت موازی بیان گردید، ولتاژ و شدت جریان مصرفی الکترولایزر با هم رابطه مستقیم دارند. همچنین مشاهده می‌شود که برای حالت سری کردن صفحات با یکدیگر، برای تغییرات شدت جریان بین ۲ تا ۱۰ آمپر، تغییرات ولتاژ بین ۲۳ تا ۲۸ ولت است. با سری شدن سلول‌ها ولتاژ آن‌ها با یکدیگر جمع می‌شود و لذا دستیابی به ولتاژ بالاتر از این طریق ممکن خواهد بود. بر همین اساس ولتاژ هر سلول در این حالت حدود ۲ تا ۲,۲ بدست می‌آید.



شکل ۴-۷: شماتیک نحوه اتصال صفحات الکترولاایزر به یکدیگر در حالت سری



شکل ۴-۸: نمودار ولتاژ مصرفی الکترولاایزر بر حسب شدت جریان در حالت سری

۲-۷-۴- میزان تولید گاز هیدروکسی بر حسب توان مصرفی در حالت

اتصال سری صفحات الکترولایزر

در شکل ۴-۹ نمودار میزان تولید گاز هیدروکسی بر حسب توان مصرفی در حالت سری و موازی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش توان مصرفی الکترولایزر، میزان تولید نیز به طور خطی افزایش پیدا می‌کند. مصرف انرژی بیشتر توسط الکترولایزر باعث سرعت بخشیدن به فرآیند جدایش مولکول‌های آب به هیدروژن و اکسیژن می‌شود که با ترکیب این دو عنصر، گاز هیدروکسی حاصل می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با توان مصرفی ۴۵ وات، ۲۱ لیتر بر ساعت هیدروکسی تولید خواهد شد. همچنین با توان مصرفی ۲۷۵ وات، ۱۰۳ لیتر بر ساعت گاز هیدروکسی تولید خواهد شد. از طرفی مشاهده می‌شود که در توان مصرفی پایین، حالت موازی آرایش صفحات الکترولایزر میزان تولید بیشتر نسبت به حالت آرایش سری صفحات دارد. علت این امر در آزمایش‌ها تاثیر شدت جریان مصرفی بر عملکرد الکترولایزر مشاهده شد، که نشان می‌دهد میزان تولید گاز هیدروکسی وابستگی بیشتری به شدت جریان مصرفی، نسبت به ولتاژ دارد.

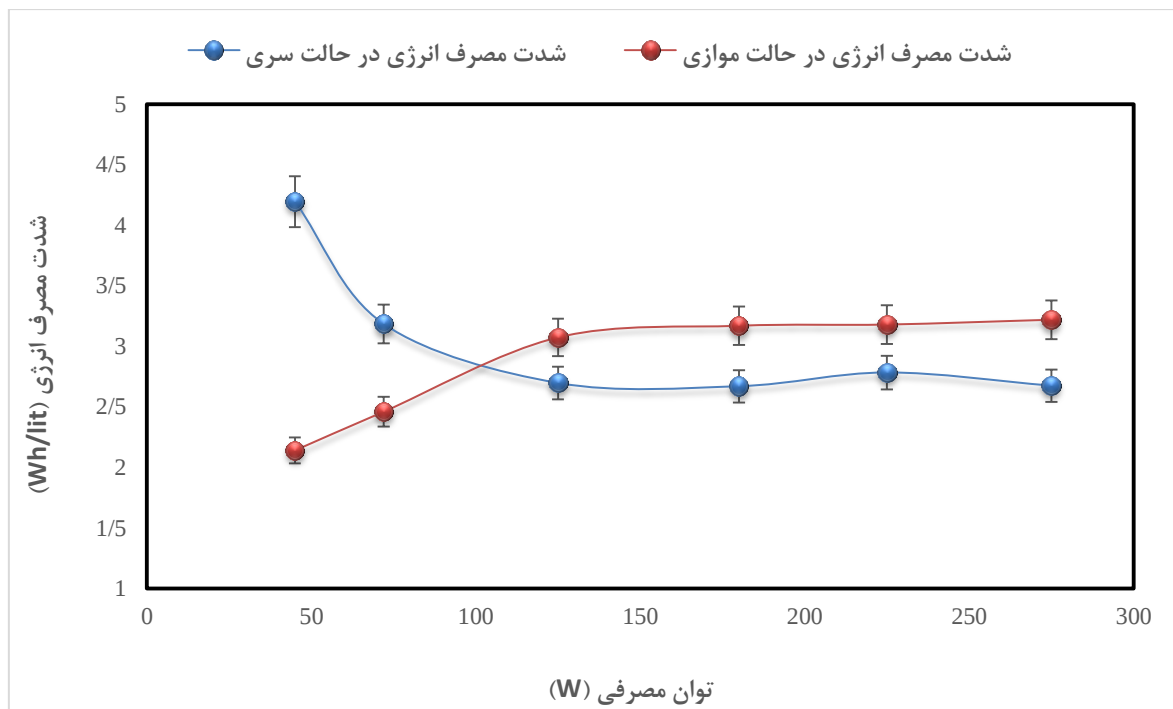


شکل ۴-۹: تولید گاز هیدروکسی بر حسب توان مصرفی در حالت آرایش سری و موازی صفحات الکترولایزر

۳-۷-۴- مقایسه میزان شدت مصرف انرژی بر حسب توان مصرفی

الکترولایزر در حالت سری و موازی

در شکل ۴-۱۰ نمودار شدت مصرف انرژی بر حسب توان مصرفی الکترولایزر در حالت سری و موازی بودن نشان داده شده است. مشاهده می شود که شدت مصرف انرژی در حالت سری، ابتدا بسیار بیشتر از حالت موازی بوده و سپس با افزایش توان مصرفی، کاهش می یابد و در توان مصرفی ۱۰۰ وات شدت مصرف در حالت موازی و سری برابر می شود. علت شدت مصرف انرژی زیاد در توان های کم در آزمایشات شدت جریان مصرفی است که با کاهش بیش از حد شدت جریان مصرفی حتی با وجود بالا بودن ولتاژ، تولید گاز هیدروکسی به شدت تحت تاثیر قرار گرفته و کاهش می یابد. اما در توان های بالاتر از ۱۰۰ وات به علت تناسب بین ولتاژ و شدت جریان در حالت سری، شدت مصرف انرژی کمتر از حالت موازی است.



شکل ۴-۱۰: نمودار شدت مصرف انرژی بر حسب توان مصرفی الکترولایزر در حالت سری و موازی بودن صفحات الکترولایزر

۴-۸- جمع بعدی نتایج آزمایش‌ها الکترولایزر

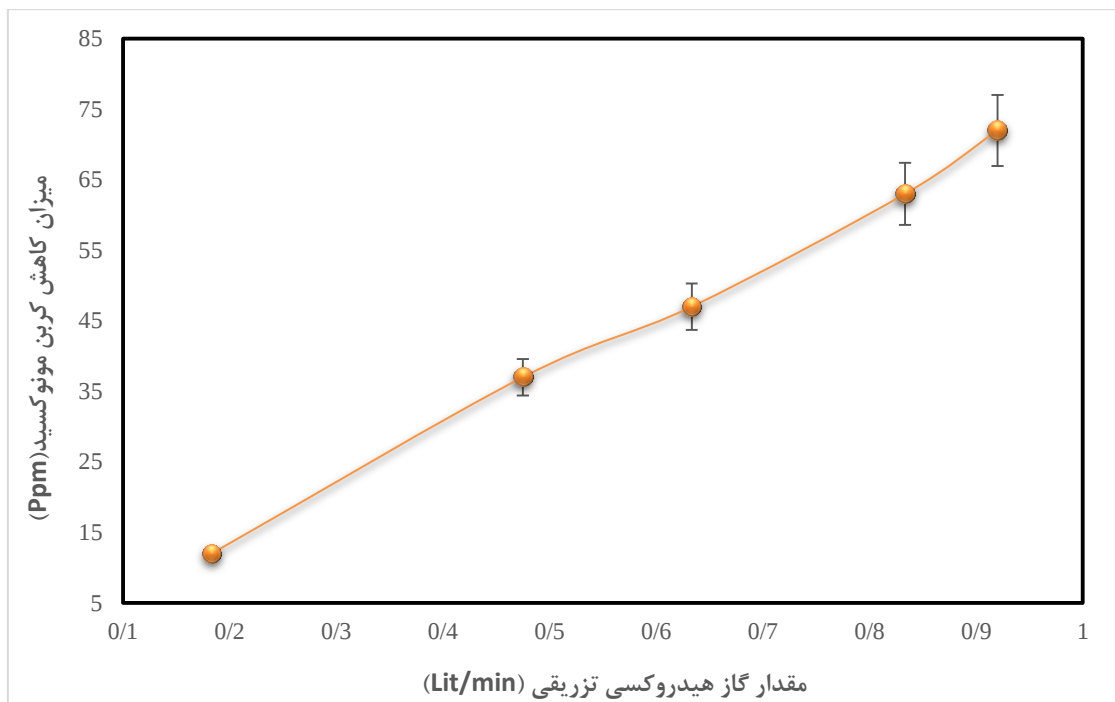
نتایج نشان می‌دهد که افزایش شدت جریان به طور خطی، باعث افزایش میزان تولید گاز هیدروکسی در حالت سری و موازی می‌شود تغییرات ولتاژ نیز متناسب با شدت جریان است که با افزایش شدت جریان ولتاژ نیز افزایش پیدا می‌کند و با کاهش شدت جریان ولتاژ کاهش پیدا می‌کند. تغییرات ولتاژ در حالت موازی اتصال صفحات الکترولایزر برای هر سلول، در محدوده ۱٫۹ تا ۳ ولت است و تغییرات شدت جریان بین ۵ تا ۱۴۰ آمپر است. اما در حالت سری اتصال صفحات هر صفحه توانایی مصرف ولتاژ ۲ الی ۳ ولت را از خود نشان می‌دهد که با افزایش تعداد صفحات می‌توان ولتاژ عبوری از الکترولایزر را نیز افزایش داد. با توجه به مطالب بیان شده با افزایش صفحات الکترولایزر می‌توان ولتاژ مصرفی هر سلول را در حالت سری افزایش داد و از طرفی با افزایش ولتاژ مصرفی می‌توان تولید گاز هیدروکسی را نیز افزایش داد. همچنین باید در نظر داشت که جهت جلوگیری از افزایش شدت مصرف انرژی شدت جریان مصرفی

الکترولایزر حداقل ۵ آمپر باشد.

با توجه به میزان دانسیته توانی اعمالی، با افزایش دانسیته توانی، تولید گاز هیدروکسی روند صعودی را طی می‌کند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که بیشترین تاثیر در میزان تولید گاز هیدروکسی مربوط به شدت جریان است که با افزایش آن ولتاژ و میزان تولید گاز هیدروکسی نیز افزایش پیدا می‌کند. همچنین مقایسه اتصال صفحات در حالت سری و موازی نشان می‌دهد که در توان‌های مصرفی پایین، حالت موازی صفحات توانایی بیشتری در میزان تولید گاز هیدروکسی دارد اما در توان‌های مصرفی بالا آرایش اتصال سری صفحات، گاز هیدروکسی بیشتری تولید می‌کند. در ادامه نتایج به بررسی تاثیر گاز هیدروکسی تولیدی توسط الکترولایزر در فرآیند احتراق و تاثیر آن بر روی آلاینده‌گی‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۹-۴- اثر تزریق گاز هیدروکسی بر آلاینده های خروجی احتراق مشعل گازسوز

مطابق توضیحات داده شده در فصل قبل تزریق گاز هیدروکسی در یک مشعل گازسوز مورد ارزیابی قرار گرفته است. در شکل ۴-۱۱ نمودار میزان تغییرات مونوکسید کربن به عنوان یکی از عناصر مهم در موضوع آلاینده‌گی، با مقادیر تزریق مختلف گاز هیدروکسی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش مقادیر گاز هیدروکسی تزریقی، این گاز باعث تغییرات بیشتری در مونوکسید کربن می‌شود. با افزایش تزریق گاز هیدروکسی به مسیر هوا ورودی مشعل احتراقی، میزان انتشار مونوکسید کربن نیز روندی کاهشی را طی می‌کند و هرچقدر میزان تزریق گاز هیدروکسی بیشتر شود، میزان مونوکسید کربن نیز کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که با توجه به انفجاری بودن گاز هیدروکسی، میزان تزریق گاز تا ۱ لیتر بر دقیقه انجام شد و بیشتر از آن به علت ایمنی و احتمال انفجار مورد بررسی قرار نگرفت.



شکل ۴-۱۱: نمودار میزان تغییرات کاهشی مونوکسید کربن با مقادیر تزریقی مختلف گاز هیدروکسی

در جدول ۲-۴ مقادیر اولیه مونوکسید کربن و میزان کاهش آن، تغییرات NO_x ، تغییرات دی اکسیدکربن، تغییرات هیدروکربن و راندمان احتراق گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش میزان گاز هیدروکسی تزریق شده به مشعل احتراقی، میزان ناکس به طور تقریبی 1 ppm افزایش پیدا می‌کند. تغییرات کربن دی اکسید نشان می‌دهد که به طور دقیق نمی‌توان بیان کرد که گاز هیدروکسی چه تاثیری بر روند تغییرات کربن دی اکسید دارد. همچنین مقادیر هیدروکربن اندازه گیری شده توسط دستگاه آنالیزور گاز نشان می‌دهد که تزریق گاز هیدروکسی به مقدار قابل توجهی باعث کاهش هیدروکربن‌ها نسوخته می‌شود. البته در تمامی موارد اندازه گیری شده با توجه به قابلیت اطمینان ۹۵٪ دستگاه آنالیزور دود، پیش بینی می‌شود که خطا آزمایش تا ۵٪ نیز دخیل باشد. از طرفی تغییرات راندمان احتراق نشان می‌دهد که تزریق گاز هیدروکسی باعث اندکی افزایش در راندمان احتراق اندازه گیری شده توسط دستگاه آنالیزور گاز می‌شود. در جهت کاهش خطا در آزمایش‌ها هر یک از اعداد بیان

شده در جدول ۴-۲ از میانگین گیری میان چندین عدد در بازه دو دقیقه ذکر شده است.

جدول ۴-۲: مقادیر اندازه گیری شده توسط دستگاه آنالیزور گاز در گازهای خروجی از مشعل احتراقی

۱۰-۴- تغییرات ظاهری شعله با تزریق گاز هیدروکسی

در شکل ۴-۱۲ تغییرات شعله تزریق گاز هیدروکسی به مشعل احتراق با توان مصرفی ۹۵ وات توسط الکترولایزر نشان داده شده است. گاز هیدروکسی با توجه به اینکه خاصیت انفجاری دارد، در مسیر هوا مشعل احتراقی تزریق شده و با هوا ورودی مخلوط می‌شود. در شکل ۴-۱۲ سمت راست شعله مشعل احتراق بدون تزریق گاز هیدروکسی و در سمت چپ با تزریق گاز هیدروکسی با توان مصرفی ۹۵ وات نشان داده شده است. در این شدت جریان میزان گاز هیدروکسی تزریقی ۰/۴۶ لیتر بر دقیقه است.

میزان کاهش مقدار HC (ppm)	مقادیر اولیه هیدروکربن نسوخته (ppm)	تغییرات افزایشی CO ₂ (%)	تغییرات افزایشی NO ₂ (ppm)	تغییرات کاهشی CO (ppm)	مقادیر اولیه CO (ppm)	میزان تولید هیدروژن (L/sec)	میزان تولید هیدروژن (L/min)	میزان توان مصرفی الکترولایزر (W)
12	1007	۰,۰۳	۰,۸	۳۹	۳۵۰	۰,۰۰۳۱۷	۰,۱۹	۴۸
26	1007	۰,۰۲	۰,۷۵	۴۴	۳۵۰	۰,۰۰۸	۰,۴۷۵	۱۰۰
40	1007	۰,۰۳	۰,۹	۵۸	۳۵۰	۰,۰۱۰۷	۰,۶۴	۱۴۳
52	1007	۰,۰۳	۰,۸۷	۶۱	۳۵۰	۰,۰۱۴	۰,۸۴	۱۹۰
60	1007	۰,۰۲	۰,۹	۶۹	۳۵۰	۰,۰۱۵۴	۰,۹۲	۲۲۰

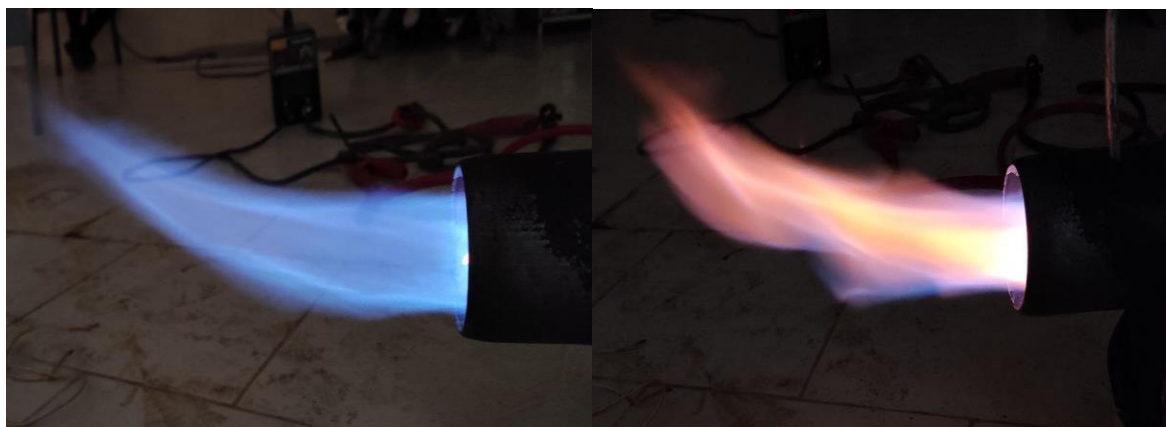
مشاهده می‌شود که گاز هیدروکسی باعث تغییر رنگ شعله و افزایش طول شعله می‌گردد. همچنین تاثیر

این گاز بر آلاینده‌گی‌ها نیز در جدول ۴-۱ ذکر گردیده است.



شکل ۴-۱۲: تغییرات شعله با تزریق ۰/۴۶ لیتر بر دقیقه گاز هیدروکسی

در شکل ۴-۱۳ نتایج تزریق گاز هیدروکسی به مشعل احتراق با توان مصرفی ۱۹۰ وات توسط الکترولایزر نشان داده شده است. در شکل ۴-۱۳ سمت راست شعله مشعل احتراق بدون تزریق گاز هیدروکسی و در سمت چپ با تزریق گاز هیدروکسی با توان مصرفی ۱۹۰ وات نشان داده شده است. در این شدت جریان میزان گاز هیدروکسی تزریقی ۰/۸۴ لیتر بر دقیقه است. مشاهده می‌شود که گاز هیدروکسی باعث تغییر رنگ بیشتر شعله و افزایش طول شعله نسبت به حالت تزریق با توان مصرفی ۱۴۰ وات می‌گردد. در ادامه نتایج شعله با استفاده از دوربین حرارتی نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۳: تغییرات شعله با تزریق ۰/۸۴ لیتر بر دقیقه گاز هیدروکسی

۴-۱۱- بررسی تغییرات حرارتی شعله با استفاده از دماسنج

برای بررسی تغییرات شعله در این پژوهش از یک دما سنج ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد استفاده شده است. دما سنج در فاصله ۵۰ سانتی متر از شعله قرار داده شده است و به علت دما بالاتر از ۱۰۰۰ درجه شعله در نزدیکی دهانه مشعل احتراقی، استفاده از دما سنج در نزدیکی دهانه مشعل احتراق ممکن نبود. در جدول ۳-۴ تغییر دما شعله قبل و بعد از تزریق گاز هیدروکسی مشاهده می‌شود. برای کاهش خطا آزمایشات اعداد ذکر شده در جدول ۳-۴ از میانگین گیری چندین داده در یک بازه زمانی ۲ دقیقه ای یادداشت شده است و همچنین هر آزمایش دوبار تکرار شده است.

جدول ۳-۴: تاثیرات گاز هیدروکسی بر دما شعله

اختلاف دما ایجاد شده	میانگین دما بعد از تزریق گاز هیدروکسی	بیشترین دما بعد از تزریق گاز هیدروکسی	کمترین دما بعد از تزریق گاز هیدروکسی	میانگین دما قبل از تزریق گاز هیدروکسی	بیشترین دما قبل از تزریق گاز هیدروکسی	کمترین دما قبل از تزریق گاز هیدروکسی	مقدار هیدروکسی تزریق شده
۶,۴	۵۴۷,۴	۵۴۳	۵۵۳	۵۴۱	۵۴۴	۵۳۹	0.014167
۴,۳۵	۵۵۵,۵	۵۵۸	۵۵۳	۵۴۹,۷۵	۵۵۳	۵۴۷	0.011667
۳,۱۶	۵۴۴,۶	۵۴۷	۵۴۳	۵۴۱,۵	۵۴۴	۵۳۹	0.008056

۵-۱- جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش به طراحی و ساخت الکترولايزر چند سلولی تولید کننده گاز هیدروکسی با استفاده از ورق استیل ۳۱۶ پرداخته شده است. برای افزایش رسانایی آب از الکترولیت پتاسیم هیدروکساید با غلظت جرمی ۵٪ استفاده شده است. سپس برای تامین انرژی مصرفی مورد نیاز الکترولايزر از منبع‌های تغذیه مختلف (منبع تغذیه با توان ۳۰۰ وات، منبع تغذیه با توان ۱ کیلو وات، سلول خورشیدی) با توان متغیر استفاده شده است. سپس در نتایج آزمایش‌ها به بررسی تاثیر شدت جریان مصرفی بر ولتاژ مصرفی الکترولايزر، بررسی تاثیر شدت جریان مصرفی بر میزان گاز هیدروکسی تولیدی، بررسی شدت مصرف انرژی بهینه و شدت جریان بهینه مصرفی الکترولايزر، بررسی میزان تولید گاز هیدروکسی به ازای سطح، بررسی تاثیر اتصال سری و موازی بودن صفحات پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات ولتاژ متناسب با شدت جریان است که با افزایش شدت جریان ولتاژ افزایش پیدا می‌کند و با کاهش شدت جریان ولتاژ کاهش پیدا می‌کند. تغییرات ولتاژ برای حالت موازی در محدوده ۱٫۹ تا ۳ ولت و تغییرات شدت جریان بین ۵ تا ۱۴۰ آمپر است. در حالت سری نیز هر سلول توانایی مصرف ولتاژ ۱٫۹ تا ۳ ولت را دارد که با افزایش تعداد صفحات الکترولايزر در حالت سری می‌توان ولتاژ مصرفی آن را افزایش داد. مقایسه اتصال سری و موازی بودن صفحات نشان می‌دهد که در توان‌های مصرفی بالا حالت سری صفحات میزان تولید هیدروکسی بیشتری دارد و همچنین در آزمایش‌ها مشاهده شد که شدت جریان-های مصرفی کمتر از ۵ آمپر باعث کاهش شدیدی در میزان تولید گاز هیدروکسی خواهد شد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که بیشترین تاثیر در میزان تولید گاز هیدروکسی مربوط به شدت جریان است که با افزایش آن ولتاژ و میزان تولید گاز هیدروکسی افزایش پیدا می‌کند. پس از ارزیابی الکترولايزر، به بررسی تاثیر این گاز در فرآیند احتراق پرداخته شد. به همین منظور به تزریق گاز هیدروکسی تولیدی توسط الکترولايزر به مسیر هوا ورودی به مشعل احتراقی پرداخته شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش تزریق گاز هیدروکسی به مسیر هوا ورودی مشعل احتراقی، میزان انتشار مونوکسید

کربن نیز روندی کاهشی را طی می‌کند و هرچقدر میزان تزریق گاز هیدروکسی بیشتر شود، میزان مونوکسید کربن و هیدروکربن نسوخته نیز بیشتر کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که با توجه به انفجاری بودن گاز هیدروکسی، میزان تزریق گاز تا ۰,۹۲ لیتر بر دقیقه انجام شد و بیشتر از آن به علت ایمنی و احتمال انفجار مورد بررسی قرار نگرفت. در آزمایش‌ها مشاهده شد که با تزریق ۰,۹۲ لیتر بر دقیقه به مشعل احتراقی، می‌توان انتشار مونوکسید کربن را تا ۲۵٪ داد و هیدروکربن نسوخته را تا ۷٪ کاهش داد. همچنین با تزریق مقادیر مختلف گاز هیدروکسی، دما شعله با بیشترین تزریق مقدار گاز ۶ درجه سانتیگراد افزایش پیدا کرد.

۲-۵- پیشنهادات

- ۱- بررسی اثرات روش پالسی، امواج آلتراسونیک، اثر فرکانس بر عملکرد الکترولایزر چند سلولی تولید کننده گاز هیدروکسی
- ۲- بررسی فرآیند الکترولیز پلاسمایی به صورت ولتاژ بالا
- ۳- بررسی مدار مقاومت الکتریکی الکترولایزر چند سلولی
- ۴- بررسی اثر غلظت‌های مختلف با توجه به الکترولیت‌های متفاوت
- ۵- بررسی راه‌های ترکیب شدن گاز شهری و گاز هیدروکسی تا گاز هیدروکسی مستقیماً به مسیر گاز مشعل احتراقی تزریق شود.
- ۶- ارزیابی راه حل‌هایی برای جلوگیری از انفجار گاز هیدروکسی در جهت افزایش تزریق این گاز به مشعل احتراق

پیوست

در این پژوهش برای به دست آوردن شدت مصرف انرژی از رابطه ۱ استفاده شده است.

$$\text{شدت مصرف انرژی} = \frac{\text{آمپر (A)} * \text{ولتاژ (V)}}{\text{تولید گاز هیدروکسی}} \quad (1)$$

برای به دست آوردن دانسیته توانی از رابطه ۲ استفاده شده است.

$$\text{دانسیته توانی} = \frac{\text{آمپر (A)} * \text{ولتاژ (V)}}{\text{مساحت صفحات الکترولایزر}} \quad (2)$$

توان مصرفی الکترولایزر نیز از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$\text{توان مصرفی الکترولایزر} = \text{آمپر مصرفی} * \text{ولتاژ مصرفی} \quad (3)$$

در شکل ۵-۱ نتایج کالبراسیون دستگاه آنالیزور گاز نشان داده شده است.

Calibration certificate

گواهی کالیبراسیون

FG40002009

دستگاه تحت کالیبراسیون Unit under calibration نام دستگاه / Object	آنالیزور / دستگاه اندازه گیری گازهای حاصل از احتراق Combustion Gas Measuring Instruments / Analyzer esto 350 New	
سازنده / Manufacturer	testo AG	
شماره سریال / Serial no.	60552851	
کد اموال دستگاه / Inventory no.	28035	
کد فنی دستگاه / Part no.	0632 3510	
گستره / Range	O ₂ (0...25 Vol.%) NO (0... 3000 ppm) SO ₂ (0...5000 ppm) CXHY(100...40000 ppm)	CO (0...10000 ppm) NO ₂ (0...500 ppm) H ₂ S(0...300 ppm)
ریزنگاری / Resolution	0.01 Vol.% for O ₂ / 0.1 ppm for NO ₂ & H ₂ S 1 ppm for CO & SO ₂ & NO / 10 ppm for CXHY	
نام متقاضی	دانشگاه صنعتی شاهرود	
Customer name	Shahroud University of Technology	
آدرس متقاضی	ایران - شاهرود	
Customer address	Shahroud - Iran	
شماره متقاضی / Cust.ID.no.		
شماره سفارش / Order no.	912019	
تاریخ کالیبراسیون date of calibration	1400.02.21 11.02.2021	
تاریخ کالیبراسیون بعدی (به درخواست مشتری) date of next calibration		

- نتایج کالیبراسیون تنها به دستگاه اشاره شده در صفحه اول این گواهینامه مربوط می شود.
- این آزمایشگاه دارای تایید صلاحیت ISO/IEC 17025 می باشد.
- استانداردهای مرجع مورد استفاده در آزمایشگاه از طریق DAKKS قابل ردیابی به دستگاه بین المللی SI هستند.
- این کالیبراسیون از طریق مراکز اندازه شناسی اشاره شده قابل ردیابی به دستگاه بین المللی SI است.
- تاریخ اعتبار این گواهینامه طبق درخواست مشتری درج شده است.
- عدم قطعیت گسترده براساس سند GUM و با سطح اطمینان 95% و ضریب همبستگی K=2 برآورده شده است.
- این گواهینامه در یک نسخه صادر شده است و بدون مهر و امضاء فاقد اعتبار است.
- هرگونه کپی برداری بدون دریافت مجوز از آزمایشگاه صادر کننده ممنوع است.

With this document we confirm that:
- Calibration results is related to the instrument mentioned in the first page of this document.
- This Laboratory has ISO/IEC 17025 Accreditation Certificate.
- The reference standards which are used in laboratory are traceable to the national standards SI through DAKKS.
- This calibration through mentioned reference measuring devices are traceable to the national standards SI.
- Next calibration date is mentioned by customer request.
- Uncertainty of calibration is calculated by GUM method with 95% level of confidence by the coverage factor k=2.
- This certificate is created in one copy and does not valid without signature and seal.
- This calibration certificate may not be reproduced with the exception if the permission was given by the issuing laboratory.

مهر آزمایشگاه / Seal

مدیر آزمایشگاه / Lab manager

مسئول کالیبراسیون / Calibrated by

Mohammad Pilevari

Ahmad Balgvar

9.5 NCV AC Electric Field Sensing and Live/Neutral Wire Measurement (Picture 6a)

9.5.1 AC Electric Field Sensing

The electric field sensing sensitivity is divided into two levels ("EFH" and "EFL"). The meter defaults to "EFH". Users can select different sensitivity levels according to the intensity of the measured electric field. Select "EFH" if NCV when electric field is around 220V AC 50Hz/60Hz. Bring the NCV sensing end close to a charged electric field (socket, insulated wire, etc.). The LCD will display the segment "—" with beeps and red LED flashing. As the intensity of the measured electric field increases, the more segments (—) display, the higher frequency of buzzer beeps and LED flashes. Select "EFL" when the electric field is around 110V AC 50Hz/60Hz.

⚠ Caution:

Use the NCV sensing end to approach measured electric field, otherwise the measurement sensitivity will be affected. When the measured electric field voltage is over 100V AC, observe whether the conductor is insulated to avoid personal injury.

9.5.2 Live/Neutral Wire Measurement (only UT204+) (Picture 6b)

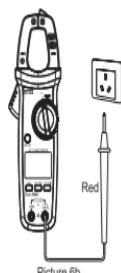
- Select the LIVE function scale.
- Insert the red test lead into the "V+ΩHz" jack, make the black test lead suspended, and use the red test lead to touch the socket or bare wire to distinguish the live/neutral wire.
- When the neutral wire or uncharged object is detected, the "—" is displayed.
- When the >60V AC "live wire" is detected, the LCD will display "LIVE" accompanied by audio/visual indication.

⚠ Caution:

- When using this function, in order to avoid the COM input interference, which will affect the electric field and the accuracy, please pull the black test lead out of the COM input.
- Do keep your hand away from the meter casing. The accuracy may be unstable under the dense high-voltage. In this case, it should be judged by LCD and sound frequency together.



Picture 6a



Picture 6b

9.6 Others

- Auto power off:** The meter will automatically power off to save power if there is no operation for 15 min. You can wake it up by pressing any button or restart it after turning the switch to OFF.
- Press and hold the SELECT button** in off state and then turn on the meter again to disable the auto power off function. Restart the meter after shut it down to resume this function.
- Buzzer:** When any button is pressed or the function switch is turned, if it is valid, the buzzer will make one beep (about 0.25s). The buzzer will also beep intermittently to indicate the over range during the voltage or current measurement.
- Low battery detection:** The battery voltage will be automatically detected as long as the meter is on. If it is lower than 2.6V, the LCD will display the "⚡" symbol.
- Low battery shutdown function:** When the battery voltage is lower than 2.5V, the LCD displays the "⚡" symbol, the "Lo.B" interface appears and lasts for about 10s, the buzzer makes consecutive beeps 3 times, and then the meter automatically shuts down (no interface is displayed).

10. Technical Specifications

Accuracy: $\pm$ (%reading + counts), the calibration period is 1 year.
Ambient temperature and humidity: 23°C±5°C; ≤80%RH.
Temperature coefficient: the accuracy assured temperature condition is 18°C~28°C, the range of ambient temperature fluctuation is stable within $\pm 1^\circ\text{C}$. When the temperature is less than 18°C or over 28°C, the additional temperature coefficient error is 0.1 x (specified accuracy)/°C.

10.1 Current Measurement AC Current

Range	Resolution	Accuracy
400.0mA	0.1mA	$\pm$ (0.7%+3)
4.000A	0.001A	$\pm$ (0.5%+2)
40.00A	0.01A	$\pm$ (0.5%+2)

10.2 Voltage Measurement

DC Voltage

Range		Resolution	Accuracy
UT203+	UT204+		
400.0mV	600.0mV	0.1mV	± (0.7%+3) ± (0.5%+2)
4.000V	6.000V	0.001V	
40.00V	60.00V	0.01V	
400.0V	600.0V	0.1V	
600V	1V	1V	

AC Voltage/Voltage Frequency

Range		Resolution	Accuracy
UT203+	UT204+		
4.000V	6.000V	0.001V	± (1.0%+5)
40.00V	60.00V	0.01V	
400.0V	600.0V	0.1V	
600V		1V	
Voltage Frequency 10Hz~60KHz		0.01Hz~0.01KHz	± (0.5%+2)

⚠ Caution:

- UT203+: short press "SELECT" in AC voltage/Hz scale to enter the Hz function;
- UT204+: long press "SELECT" to enter/exit the Hz function, the input range over 5V.
- The input impedance is about 10MΩ
- Current/voltage frequency response: 45Hz ~ 400Hz, displays true RMS value
- Accuracy guarantee range: 1%~100%
- AC crest factor of non-sinusoidal wave can reach 3.0 at 4000 counts while can only reach 1.8 at 6000 counts, the additional error should be added for the corresponding crest factor as follows:
A. Add 3% when the peak factor is 1 ~ 2
B. Add 5% when the peak factor is 2 ~ 2.5
C. Add 7% when the peak factor is 2.5 ~ 3

10.3 Continuity/Diode Measurement

Function	Range	Resolution	Accuracy
Continuity	400.0Ω/600.0Ω	0.1Ω	≤10Ω: Consecutive beeps ≥31Ω: No beep The median: uncertain
Diode	4.000V/6.000V	0.001V	The open circuit voltage is about 4V For the silicon PN junction diode, the voltage value is generally about 0.5~0.8V.

10.4 Resistance Measurement

Range		Resolution	Accuracy
UT203+	UT204+		
400.0Ω	600.0Ω	0.1Ω	± (1.0%+2)
4.000kΩ	6.000kΩ	0.001kΩ	± (0.8%+2)
40.00kΩ	60.00kΩ	0.01kΩ	
400.0kΩ	600.0kΩ	0.1kΩ	
4.000MΩ	6.000MΩ	0.001MΩ	± (2.5%+5)
40.00MΩ	60.00MΩ	0.01MΩ	

⚠ Caution:

- Measured resistance value = displayed value - resistance value of short circuited test leads
- Open circuit voltage is about 1V
- Overload protection: 600Vrms

10.5 Capacitance Measurement

Range		Resolution	Accuracy
UT203+	UT204+		
40.00nF	60.00nF	0.01nF	± (4%+5)
400.0nF	600.0nF	0.1nF	
4.000μF	6.000μF	0.001μF	
40.00μF	60.00μF	0.01μF	
400.0μF	600.0μF	0.1μF	

⚠ Caution:

Measurement sensitivity:
≤100kHz: 200mVrms ≤ input range ≤ 30Vrms;
>100kHz~1MHz: 600mVrms ≤ input range ≤ 30Vrms;
>1MHz~10MHz: 1Vrms ≤ input range ≤ 30Vrms.

Duty ratio is only applicable to ≤10kHz square wave measurement with a range of 1Vp-p:

If frequency ≤ 1kHz, duty cycle will be 10.0%~95.0%;
If frequency > 1kHz, duty cycle will be 30.0%~70.0%.

10.8 Temperature Measurement (UT204+ only)

Range	Resolution	Accuracy
-40°C~40°C	1°C	±4°C
40°C~500°C	1°C	± (1.5%+5)
500°C~1000°C	1°C	± (2.0%+5)
-40°F~104°F	1°F	±6°F
104°F~932°F	1°F	± (2.0%+6)
932°F~1832°F	1°F	± (2.5%+4)

⚠ Caution:

The meter displays "OL" after startup, it is only suitable for K-type thermocouple (Nickel-Chromium ~ Nickel-Silicon temperature sensor) and temperature measurements below 1000°C/1832°F. The formula for Celsius to Fahrenheit is °F = 1.8°C + 32.

10.9 NCV

Range	Electric field sensing sensitivity level	Accuracy
NCV	EFL	The electric field sensing sensitivity is divided into two levels ("EFH" & "EFL"). The meter defaults to "EFH". a) AC voltage above 24V±6V can be sensed. "EFL" mode is recommended when the power frequency voltage is 110V. b) "EFH" can be set in 220V condition. AC voltage above 74V±12V can be sensed with getting close to wires, and identify whether the main socket is charged or to judge the live/neutral wire of socket according to the intensity of sensing. Note: Test results may be affected by different socket designs or wire insulation thickness.
NCV	EFH	

10.10 LIVE Function (UT204+ only)

Range	Live wire measurement	Accuracy
LIVE	Triggered voltage ≥ AC 60V (50Hz/60Hz)	1) Display "..." and "AC" symbol before startup 2) Display "..." when test neutral wire. 3) Display "LIVE" and Δ symbol when test live wire, and change sound and LED flashing frequency according to the live wire voltage intensity.

11. Maintenance

- Warning: Before opening the rear cover of meter, remove test leads to avoid electric shock.

11.1 General Maintenance

- Clean the meter casing with a soft cloth and mild detergent. Do not use abrasives or solvents!
- Do not use the tester or test leads if they appear to have any abnormality.
- The maintenance and service must be implemented by qualified professionals or designated departments.

11.2 Battery Replacement (Picture 7)

When the "⚡" symbol appears on the LCD, please replace the batteries in time to ensure measurement accuracy. Batteries specification:
2 standard AAA 1.5V batteries.

Operation

- Turn off the meter and remove the test leads from the input terminals.
- Unscrew the screw of the battery compartment, remove the battery cover, and take out the used batteries as shown.

شكل ۵-۲: كاتالوك مولتی متر

١. Kumar, R., *HHO Generation & Its Application on Welding*. ٢٠١٧.
٢. Nabil, T. and M.M.K. Dawood, *Enabling efficient use of oxy-hydrogen gas (HHO) in selected engineering applications; transportation and sustainable power generation*. Journal of Cleaner Production, ٢٠١٩. ٢٣٧: p. ١١٧٧٩٨.
٣. Enshasy, H., et al., *A Schematic Design of HHO Cell as Green Energy Storage*. Acta Electronica Malaysia, ٢٠١٩. ٣(٢): p. ١٥-٠٩.
٤. Edwards, P.P., et al., *Hydrogen and fuel cells: towards a sustainable energy future*. Energy policy, ٢٠٠٨. ٣٦(١٢): p. ٤٣٦٢-٤٣٥٦.
٥. Hijikata, T., *Research and development of international clean energy network using hydrogen energy (WE-NET)*. International journal of hydrogen energy, ٢٠٠٢. ٢٧(٢): p. ١٢٩-١١٥.
٦. Dresselhaus, M. and I. Thomas, *Alternative energy technologies*. Nature, ٢٠٠١. ٤١٤(٦٨٦١): p. ٣٣٧-٣٣٢.
٧. Momirlan, M. and T.N. Veziroglu, *The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet*. International journal of hydrogen energy, ٢٠٠٥. ٣٠(٧): p. ٨٠٢-٧٩٥.
٨. Carmo, M., et al., *A comprehensive review on PEM water electrolysis*. International journal of hydrogen energy, ٢٠١٣. ٣٨(١٢): p. ٤٩٣٤-٤٩٠١.
٩. Acar, C. and I. Dincer, *Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources*. International journal of hydrogen energy, ٢٠١٤. ٣٩(١): p. ١٢-١.
١٠. Ni, M., M.K. Leung, and D.Y. Leung, *Technological development of hydrogen production by solid oxide electrolyzer cell (SOEC)*. International journal of hydrogen energy, ٢٠٠٨. ٣٣(٩): p. ٢٣٥٤-٢٣٣٧.
١١. Saur, G., *Wind-to-hydrogen project: electrolyzer capital cost study*. ٢٠٠٨, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
١٢. Sarrias-Mena, R., et al., *Electrolyzer models for hydrogen production from wind energy systems*. International Journal of Hydrogen Energy, ٢٠١٥. ٤٠(٧): p. ٢٩٢٧-٢٩٣٨.
١٣. El-Kassaby, M.M., et al., *Effect of hydroxy (HHO) gas addition on gasoline engine performance and emissions*. Alexandria Engineering Journal, ٢٠١٦. ٥٥(١): p. ٢٤٣-٢٥١.
١٤. Sivasubramanian, P., et al., *Electrochemical hydrogen production from thermochemical cycles using a proton exchange membrane electrolyzer*. International Journal of Hydrogen Energy, ٢٠٠٧. ٣٢(٤): p. ٤٦٨-٤٦٣.
١٥. Eichman, J., K. Harrison, and M. Peters, *Novel electrolyzer applications: providing more than just hydrogen*. ٢٠١٤, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
١٦. Sudrajat, A., et al. *Principle of generator HHO hybrid multistack type production technologies to increase HHO gas volume*. in SHS Web of Conferences. ٢٠١٨. EDP Sciences.

- .۱۷ Görgün, H., *Dynamic modelling of a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer*. International journal of hydrogen energy, ۲۰۰۶. ۳۱(۱): p. ۳۸-۲۹
- .۱۸ da Costa Lopes, F. and E.H. Watanabe. *Experimental and theoretical development of a PEM electrolyzer model applied to energy storage systems*. in ۲۰۰۹ Brazilian Power Electronics Conference. ۲۰۰۹. IEEE.
- .۱۹ Hoffman, K., et al., *Metal hydride storage for mobile and stationary applications*. International Journal of Hydrogen Energy, ۱۹۷۶. ۱(۲): p. ۱۵۱-۱۳۳
- .۲۰ De Souza, R.F., et al., *Electrochemical hydrogen production from water electrolysis using ionic liquid as electrolytes: towards the best device*. Journal of Power Sources, ۲۰۰۷. ۱۶۴(۲): p. ۷۹۸-۷۹۲
- .۲۱ Baltacioglu, M.K., et al., *Experimental comparison of pure hydrogen and HHO (hydroxy) enriched biodiesel (B۱۰) fuel in a commercial diesel engine*. International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۱۶. ۴۱(۱۹): p. ۸۳۵۳-۸۳۴۷
- .۲۲ Drogui, P., et al., *Hydrogen peroxide production by water electrolysis: application to disinfection*. Journal of applied electrochemistry, ۲۰۰۱. ۳۱(۸): p. ۸۸۲-۸۷۷
- .۲۳ Salek, F., M. Zamen, and S.V. Hosseini, *Experimental study, energy assessment and improvement of hydroxy generator coupled with a gasoline engine*. Energy Reports, ۲۰۲۰. ۶: p. ۱۵۶-۱۴۶
- .۲۴ Zoulias, E., et al., *A review on water electrolysis*. Tcjs, ۲۰۰۴. ۴(۲): p. ۷۱-۴۱
- .۲۵ Samantara, A.K. and S. Ratha, *Potential Applications of Electrolysis for Commercial Hydrogen Production*, in *Metal Oxides/Chalcogenides and Composites*. ۲۰۱۹, Springer. p. ۷۷-۶۹
- .۲۶ Yang, C., et al., *Multimode process monitoring based on robust dictionary learning with application to aluminium electrolysis process*. Neurocomputing, ۲۰۱۹. ۳۳۲: p. ۳۱۹-۳۰۵
- .۲۷ Linkov, V. and J. Kleperis, *Electrolysis*. ۲۰۱۲
- .۲۸ Abbasi, A., B. Firouzi, and P. Sendur, *On the application of Harris hawks optimization (HHO) algorithm to the design of microchannel heat sinks*. Engineering with Computers, ۲۰۲۱. ۳۷(۲): p. ۱۴۲۸-۱۴۰۹
- .۲۹ Baltacıoğlu, M.K., *A novel application of pulse width modulation technique on hydroxy gas production*. International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۱۹. ۴۴(۲۰): p. ۹۷۳۴-۹۷۲۶
- .۳۰ Conker, Ç., *A novel fuzzy logic based safe operation oriented control technique for driving HHO dry cell systems based on PWM duty cycle*. International Journal of Hydrogen Energy, ۲۰۱۹. ۴۴(۲۰): p. ۹۷۲۵-۹۷۱۸
- .۳۱ Manu, P., et al., *On-board generation of HHO gas with dry cell electrolyser and its applications: a review*. International Journal of Energy Technology and Policy, ۲۰۲۱. ۱۷(۱): p. ۳۷-۱۲
- .۳۲ Fukuda, K.-i., et al., *Inhalation of hydrogen gas suppresses hepatic injury caused by ischemia/reperfusion through reducing oxidative stress*. Biochemical and biophysical research communications, ۲۰۰۷. ۳۶۱(۳): p. ۶۷۴-۶۷۰
- .۳۳ Petersen, B., et al., *Generation and characterization of pigs transgenic for human hemeoxygenase- ۱(hHO-۱)*. Xenotransplantation, ۲۰۱۰. ۱۷(۲): p. ۱۰۳-۱۰۲
- .۳۴ Badr, N.O., et al. *HHO Generation Application*. in *The International Undergraduate Research Conference*. ۲۰۱۶. The Military Technical College.
- .۳۵ Krishna, V.M., et al., *Effect of hydroxy gas addition on performance and exhaust emissions in variable compression spark ignition engine*. Materials Today: Proceedings, ۲۰۲۰. ۲۴: p. ۹۳۶-۹۳۰

- .36 Arjun, T., et al., *A review on analysis of HHO gas in IC engines*. Materials Today: Proceedings, 2019. 11: p. 1129-1137
- .37 Cavendish, H., *The Scientific Papers of the Honourable Henry Cavendish, FR S*. Vol. 2. 2011: Cambridge University Press.
- .38 Zahnle, K.J., M. Gacesa, and D.C. Catling, *Strange messenger: A new history of hydrogen on Earth, as told by Xenon*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2019. 244: p. 85-86
- .39 Bond, G.C., *A short history of hydrogen spillover*, in *Studies in Surface Science and Catalysis*. 1983, Elsevier. p. 16-1
- .40 Colgan, J.D., *The international energy agency*. Challenges for the 21st Century. GPPi Energy Policy Paper, 2009. 6
- .41 Mizuno, T., et al., *Hydrogen evolution by plasma electrolysis in aqueous solution*. Japanese Journal of Applied Physics, 2005. 44(1R): p. 396
- .42 Shimizu, N., et al., *A novel method of hydrogen generation by water electrolysis using an ultra-short-pulse power supply*. Journal of applied electrochemistry, 2006. 36(4): p. 423-439 .
- .43 Kelly, P., *A Practical Guide to 'Free-Energy' Devices*. 2010, Part.
- .44 Chang, H.-w. and C.-c. Hsu, *Plasmas in saline solutions sustained using rectified ac voltages: polarity and frequency effects on the discharge behaviour*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2012. 45(25): p. 255203
- .45 Mandal, B., et al., *Effects of geometry of electrodes and pulsating DC input on water splitting for production of hydrogen*. International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), 2012. 2(1): p. 102-99
- .46 Saksono, N., et al. *Hydroxyl radical production in plasma electrolysis with KOH electrolyte solution*. in *AIP Conference Proceedings*. 2015. AIP Publishing LLC.
- .47 Kaya, M.F., et al., *Investigation of alkaline water electrolysis performance for different cost effective electrodes under magnetic field*. International Journal of Hydrogen Energy, 2017. 42(28): p. 17592-17583
- .48 Choi, B., et al., *Design and performance evaluation of a novel 1kW-class hydrogen production/power generation system*. Applied Energy, 2017. 194: p. 303-296
- .49 Vincent, I., et al., *Pulsed current water splitting electrochemical cycle for hydrogen production*. International Journal of Hydrogen Energy, 2018. 43(22): p. 10240-10248
- .50 Efendi, S. and R.A. Nurisma. *Karakteristik Performa Generator Oxyhydrogen Tipe Dry Cell dengan Penambahan Katalis Kalium Hidroksida*. in *Prosiding SENTIKUIN (Seminar Nasional Teknologi Industri, Lingkungan dan Infrastruktur)*. 2019
- .51 Bow, Y. and T. Dewi. *HHO gas generation in hydrogen generator using electrolysis*. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. IOP Publishing.
- .52 Subramanian, B. and V. Thangavel, *Analysis of onsite HHO gas generation system*. International Journal of Hydrogen Energy, 2020
- .53 El Kady, M., et al. *Parametric study and experimental investigation of hydroxy (HHO) production using dry cell*. Fuel, 2020. 282: p. 118825
- .54 Jannah, Z. and S. Susilo. *Design of HHO generators as producers of water fuel (HHO generator product analysis based on electric current and catalyst)*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. IOP Publishing.

- .۵۵ Ahmad, M.S., et al. *PV integrated on-demand water electrolysis system for HHO generation and its application as primary fuel in combustion*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. ۲۰۲۱. IOP Publishing.
- .۵۶ Karagöz, Y., et al., *Effect of hydrogen addition using on-board alkaline electrolyser on SI engine emissions and combustion*. *International journal of hydrogen energy*, ۲۰۱۸. : (۲۴) ۴۳p. . ۱۱۲۸۵-۱۱۲۷۵
- .۵۷ Musmar, S.e.A. and A.A. Al-Rousan, *Effect of HHO gas on combustion emissions in gasoline engines*. *Fuel*, ۲۰۱۱. ۹۰(۱۰): p. ۳۰۷۰-۳۰۷۶
- .۵۸ Al-Rousan, A.A., *Reduction of fuel consumption in gasoline engines by introducing HHO gas into intake manifold*. *International journal of hydrogen energy*, ۲۰۱۰. ۳۵(۲۳): p. ۱۲۹۳۵-۱۲۹۳۰
- .۵۹ Subramanian, B. and V. Thangavel, *Analysis of onsite HHO gas generation system*. *International Journal of Hydrogen Energy*, ۲۰۲۰. ۴۵(۲۸): p. ۱۴۲۳۱-۱۴۲۱۸
- .۶۰ El Soly, A., et al., *Comparative experimental investigation of oxyhydrogen (HHO) production rate using dry and wet cells*. *International Journal of Hydrogen Energy*, ۲۰۲۱. ۴۶(۲۴): p. ۱۲۶۵۳-۱۲۶۳۹

Abstract

Hydrogen gas is considered as one of the energy sources in the future due to the possibility of producing it from seawater. One of the most widely used methods of producing hydrogen gas is water electrolysis. Electrolysis of water by an electrolyzer, by passing an electric current through water molecules, using an intercellular membrane, breaks down water molecules into hydrogen and oxygen. If the intercellular membrane is removed, hydrogen gas and oxygen are mixed to produce hydroxy gas, which can be used to improve the combustion process and reduce fuel consumption. For this purpose, in this research, the design and fabrication of a multicellular electrolyzer producing hydroxy gas using 316 steel sheet has been done and potassium hydroxide has been used to create the electrical conductivity of water. Also, to supply the energy consumption required by the electrolyzer, three DC power supplies with different current ranges have been used. Then, in the results of the experiments, the effect of current intensity on the electrolyzer voltage is investigated, the effect of current intensity on the amount of hydroxy gas production, the effect of number of plates on the amount of hydroxy gas produced, energy intensity, the effect of series and parallelity of electrolyzer plates and production. Paid per level. Experiments show that the voltage of each electrolyzer cell is in the range of 2 to 3 volts, and to achieve higher voltages, a series of plate arrangements must be used, and the optimal energy consumption intensity in the electrolyzer is between 10 and 15 amps, as well as power consumption. 400 watts can reach 130 liters per hour of hydroxy gas. After evaluating the electrolyzer, the effect of this gas injection on the

combustion process was investigated. For this purpose, the hydroxy gas produced by the electrolyzer was injected into the inlet air to the combustion burner with a heat capacity of 40,000 kcal / h. Items such as the effect of this gas injection on the appearance of the flame, exhaust pollutants such as Co, Nox, Hc and temperature ... are investigated. In general, a 25% decrease in Co and a 7% decrease in Hc and a slight increase in Nox as well as a 6 ° increase in flame temperature were observed in the experiments.

Keywords (5 to 7 keywords): Multicellular electrolyzer, hydroxy gas, clean fuel, renewable energy, combustion burner



Shahrood University of
Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Energy Systems Engineering

Design and manufacture of electrolyzer producing hydroxy gas and investigate the effect of this gas in the combustion process

By: Reza Shahraki shahdabadi

Supervisor:

Dr. Mohammad Zamen

Advisor:

Dr. Vahid Hosseini

September 2021