



گزارش نهایی فرصت مطالعاتی در صنعت

مجری: دکتر احسان محمدی زهرانی (مرتبه علمی: استادیار)

ایمیل: ehsanmohamadi@um.ac.ir تلفن: ۳۸۸۰۵۰۴۸

دانشکده: گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

واحد عملیاتی: بهیار صنعت سپاهان (<https://behyaar.com>)

تاریخ شروع و پایان: از تاریخ ۱۴۰۱/۴/۱ لغایت ۱۴۰۱/۶/۳۱ و ۱۴۰۲/۴/۱ لغایت ۱۴۰۲/۶/۳۱

نوع دوره: به مدت ۶ ماه و به صورت تمام وقت (دو مقطع سه ماهه)

محور مطالعه: پوشش های مقاوم به خوردگی

زمینه تخصصی: مهندسی مواد (گرایش خوردگی و اکسیداسیون)

۱. معرفی شرکت بهیار صنعت سپاهان

این شرکت در سال ۱۳۸۷ در شهرک علمی و تحقیقاتی اصفهان آغاز به کار کرد که با دارا بودن ۸۰۰ نفر نیروی کار، ۱۸ واحد تحقیق و توسعه، ۳۶ محصول صنعتی تولیدی، و بیش از ۸۰ پروژه جاری با صنایع مختلف از بزرگترین شرکت‌های مستقر در این شهرک می‌باشد. زمینه اصلی فعالیت شرکت، توسعه و تولید تجهیزات پزشکی است. این شرکت همچنین در حوزه‌های متنوع دانش بنیان فعالیت می‌کند که شامل موارد ذیل است:

- رادیوتراپی
- تصویربرداری پزشکی
- صنعت هوایی
- حمل و نقل
- تجهیزات جراحی و اتاق عمل
- اپتیک و لیزر
- زیست فناوری
- ابزار دقیق صنعتی
- انرژی های نو

با توجه به وسعت حوزه‌های فناوری که شرکت در آنها فعال است، متخصصین در حوزه‌های مختلف علمی در این شرکت در قالب فرصت مطالعاتی یا به عنوان پرسنل شرکت مشغول به همکاری هستند. این شرکت دارای کارگاه پیشرفته پوشش‌دهی قطعات صنعتی به روش رسوب‌دهی الکتروشیمیایی است که به صورت فعال با صنایع مختلف همکاری می‌نماید. با توجه به ارتباط فعالیت شرکت با حوزه تخصصی مجری طرح، دوره فرصت مطالعاتی در این شرکت طی تابستان ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ سپری شد. در ادامه به دستاوردهای فعالیت و تجارب کسب شده پرداخته می‌شود. اطلاعات بیشتر در زمینه حوزه های فعالیت شرکت در تارنمای آن ارائه شده است.

۲. مهمترین خروجی، دستاوردها و نتایج مؤثر به دست آمده در دوره فرصت مطالعاتی

محور فعالیت‌های صورت گرفته در شرکت طی مدت حضور شامل ارائه مشاوره علمی به بخش‌هایی از شرکت بود که در زمینه توسعه پوشش‌های مقاوم به خوردگی، پرینت سه بعدی، و انرژی‌های نو فعالیت داشتند. در طی مدت حضور در شرکت، فعالیت مطالعاتی در زمینه قطعات فلزی پیل‌های سوختی و نیز روش‌های پرینت سه بعدی کاشتنی‌های تیتانیومی (برای کاربردهای پزشکی در بدن انسان) و مکانیسم تخریب قطعات پمپ‌های آب در صنایع غذایی صورت گرفت که به صورت گزارش‌ها و جلسات هفتگی در شرکت ارائه گردید. طی مدت همکاری با تیم ساخت و تولید شرکت برای ساخت نمونه آزمایشگاهی یک الکترولایزر برای تولید هیدروژن سبز در فرآیند شکافت

آب تجارب ارزشمندی در این زمینه بدست آمد. در مجموع تجارب حاصل کمک شایانی به تهیه یک مقاله کنفرانس (شکل ۱) و یک مقاله مروری ژورنالی چاپ شده (شکل ۲) و یک مقاله ژورنالی دیگر (در زمینه توسعه انرژی‌های نو)، که در حال حاضر در وضعیت داوری قرار دارد، نمود.



شکل ۱: گواهی ارائه مقاله کنفرانسی مستخرج از فعالیت های صورت گرفته طی مدت دوره فرصت مطالعاتی در صنعت



شکل ۲: مقاله مروری چاپ شده در مجله JCR-Q1 در زمینه ایمپلنت های تیتانیومی به روش پرینت سه بعدی

۳. نوآوری و خلاقیت ارائه شده در جهت پاسخ به نیازهای واحد عملیاتی

عمده فعالیت‌های مطالعاتی و تحقیقاتی صورت‌گرفته طی دوره فرصت مطالعاتی در واحد عملیاتی بر توسعه پوشش‌های مقاومت به خوردگی در تجهیزات پزشکی و ایمپلنت‌های پزشکی و نیز ساخت افزایشی قطعات پزشکی متمرکز بود. علاوه بر مدارک علمی ارائه شده به شرکت طی مدت حضور (شامل گزارش‌های هفتگی و دستورالعمل‌های فنی)، مقالات چاپ شده (اشاره شده در بخش ۲) نیز حاکی از نوآوری و تاثیر فعالیت‌های صورت گرفته طی مدت زمان شش ماهه حضور در این شرکت دانش بنیان است.

۳. قراردادهای، پایان‌نامه‌ها (رساله) و روش‌های همکاری تعریف شده در دوره فرصت مطالعاتی:

در حال حاضر یک پایان نامه کارشناسی در رابطه با ایمپلنت‌های پزشکی با موفقیت به پایان رسیده است و پایان نامه جدیدی با موضوع تولید ایمپلنت‌های حامل دارو در دست تعریف است و امید می رود در آینده یک رساله دکتری در زمینه ایمپلنت‌های پزشکی تولید شده به روش ساخت افزایشی نیز در این زمینه تعریف شود. واحد عملیاتی آمادگی کامل برای حمایت از طرح‌های پژوهشی مذکور به صورت ارائه دسترسی به تجهیزات آزمایشگاهی و مواد آزمایشگاهی مورد نیاز و نیز ارائه مشاوره برای تجاری سازی محصولات و ثبت پتنت بین‌المللی دارد.

۴. مهمترین تجارب حاصل شده از دوره فرصت مطالعاتی در جامعه و صنعت

در مجموع فرصت مطالعاتی انجام شده نتایج ملموس و اثربخشی در فعال شدن زمینه‌های نوین تحقیقاتی در سطح تحصیلات تکمیلی داشته است. تجارب حاصل از فرصت مطالعاتی به صورت ذیل قابل جمع‌بندی است.

- فرآیند تجاری سازی ایده و ثبت پتنت بین‌المللی
- طراحی و ساخت الکترولایزر برای شکافت مولکول آب و تولید سوخت هیدروژن سبز
- طراحی و ساخت اجزای پیل سوختی بویژه صفحات اتصال دهنده
- بهبود رفتار خوردگی و عملکرد زیستی ایمپلنت‌های تیتانیومی در فرآیند دارورسانی در استخوان
- آشنایی با پروتکل‌های آزمون‌های in-Vivo و in-Vitro در ارزیابی عملکرد خوردگی زیستی ایمپلنت‌های پزشکی
- آشنایی با روش L-PBF در ساخت افزایشی ایمپلنت‌های پزشکی
- شبکه سازی حرفه‌ای با متخصصین ملی و بین‌المللی

۵. پیشنهادات اجرایی جهت افزایش اثربخشی دوره‌های فرصت مطالعاتی

تجربه انجام فرصت مطالعاتی طی دو تابستان متوالی بسیار راهگشا و موثر بوده است. در مجموع پیشنهاد می‌شود فرصت مطالعاتی به صورت تمام وقت در ایام تابستان انجام شود. همچنین شرکت در کنفرانس‌های ملی و بین‌المللی به عنوان بخشی از دوره فرصت مطالعاتی و نیز چاپ نتایج حاصل در مجلات بین‌المللی می‌تواند در اثربخش‌تر کردن دوره فرصت مطالعاتی موثر باشد.

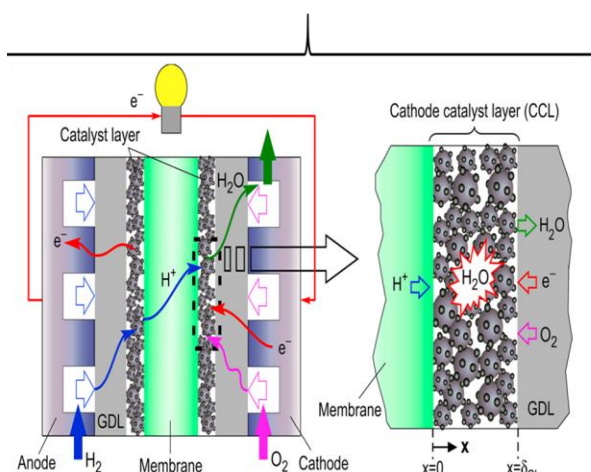
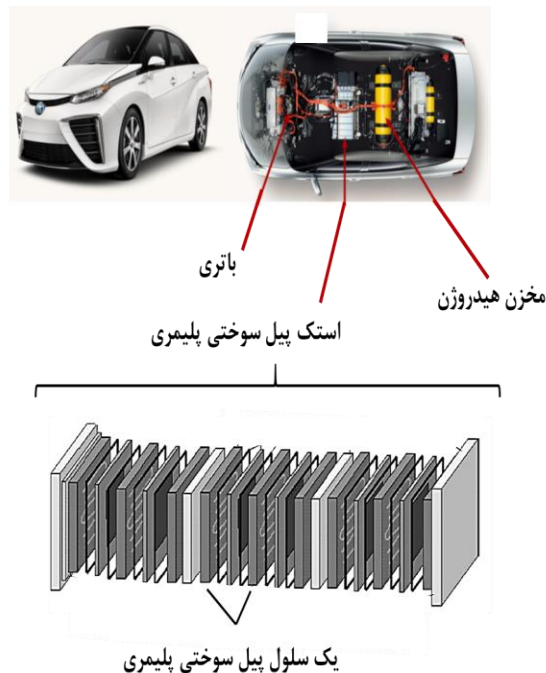
تخریب پیل‌های سوختی پلیمری در خودروهای الکتریکی: روش‌های عیب‌یابی و پیشگیری

الهه آبی^۱، احسان محمدی زهرانی^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد، دانشگاه فردوسی، مشهد، خراسان رضوی، ایران، پست الکترونیک: e.abil@mail.um.ac.ir

^۲ استادیار (نویسنده مسئول)، دانشگاه فردوسی، مشهد، خراسان رضوی، ایران، پست الکترونیک: ehsanmohamadi@um.ac.ir

* پژوهشگر مهمان (فرصت مطالعاتی در صنعت)، شرکت بهیار صنعت سپاهان، شهرک علمی و تحقیقاتی اصفهان، ایران



شکل ۱. تصویری از استک پیل سوختی پلیمری، یک سلول منفرد و ساختار مجموعه الکترود غشایی [۲، ۳].

پیل سوختی پلیمری به‌عنوان یک منبع انرژی دارای مزایایی مانند کارایی و بازدهی زیاد، چگالی توان بالا، عدم آلودگی و صدای کم است [۴-۷]. پیل‌های سوختی پلیمری به علت در دسترس بودن گاز هیدروژن و هوا و بازدهی بالای آن مهم‌ترین

چکیده

باتوجه به شدت گرفتن پدیده گرمایش زمین و معضلات زیست‌محیطی مرتبط با آن، آلاینده‌های حاصل از سوختن سوخت‌های فسیلی یکی از چالش‌برانگیزترین مشکلاتی است که اخیراً موردتوجه قرار گرفته است. برای رفع این مشکل باید از روش‌های سازگار با محیط‌زیست، پایدار، و با بازدهی بالا استفاده نمود. در میان تمام فناوری‌های مختلف مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر، فناوری پیل سوختی یکی از امیدوارکننده‌ترین پیشرفت‌ها برای مهار این وضعیت است. در میان انواع پیل‌های سوختی، پیل‌های سوختی پلیمری به‌عنوان یک فناوری امیدوارکننده برای تولید انرژی پاک و کارآمد در نظر گرفته شده‌اند. اما عدم وجود پایداری و طول عمر کافی، یکی از مشکلات و چالش‌های مهم در زمینه استفاده از این نوع پیل سوختی است. در صنایع داخلی نیز تحقیقات فناورانه گسترده‌ای در زمینه توسعه خودروهای برقی و هیبریدی بومی در جریان است. در این مقاله، باتوجه به اهمیت موضوع، مروری بر این فناوری و مزایای آن و آزمون‌های عیب‌یابی انجام شده است و برخی از راه‌حل‌های ممکن برای چالش‌های مرتبط ارائه گردید.

واژه‌های کلیدی

پیل سوختی پلیمری، سوخت ورودی، لایه کاتالیستی، غشای پلیمری، آزمون‌های عیب‌یابی

مقدمه

پیل‌های سوختی پلیمری^۱ مستقیماً انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند و خروجی آن برق، گرما، و آب است. در این پیل‌ها، الکترون‌ها در مدار بیرونی برای تولید الکتریسیته حرکت می‌کنند و پروتون‌ها نیز روی سطح کاتالیست‌ها جذب می‌شوند و آب تولید می‌شود. همچنین این سیستم ماهیت آبگریز دارد و آب تولید شده در آن از سیستم خارج می‌شود [۱]. شکل ۱ تصویر یک پیل سوختی پلیمری و مجموعه الکترود غشایی^۲ (MEA) را نشان می‌دهد [۲].

² Membrane electrode assembly (MEA)

¹ Polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC)

آن افزایش یابد تا استفاده از آن به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد [۹].

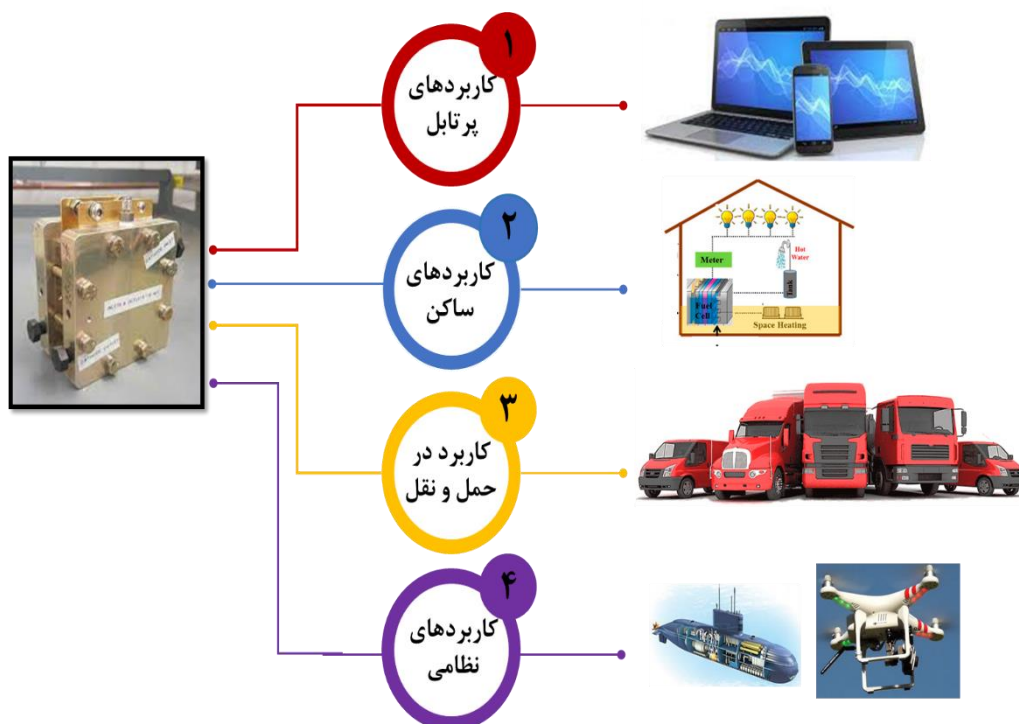
منبع انرژی برای موتورهای خودروهای الکتریکی در سراسر جهان هستند (شکل ۲) [۸]. برای افزایش کاربرد پیل های سوختی پلیمری باید هزینه های نگهداری آن کاهش و طول عمر



شکل ۲. ویژگی های پیل سوختی پلیمری [۱۰].

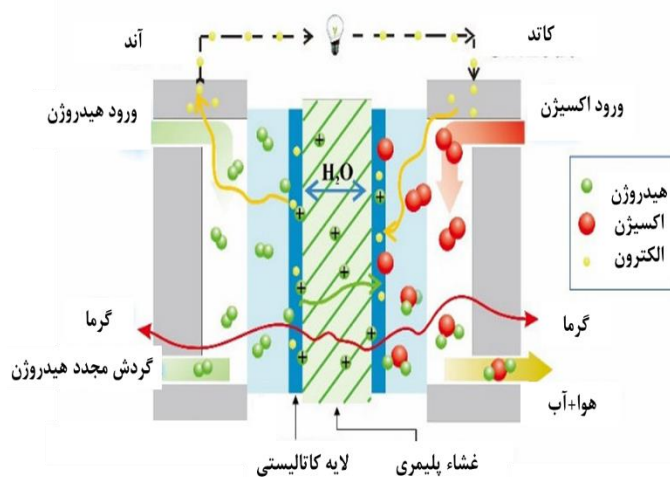
[۱۱-۱۳]. در شکل ۳ برخی از کاربردهای پیل های سوختی پلیمری نشان داده شده است. اما مشاهده می شود که عدم وجود پایداری کافی یکی از مشکلات مهم در این زمینه است و دوام و پایداری به دلیل شرایط عملیاتی و عوامل محیطی متغیر و پیچیده همچنان یک چالش بزرگ است [۱۴-۱۶].

با توجه به پیشرفت های اخیر و تحولات جهانی صورت گرفته در این زمینه، خودروهای ساخته شده با این منبع انرژی جدید (سیستم های پیل سوختی متشکل از چند صد PEMFC) به گزینه های اصلی برای طراحی سیستم قدرت خودرو تبدیل شده اند و پیشرفت های زیادی در مسیر تجاری سازی داشته اند



شکل ۳. کاربردهای پیل سوختی پلیمری.

در این مطالعه به بررسی برخی از اجزاء اصلی مؤثر بر دوام پیل سوختی پلیمری مانند سوخت ورودی، لایه کاتالیستی و غشای پلیمری و همچنین مطالعه روش‌های بررسی پایداری و عیب‌یابی این نوع از پیل‌های سوختی پرداخته شده است. هدف این بررسی آشنایی با زمینه‌های احتمالی که به تحقیقات و اصلاحات نیاز دارند، است. شکل ۴ اجزاء پیل سوختی پلیمری را نشان می‌دهد.



شکل ۴. اجزاء پیل سوختی پلیمری [۱۷].

۱. سوخت ورودی

اگر پیل سوختی با شرایطی مانند جریان ناکافی هیدروژن ورودی، عدم رطوبت کافی، وجود ناخالصی در گاز ورودی کار کند، این به عنوان شرایط عملکرد نامناسب پیل سوختی تلقی می‌شود.

۱-۱ وجود مونوکسید کربن

مونوکسید کربن نسبت به سوخت هیدروژن برای واکنش با کاتالیزور پلاتین، واکنش‌پذیرتر است و منجر به رسوب لایه مونوکسید کربن بر روی سطح فعال کاتالیزور پلاتین می‌شود و پس از رسوب مونوکسید کربن، بازیابی سطح فعال کاتالیزور برای واکنش الکتروشیمیایی بعدی بسیار دشوار است [۱۸، ۱۹]. میزان مونوکسید کربن در سوخت هیدروژن باید کمتر از ۱۰ قسمت در میلیون باشد [۲۰، ۲۱].

ورود سوخت هیدروژن خالص به پیل سوختی می‌تواند آسیب ایجاد شده توسط مونوکسید کربن را جبران کند و با توجه به میزان آسیب به زمان بیشتری نیاز است [۱۸]. میزان تخریب بر اثر مونوکسید کربن به برخی از متغیرهای دیگر مانند شرایط حرارتی، فشار و میزان جریان سوخت هیدروژن و ... بستگی دارد [۲۲]. وجود غشای تبادل پروتون مرطوب برای تبادل پروتون از آند به کاتد ضروری است و در یک غشای تبادل

پروتون با دمای بالا، سرعت واکنش بین مونوکسید کربن و کاتالیزور کمتر می‌شود [۲۳، ۲۴]. برای بهترین عملکرد یک پیل سوختی، خلوص هیدروژن باید ۹۹/۹۹ درصد باشد. مدیریت سوخت هیدروژن به دو صورت انجام می‌شود: (۱) عدم آلودگی سوخت هیدروژن ورودی، و (۲) افزایش سطح تحمل پیل سوختی. البته تصفیه هیدروژن با جداسازی توسط غشای مقرون به صرفه‌تر است و مقدار نسبتاً کمتری انرژی مصرف می‌شود [۲۵].

۲-۱ وجود رطوبت

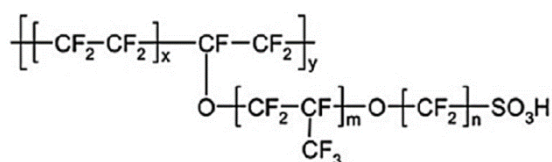
اگر آب به درستی خارج نشود، در مجموعه الکترود غشایی تجمع می‌کند. با طغیان آب، تخلخل مربوط به نفوذ سوخت در لایه انتشار گاز از بین می‌رود. بنابراین، گاز هیدروژن ورودی نمی‌تواند به منطقه واکنش فعال کاتالیزور برسد [۲۶-۲۸]. در نهایت، سوخت مورد نیاز واکنش تأمین نمی‌شود و عملکرد کلی و دوام پیل سوختی کاهش می‌یابد [۲۹-۳۱]. نیمه دوم واکنش الکتروشیمیایی در سمت کاتد که آب یکی از محصولات خروجی است، انجام می‌شود. مدیریت دقیق آب در مجموعه الکترود غشایی، عملکرد کلی و طول عمر پیل سوختی را بهبود می‌بخشد [۳۲، ۳۸].

۲. لایه کاتالیستی

در این بخش به بررسی مکانیسم تخریب لایه کاتالیستی و تأثیر انواع مختلف آلودگی در پیل سوختی پلیمری پرداخته شده است. مهم‌ترین مکانیسم تخریب لایه کاتالیستی در پیل سوختی پلیمری شامل اثر آلودگی‌های مختلف مانند مونوکسید کربن، دی‌اکسید کربن، سولفید هیدروژن، دی‌اکسید گوگرد، نیتروژن و آمونیاک است.

پلاتین یک عنصر نجیب و گران‌قیمت است که منجر به عملکرد مقرون به صرفه و بهبود عملیات پیل سوختی می‌شود [۳۳-۳۵]. کاتالیزور پلاتین معمولاً روی یک پایه کربنی قرار دارد که به ایجاد تماس داخلی بین کاتالیزور و غشای تبادل پروتون کمک می‌کند. با کمک کربن، پروتون به غشای تبادل یون هدایت می‌شود و فرآیند واکنش تسریع می‌شود [۱۸]. از جمله عناصر مورد استفاده به عنوان پایه برای کاتالیست می‌توان به نانولوله‌های کربنی، گرافن و ... اشاره کرد [۳۶-۳۹]. استفاده از عناصر نگهدارنده همراه با لایه کاتالیزور، عملکرد و دوام پیل سوختی را افزایش می‌دهد [۳۱]. اخیراً استفاده از لایه کاتالیست بر پایه پلاتین همراه با کربن یا نانولوله کربنی توسعه یافته است که منجر به بارگذاری مقادیر کمتری از کاتالیزور شده است (شکل ۵) [۴۰، ۴۱].

غشای نافئون^۱ به عنوان ماده استاندارد در بین مواد مختلف مورد استفاده برای ساخت پیل سوختی پلیمری شناخته می شود اما با این وجود، به نظر می رسد یکی از اشکالات اساسی آن، چالش هدایت پروتون از آن در صورت افزایش دما است [۵۰، ۵۱]. ساختار شیمیایی غشای نافئون در شکل ۶ نشان داده شده است.

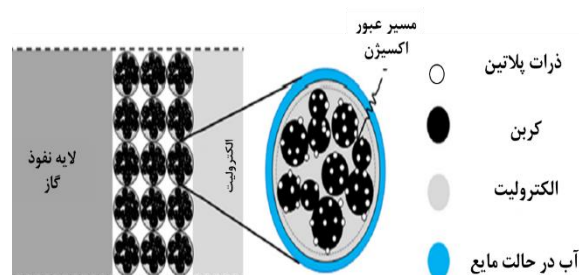


شکل ۶. ساختار شیمیایی غشای نافئون [۵۲].

وجود سوراخ، پارگی و ضخامت غیریکنواخت از عیوب مکانیکی غشای هستند که عمدتاً به دلیل تغییرات ابعادی ناشی از تغییرات دما و رطوبت، نرخ جریان بیش از حد واکنش دهنده ها و حمله شیمیایی توسط پراکسیدهای نامطلوب تولید شده در طول فرآیند الکتروشیمیایی، فشار یا تنش، و ... رخ می دهد [۱۵، ۵۳-۵۶]. همچنین علاوه بر این، فرآیندهای ساخت نادرست مجموعه MEA می تواند باعث ایجاد ترک، پارگی یا سوراخ هایی شود که به طور چشمگیری دوام کل دستگاه را تحت تأثیر قرار می دهد [۱۵، ۴۶].

ضخامت غشای برای عملکرد پیل سوختی بسیار مهم است و غشاهای ضخیم تر در برابر تنش های شیمیایی و مکانیکی مقاوم تر هستند [۲۹]. مکانیسم های تخریب نافئون با توجه به پدیده های مختلف تخریب توسط محققین گزارش شده است و یکپارچگی غشای به طور کلی تحت تأثیر تخریب های شیمیایی، مکانیکی و ... قرار دارد [۵۷، ۵۸].

پیل های دما بالا در مقایسه با پیل های سوختی دما پایین، دارای مزایایی مانند احتمال مسمومیت کمتر با مونوکسید کربن، راندمان بالاتر کاتالیزور، مدیریت ساده تر گرما و مقاومت بیشتر در برابر ناخالصی های سوخت است و در مقایسه با پیل های سوختی پلیمری دمای پایین مبتنی بر نافئون پیشنهاد شده است [۵۹-۶۲]. اخیراً تحقیقات زیادی در زمینه توسعه پیل سوختی غشای تبادل پروتون برای کاربرد در دمای بالا (۱۲۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی گراد) انجام شده است. یکی از محدود پیل هایی که در دمای بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی گراد کار می کند، پلی بنزیمیدازول^۲ است و در حقیقت، پلی بنزیمیدازول یکی از رویکردهای عملی برای تحقق پیل های پلیمری دما بالا است [۶۳، ۶۴]. پلی بنزیمیدازول نوعی پلیمر هتروسیکلیک آروماتیک



شکل ۵. لایه کاتالیستی در پیل سوختی پلیمری [۴۱].

کاتالیزور پلاتین هنگام واکنش در ولتاژ بالا به یون متحرک Pt^{2+} تبدیل می شود و یون ها تجمع می کنند و منجر به کاهش سطح فعال کاتالیزور می شود و مکانیسم واکنش در سمت کاتد با مشکل مواجه می شود [۴۲]. علاوه بر این، یون های Pt^{2+} نیز می توانند مهاجرت کرده و در ساختار غشای رسوب کنند. این رسوب پلاتین می تواند رادیکال های هیدروکسیل (OH) تولید کند که موجب تخریب قابل توجه غشای پلیمری می شود [۴۳، ۴۴].

هر گونه تخریب در پایه کربنی به واپاشی کاتالیست منجر خواهد شد. واپاشی کاتالیست به معنای انحلال کاتالیست یا جدا شدن کاتالیست از لایه کاتالیستی است. این امر باعث کاهش سطح فعال کاتالیستی برای واکنش های الکتروشیمیایی می شود [۱۵]. تغییر میزان بارگذاری کاتالیست و شرایط حرارتی نامناسب نیز موجب آسیب شدید به سیستم پیل سوختی می شود [۴۲، ۴۵]. میزان فعالیت کاتالیست پلاتین ممکن است به دلیل وجود ناخالصی های احتمالی مانند مونوکسید کربن موجود در واکنش دهنده ها که می تواند روی سطح الکتروکد جذب شود، کاهش یابد. غیرفعال شدن کاتالیزور همچنین ممکن است از طریق مهاجرت ذرات پلاتین روی پایه کربنی، جدا شدن و انحلال در الکترولیت و خوردگی پایه کربنی و در نتیجه کاهش سطح فعال الکتروشیمیایی شود ایجاد شود [۴۶-۴۹].

برای غلبه بر محدودیت های غشای تبادل پروتون، تخریب پیل سوختی ناشی از تخریب کاتالیست استفاده از غشای تبادل یون قلیایی جایگزین مناسبی است. غشای قلیایی با کاتالیزورهای غیر پلاتین مبتنی بر فلزات واسطه سازگار است که بارگذاری کاتالیزور پلاتین را در پیل سوختی کاهش می دهد و قیمت کلی پیل سوختی کمتر می شود.

۳. غشای پلیمری

۳-۱ ساختار غشای پلیمری

^۲ Polybenzimidazole (PBI)

^۱ Nafion

می‌شود. در جدول ۱ برخی از غشاهای پلیمری مرسوم و ویژگی‌های آن‌ها ذکر شده است.

۲-۳ تخریب شیمیایی

در تخریب شیمیایی غشای نافئون دو مکانیسم اصلی وجود دارد که عبارت‌اند از [۸۸]: (۱) باز شدن زنجیر اصلی، و (۲) تخریب زنجیره جانبی. تخریب شیمیایی یکی از دلایل اصلی شکست غشای ۱ است [۸۹-۹۱] که به علت حمله رادیکال‌های هیدروکسیل (OH) یا پراکسی (OOH*) به گروه‌های انتهایی پلیمری ایجاد می‌شود [۹۲]. آزمون‌های XPS انجام شده نیز نشان داده است که هنگام عملکرد پیل سوختی، برهمکنش بین کربن، فلوئور و اکسیژن در حال تغییر است. مثالی که توسط کرتین و همکاران نیز ارائه شده است [۹۳، ۹۴].

۳-۳ تخریب مکانیکی

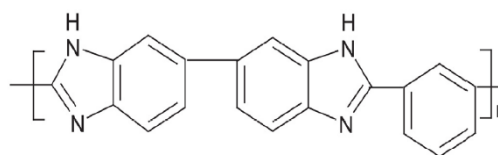
سوراخ‌های ایجاد شده و مواد خارجی که طی فرایند ساخت و تولید به درون MEA وارد می‌شوند، می‌توانند موجب انتشار ترک‌ها و کاهش شدید طول عمر پیل شوند [۸۹]. فشار غیریکنواخت، و خستگی ناشی از تنش‌های ایجاد شده در طول چرخه‌های تغییر دما و رطوبت می‌تواند منجر به شکست مکانیکی غشای شود [۸۹، ۹۵]. ویژگی‌های تبادلی پروتون و دوام در طول عملیات پیل سوختی باید حفظ شود تا شرایط بهینه برای غشای فراهم شود. ضخامت غشای باید بهینه باشد تا در معرض تخریب مقاوم باشد. همچنین میزان حرارت نیز کنترل شود [۹۶-۹۹]. مقایسه پیل‌های سوختی دما پایین و دما بالا در جدول ۲ ارائه شده است:

جدول ۲: مقایسه پیل‌های سوختی پلیمری دما پایین و دما بالا [۱۰۰].

اجزاء/ویژگی	پیل سوختی دما پایین	پیل سوختی دما بالا
غشای	پلیمرهای سولفون شده	پلیمر بر پایه PBI
الکترو	پلاتین - کربن یا آلیاژهای پلاتین	پلاتین - کربن یا آلیاژهای پلاتین
دمای عملیاتی	۸۰-۷۰ °C	۱۸۰-۱۲۰ °C
فشار عملیاتی	فشار محیط	فشار محیط
بازدهی	۴۰٪	۴۵٪ - ۵۰٪
عامل حامل پروتون	آب	اسیدهای غیرآلی
سرعت واکنش	کم	زیاد

برای ارزیابی غشاهای پلیمری از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که در جدول ۳ به برخی از آن‌ها اشاره شده است.

با واحد تکرار شونده بنزیمیدازول در زنجیره اصلی پلیمر است که عمدتاً نقش جداسازی هر دو الکترود و انتقال پروتون را ایفا می‌کند [۶۵، ۶۶]. شکل ۷ ساختار شیمیایی پلی بنزیمیدازول را نشان می‌دهد.



شکل ۷. ساختار شیمیایی پلی بنزیمیدازول [۶۶].

پلی بنزیمیدازول یک پلیمر آمورف با دمای انتقال شیشه‌ای نسبتاً بالا تقریباً برابر با ۴۲۵-۴۳۶ °C است و مقاومت حرارتی و شیمیایی خوبی دارد [۶۷]. رسانایی این غشای نسبت به غشای نافئون کمتر است. واینرایت^۱ و همکاران اولین محققینی بودند که استفاده از غشاهای مبتنی بر پلی بنزیمیدازول دوپ شده با اسید را برای کاربردهای پیل سوختی پیشنهاد کردند [۶۸]. انواع مختلف اسیدها از آن زمان مورد بررسی قرار گرفته‌اند و اسید فسفریک و اسید سولفوریک برای استفاده در پیل‌های سوختی دما بالا مناسب‌تر هستند. به خصوص اسید فسفریک دارای پایداری حرارتی بالایی است که آن را به یک گزینه مطلوب برای دوپینگ اسیدی پلی بنزیمیدازول تبدیل کرده است و عملکرد غشای را از نظر رسانایی تا چندین برابر افزایش می‌دهد [۳].

جدول ۱: مقایسه الکترولیت‌های مختلف در پیل‌های سوختی پلیمری.

نوع غشای	ویژگی‌ها	مرجع
نافئون	رسانایی یونی بالا مقاومت شیمیایی خوب	[۶۹]
پلی اتر کتون ^۲	مقاومت حرارتی خوب	[۷۰]
پلی اتر اتر کتون ^۳ سولفون شده	مقاومت خوب در برابر حلال مقاومت در برابر اکسیداسیون	[۷۱-۷۳]
پلی فسفاژن ^۴	انعطاف‌پذیری خوب	[۷۴، ۷۵]
پلی بنزیمیدازول	مقاومت زیاد در دمای بالا مقاومت زیاد در برابر شعله	[۷۶، ۷۱]

با این حال، غشاهای پلی بنزیمیدازول دوپ شده با اسید فسفریک نیز دارای محدودیت‌هایی هستند که عبارت‌اند از [۷۷، ۷۸]: (۱) خواص مکانیکی پایین به علت سطوح دوپینگ بالا، (۲) تجمع ذرات کاتالیزور، (۳) شسته شدن اسید از غشای به‌ویژه در دما و رطوبت زیاد. به‌منظور غلبه بر این معایب، از پرکننده‌های متنوعی مانند خاک رس [۷۹، ۸۰]، گرافن [۸۱-۸۵] و ذرات سیلیس [۸۶] و تیتانیوم دی‌اکسید [۸۷] استفاده

^۴ Polyphosphazene

^۵ Fatigue

^۱ Wainright

^۲ Polyether ketones

^۳ Sulphonated polyetherether ketone

آزمایش بی‌وقفه برای رسیدن به ۴۰۰۰۰ ساعت مورد نیاز است [۱۰۶-۱۰۸، ۴۶].

۴-۲ آزمون تنش‌ی تسریع شده داخلی^۶

به‌منظور کاهش زمان آزمایش، شرکت‌های مختلفی نظیر دوپانت^۷ و جنرال موتورز^۸، آزمون‌های تنش‌ی شتاب‌دار را برای بررسی میزان پایداری و عملکرد پیل سوختی اجرا کرده‌اند [۴۶]. عملکرد دینامیکی پیل‌های سوختی پلیمری در شرایطی که از هوای محیط به‌عنوان اکسیدان استفاده می‌شود، به شرایط عملکرد پیل از جمله فشار، دما، رطوبت و همچنین کیفیت هوا بستگی دارد [۱۰۹-۱۱۲]. آزمون AST داخلی یک آزمون تجربی تسریع شده برای پیل‌های سوختی پلیمری جهت شبیه‌سازی چرخه‌های واقعی رانندگی یا تسریع تخریب پیل سوختی است. در عملکرد واقعی وسایل نقلیه، پیل‌های سوختی در معرض چرخه‌های مکرر راه‌اندازی-خاموش شدن، شتاب‌گیری، شروع به کار در هوای سرد یا شرایط غنی از سوخت یا کاهش میزان سوخت قرار می‌گیرند [۱۱۳-۱۱۸].

۴-۳ آزمون تنش‌ی تسریع شده خارجی^۹ (AST)

در طول یک AST داخلی، حالت‌های تخریب مختلفی را می‌توان در اجزاء مختلف از جمله غشای، لایه کاتالیستی، لایه نفوذ گاز و ... مشاهده نمود. اما شناسایی علل اصلی تخریب از طریق ASTهای داخلی دشوار است، زیرا عوامل متعددی در سلول‌های سوختی پلیمری از جمله چرخه دما، آب، تنش مکانیکی یا سایر عوامل استرس‌زا وجود دارند [۱۵]. از آزمون AST خارجی برای بررسی اجزاء خاص و شناسایی علل تخریب استفاده می‌شود. در این آزمون باید اثرات تداخلی سایر اجزاء و عوامل ایجاد کننده تنش را نیز به حداقل برساند [۱۵].

۴-۳-۱ چرخه تغییر رطوبت

در طول عملیات پیل سوختی پلیمری معمولاً واکنش‌دهنده‌ها در ورودی‌ها مرطوب می‌شوند تا غشای مرطوب شود و مقاومت اهمی حاصل از غشای به حداقل برسد. رطوبت در کانال‌ها و الکترودهای پیل سوختی پلیمری، به دلیل شرایط آب و هوایی محلی یا شرایط عملکرد متفاوت، در معرض تغییرات مکرر است. به همین دلیل توجه زیادی به تأثیر چرخه رطوبت شده است. مطالعات مختلفی به بررسی تأثیر رطوبت بر عملکرد طولانی مدت پیل‌های سوختی پلیمری پرداخته‌اند [۱۱۹-۱۲۵].

۴-۳-۲ چرخه دما

جدول ۳: آزمون‌های ارزیابی غشای پلیمری.

نام آزمون	مکانیزم تخریب غشای	مرجع
آزمون طیف‌سنجی فوتوالکترتون اشعه ایکس ^۱	استفاده از گروه‌های اسیدی و تخریب غشای	[۱۰۱]
شرایط تخریب تسریع شده ^۲	تخریب بر اثر تشکیل H ₂ و O ₂ بر روی کاتالیزور	[۱۰۲]
مطالعات مکانیک کوانتومی ^۳	حمله رادیکال OH به غشای پلیمری و حمله OH به گاز H ₂ برای تشکیل رادیکال هیدروژنی	[۱۰۳]
تست‌های معرف فنتون و آزمایش‌های درون سلولی ^۴	وجود گروه‌های اسید سولفونیک و تخریب غشای با ظهور سوراخ‌ها، پارگی‌ها و حباب‌های بزرگ	[۱۰۴]
آزمون رادیکال اکسیژن ^۵	تخریب غشای به دلیل شکسته شدن پیوندهای پلیمری و کاهش استحکام مکانیکی آن	[۱۰۵]

فناوری پیل سوختی در خودروها نیاز به یک طراحی نوآورانه دارد و عیب‌یابی و کنترل میزان دوام و پایداری آن از اهمیت بسزایی برخوردار است. قبل از تجاری‌سازی فناوری پیل سوختی، باید مطالعات دقیق‌تری بر روی قطعات و میزان تخریب پیل‌های سوختی انجام شود.

۴. آزمون‌های عیب‌یابی

پایداری و دوام پیل سوختی پلیمری یکی از مهم‌ترین موانع فنی برای تجاری‌سازی موفقیت‌آمیز سلول‌های سوختی پلیمری برای استفاده در خودرو است که بر اساس میزان تخریب و عملکرد نادرست اجزاء مختلف در طولانی‌مدت تعیین می‌شود؛ بنابراین، بررسی مکانیسم‌ها و آزمون‌های تخریب اجزاء مختلف برای توسعه سلول‌های سوختی پلیمری با کارایی بالا بسیار مهم است.

۴-۱ بررسی دوام در حالت پایدار

تاکنون مطالعات کمی با هدف بررسی طول عمر واقعی پیل‌های سوختی پلیمری به دلیل هزینه‌های بالا و مدت زمان طولانی آزمایش انجام شده است. به‌عنوان مثال برای کاربردهایی که در آن پیل سوختی بدون حرکت است، بیش از ۴٫۵ سال

⁶ In-situ accelerated stress test (AST)

⁷ Dupont

⁸ General motors

⁹ Ex-situ accelerated stress test

¹ X-ray photoelectron spectroscopy

² Accelerated decay conditions

³ Quantum mechanics (QM)

⁴ Fenton's Reagent tests and in-cell tests

⁵ Oxygen Radical test

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، انواع مکانیسم‌های رایج تخریب در پیل‌های سوختی پلیمری که در خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرند بحث و بررسی شد. در مجموع چالش اصلی در توسعه پیل‌های سوختی در خودرو افزایش طول عمر پیل و بکارگیری روش‌های استاندارد در عیب‌یابی آن است. با توجه به توسعه تحقیقات دانش‌بنیان در صنایع داخلی در بومی‌سازی فناوری پیل سوختی، توجه به توسعه استانداردهای عیب‌یابی پیل‌ها و افزایش طول عمر آن‌ها با شناخت مکانیسم‌های عمده تخریب دارای اهمیت است.

تشکر و قدردانی

این پژوهش در مدت فرصت مطالعاتی در صنعت توسط نویسنده دوم مقاله در شرکت دانش‌بنیان بهیار صنعت سپاهان در تابستان سال ۱۴۰۱ انجام گرفت. از شرکت دانش‌بنیان بهیار صنعت سپاهان در شهرک علمی و تحقیقاتی اصفهان برای فراهم آوردن بستر این پژوهش تقدیر و قدردانی می‌شود. از دانشگاه فردوسی مشهد برای فراهم کردن فرصت مطالعاتی در صنعت قدردانی می‌شود.

دمای عملیاتی تأثیر زیادی بر عملکرد پیل سوختی پلیمری دارد. در کمتر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد، فعالیت کاتالیزوری نسبتاً کم است و پیل عملکرد ضعیفی دارد. در دمای بیش از ۹۰ درجه سانتی‌گراد نیز غشای ممکن است بیش از حد خشک شود. بنابراین دمای بهینه معمولاً بین ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد است. لازم به ذکر است که حفظ یک دمای کاملاً ثابت در طول عملکرد پیل سوختی پلیمری دشوار است و همیشه دمای پیل به دلیل چرخه راه‌اندازی و خاموش شدن، نوسان دارد [۱۵]. مطالعات زیادی به تأثیر چرخه دما بر دوام پیل سوختی پلیمری اختصاص یافته است [۱۲۶-۱۲۹].

۴-۳-۳ چرخه یخ‌زدگی - ذوب

یکی از مشکلات مربوط به پیل‌های سوختی پلیمری، شروع به کار کردن در شرایطی است که سرد هستند. مطالعات نشان داده‌اند که کارکرد پیل‌های سوختی پلیمری در دماهای زیر انجماد چالش‌برانگیز است زیرا یخ تشکیل شده در داخل سلول موجب افزایش مقاومت انتقال جرم و آسیب به ساختار MEA می‌شود. بنابراین، تأثیر چرخه یخ‌زدگی-ذوب بر عملکرد کوتاه مدت و بلند مدت پیل به‌طور فعال مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۳۸-۱۳۰].

۴-۳-۴ ارتعاش

پیل‌های سوختی پلیمری در خودروها در شرایط واقعی در معرض لرزش هستند. اثر ارتعاش مکانیکی بر عملکرد طولانی‌مدت پیل‌های سوختی پلیمری به اندازه کافی بررسی نشده است [۱۳۹-۱۴۱]. همچنین فرکانس و دامنه ارتعاش تأثیر قابل توجهی بر لایه‌لایه شدن بین لایه کاتالیستی و غشای دارد و انتشار آسید تحت شرایط ارتعاش می‌تواند توسط رطوبت و چرخه حرارتی تسریع شود [۱۴۲]. بررسی‌های مشابه در این زمینه توسط محققین دیگر انجام شده است. شکل ۸ نمونه‌ای از آزمون ارتعاش را نشان می‌دهد.



شکل ۸. آزمون ارتعاش در پیل سوختی پلیمری [۱۴۰].

- [1] P. C. Okonkwo and C. Otor, "A review of gas diffusion layer properties and water management in proton exchange membrane fuel cell system," *International Journal of Energy Research*, vol. 45, no. 3, pp. 3780-3800, 2021.
- [2] P. K. Das, X. Li, and Z.-S. Liu, "Analysis of liquid water transport in cathode catalyst layer of PEM fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 6, pp. 2403-2416, 2010/03/01/ 2010.
- [3] N. Jain, A. Roy, R. Jain, and N. Karmakar, "Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells: Alternative to fossil fuels for power supply to Heavy Earth Moving and Allied Machinery in Mining and Civil Engineering Industry," ed: Dec, 2013.
- [4] B. Yang *et al.*, "A critical survey of proton exchange membrane fuel cell system control: Summaries, advances, and perspectives," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 17, pp. 9986-10020, 2022/02/26/ 2022.
- [5] Z. Liu, B. Zhang, and S. Xu, "Research on air mass flow-pressure combined control and dynamic performance of fuel cell system for vehicles application," *Applied Energy*, vol. 309, p. 118446, 2022/03/01/ 2022.
- [6] M. K. Debe, "Electrocatalyst approaches and challenges for automotive fuel cells," *Nature*, vol. 486, no. 7401, pp. 43-51, 2012/06/01 2012.
- [7] I. E. L. Stephens, J. Rossmeisl, and I. Chorkendorff, "Toward sustainable fuel cells," *Science*, vol. 354, no. 6318, pp. 1378-1379, 2016.
- [8] G. Wang *et al.*, "Progress on design and development of polymer electrolyte membrane fuel cell systems for vehicle applications: A review," *Fuel Processing Technology*, vol. 179, pp. 203-228, 2018.
- [9] W. Schmittinger and A. Vahidi, "A review of the main parameters influencing long-term performance and durability of PEM fuel cells," *Journal of power sources*, vol. 180, no. 1, pp. 1-14, 2008.
- [10] A. Mohiuddin, A. Rahman, M. Chemani, and M. Zakaria, "INVESTIGATION OF PEM FUEL CELL FOR AUTOMOTIVE USE," *IIUM Engineering Journal*, vol. 16, pp. 69-78, 11/30 2015.
- [11] Z. P. Cano *et al.*, "Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets," *Nature Energy*, vol. 3, no. 4, pp. 279-289, 2018/04/01 2018.
- [12] X. Wang, Y. Lu, B. Zhang, J. Liu, and S. Xu, "Experimental analysis of an ejector for anode recirculation in a 10 kW polymer electrolyte membrane fuel cell system," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 3, pp. 1925-1939, 2022/01/08/ 2022.
- [13] Z. Dimitrova and W. B. Nader, "PEM fuel cell as an auxiliary power unit for range extended hybrid electric vehicles," *Energy*, vol. 239, p. 121933, 2022/01/15/ 2022.
- [14] J. Wang, "System integration, durability and reliability of fuel cells: Challenges and solutions," *Applied Energy*, vol. 189, pp. 460-479, 2017/03/01/ 2017.
- [15] J. Zhao and X. Li, "A review of polymer electrolyte membrane fuel cell durability for vehicular applications: Degradation modes and experimental techniques," *Energy Conversion and Management*, vol. 199, p. 112022, 2019/11/01/ 2019.
- [16] P. Ren, P. Pei, Y. Li, Z. Wu, D. Chen, and S. Huang, "Degradation mechanisms of proton exchange membrane fuel cell under typical automotive operating conditions," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 80, p. 100859, 2020/09/01/ 2020.
- [17] Y. Yuan, Z. Qu, W. Wang, G. Ren, and B. Hu, "Illustrative Case Study on the Performance and Optimization of Proton Exchange Membrane Fuel Cell," *ChemEngineering*, vol. 3, p. 23, 03/02 2019.
- [18] M. S. Habib *et al.*, "Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) durability factors, challenges, and future perspectives: a detailed review," *Material Science Research India (Online)*, vol. 18, no. 2, pp. 217-234, 2021.
- [19] G. Postole and A. Auroux, "The poisoning level of Pt/C catalysts used in PEM fuel cells by the hydrogen feed gas impurities: The bonding strength," *international journal of hydrogen energy*, vol. 36, no. 11, pp. 6817-6825, 2011.
- [20] A. Alihosseinzadeh, B. Nematollahi, M. Rezaei, and E. N. Lay, "CO methanation over Ni catalysts supported on high surface area mesoporous nanocrystalline γ -Al₂O₃ for CO removal in H₂-rich stream," *International journal of hydrogen energy*, vol. 40, no. 4, pp. 1809-1819, 2015.
- [21] M. Nielsen *et al.*, "Low-temperature aqueous-phase methanol dehydrogenation to hydrogen and carbon dioxide," (in eng), *Nature*, vol. 495, no. 7439, pp. 85-9, Mar 7 2013.
- [22] A. Awasthi, K. Scott, and S. Basu, "Dynamic modeling and simulation of a proton exchange membrane electrolyzer for hydrogen production," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 22, pp. 14779-14786, 2011/11/01/ 2011.
- [23] F. J. Pinar, M. Rastedt, N. Pilinski, P. Wagner, and A. Dyck, "Demonstrating feasibility of a high temperature polymer electrolyte membrane fuel cell operation with natural gas reformat composition," *International journal of hydrogen energy*, vol. 42, no. 19, pp. 13860-13875, 2017.
- [24] H. Wang, R. Wang, S. Sui, T. Sun, Y. Yan, and S. Du, "Cathode design for proton exchange membrane fuel cells in automotive

- applications," *Automotive Innovation*, vol. 4, no. 2, pp. 144-164, 2021.
- [25] P. L. Mores, A. M. Arias, N. J. Scenna, J. A. Caballero, S. F. Mussati, and M. C. Mussati, "Membrane-based processes: optimization of hydrogen separation by minimization of power, membrane area, and cost," *Processes*, vol. 6, no. 11, p. 221, 2018.
- [26] F. A. de Bruijn, V. A. T. Dam, and G. J. M. Janssen, "Review: Durability and Degradation Issues of PEM Fuel Cell Components," *Fuel Cells*, vol. 8, no. 1, pp. 3-22, 2008.
- [27] X.-Z. Yuan, H. Li, S. Zhang, J. Martin, and H. Wang, "A review of polymer electrolyte membrane fuel cell durability test protocols," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 22, pp. 9107-9116, 2011.
- [28] T. Ous and C. Arcoumanis, "Effect of compressive force on the performance of a proton exchange membrane fuel cell," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 221, no. 9, pp. 1067-1074, 2007.
- [29] N. Sazali, W. N. Wan Salleh, A. S. Jamaludin, and M. N. Mhd Razali, "New perspectives on fuel cell technology: A brief review," *Membranes*, vol. 10, no. 5, p. 99, 2020.
- [30] N. S. Khattra, M. El Hannach, K. H. Wong, M. Lauritzen, and E. Kjeang, "Estimating the durability of polymer electrolyte fuel cell membranes using a fracture percolation model," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 167, no. 1, p. 013528, 2019.
- [31] B. Choudhury, G. Escobedo, D. E. Curtin, and S. Banerjee, "PEM Hydrogen Fuel Cell Durability: A Perspective Review and Recent Advances," *Transworld Research Network*, vol. 37661, no. 2, pp. 695-23, 2008.
- [32] K. Bouziane, N. Zamel, X. Francois, Y. Meyer, and D. Candusso, "Effects of mechanical compression on the performance of Polymer Electrolyte Fuel Cells and analysis through in-situ characterisation techniques-A review," *Journal of Power Sources*, vol. 424, pp. 8-26, 2019.
- [33] N. Wang, Z. G. Qu, Z. Y. Jiang, and G. B. Zhang, "A unified catalyst layer design classification criterion on proton exchange membrane fuel cell performance based on a modified agglomerate model," *Chemical Engineering Journal*, vol. 447, p. 137489, 2022/11/01/ 2022.
- [34] L. Yang *et al.*, "Catalyst layer design with inhomogeneous distribution of platinum and ionomer optimal for proton exchange membrane fuel cell cold-start," *Chemical Engineering Science*, vol. 263, p. 118132, 2022/12/14/ 2022.
- [35] S. Zaman *et al.*, "Carbon-based catalyst supports for oxygen reduction in proton-exchange membrane fuel cells," *Trends in Chemistry*, vol. 4, no. 10, pp. 886-906, 2022/10/01/ 2022.
- [36] L. Lu, H. Deng, Z. Zhao, B. Xu, and X. Sun, "N-doped carbon nanotubes supported Pt nanowire catalysts for proton exchange membrane fuel cells," *Journal of Power Sources*, vol. 529, p. 231229, 2022/05/01/ 2022.
- [37] D. E. Glass, V. Galvan, M. Iullicucci, and G. K. S. Prakash, "Optimization of platinum loading on partially fluorinated carbon catalysts for enhanced proton exchange membrane fuel cell performance," *Journal of Power Sources*, vol. 542, p. 231725, 2022/09/15/ 2022.
- [38] K. Y. Park *et al.*, "Mitigating Pt Loss in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Cathode Catalysts Using Graphene Nanoplatelet Pickering Emulsion Processing," *Advanced Functional Materials*, p. 2205216, 2022.
- [39] Z. Zhao *et al.*, "Graphene-nanopocket-encaged PtCo nanocatalysts for highly durable fuel cell operation under demanding ultralow-Pt-loading conditions," *Nature Nanotechnology*, vol. 17, no. 9, pp. 968-975, 2022.
- [40] T. Tian, J. Tang, Y. Chen, J. Tan, S. Li, and M. Pan, "Study on accelerated stress test for fuel cell lifetime," *Int. J. Electrochem. Sci*, vol. 13, no. 2, pp. 2022-2032, 2018.
- [41] J. Marquis and M.-O. Coppens, "Achieving ultra-high platinum utilization via optimization of PEM fuel cell cathode catalyst layer microstructure," *Chemical Engineering Science*, vol. 102, pp. 151-162, 10/01 2013.
- [42] L. Peng and Z. Wei, "Catalyst Engineering for Electrochemical Energy Conversion from Water to Water: Water Electrolysis and the Hydrogen Fuel Cell," *Engineering*, vol. 6, no. 6, pp. 653-679, 2020/06/01/ 2020.
- [43] H. Chen, Z. Song, X. Zhao, T. Zhang, P. Pei, and C. Liang, "A review of durability test protocols of the proton exchange membrane fuel cells for vehicle," *Applied energy*, vol. 224, pp. 289-299, 2018.
- [44] A. Schenk, B. Cermenek, and V. Hacker, "Other polymer electrolyte fuel cells," in *Fuel Cells and Hydrogen*: Elsevier, 2018, pp. 91-115.
- [45] A. A. Franco, M. Guinard, B. Barthe, and O. Lemaire, "Impact of carbon monoxide on PEFC catalyst carbon support degradation under current-cycled operating conditions," *Electrochimica Acta*, vol. 54, no. 22, pp. 5267-5279, 2009.
- [46] J. Wu *et al.*, "A review of PEM fuel cell durability: Degradation mechanisms and mitigation strategies," *Journal of Power Sources*, vol. 184, no. 1, pp. 104-119, 2008.
- [47] M. Uno and K. Tanaka, "Pt/C catalyst degradation in proton exchange membrane fuel cells due to high-frequency potential cycling induced by switching power converters," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 23, pp. 9884-9889, 2011/12/01/ 2011.

- [48] J. C. Meier *et al.*, "Degradation Mechanisms of Pt/C Fuel Cell Catalysts under Simulated Start–Stop Conditions," *ACS Catalysis*, vol. 2, no. 5, pp. 832-843, 2012/05/04 2012.
- [49] Y. Yu, H. Li, H. Wang, X.-Z. Yuan, G. Wang, and M. Pan, "A review on performance degradation of proton exchange membrane fuel cells during startup and shutdown processes: Causes, consequences, and mitigation strategies," *Journal of Power Sources*, vol. 205, pp. 10-23, 2012/05/01/ 2012.
- [50] M. B. Karimi, F. Mohammadi, and K. Hooshyari, "Recent approaches to improve Nafion performance for fuel cell applications: A review," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 54, pp. 28919-28938, 2019/11/05/ 2019.
- [51] A. Pozio, R. F. Silva, M. De Francesco, and L. Giorgi, "Nafion degradation in PEFCs from end plate iron contamination," *Electrochimica Acta*, vol. 48, no. 11, pp. 1543-1549, 2003/05/15/ 2003.
- [52] W. Y. Hsu and T. D. Gierke, "Ion transport and clustering in Nafion perfluorinated membranes," *Journal of Membrane Science*, vol. 13, no. 3, pp. 307-326, 1983.
- [53] A. de Frank Bruijn and G. J. M. Janssen, "PEM Fuel Cell Materials: Costs, Performance and Durability," in *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, R. A. Meyers, Ed. New York, NY: Springer New York, 2017, pp. 1-41.
- [54] A. A. Amamou, S. Kelouwani, L. Boulon, and K. Agbossou, "A comprehensive review of solutions and strategies for cold start of automotive proton exchange membrane fuel cells," *Ieee Access*, vol. 4, pp. 4989-5002, 2016.
- [55] K. Panha, M. Fowler, X.-Z. Yuan, and H. Wang, "Accelerated durability testing via reactants relative humidity cycling on PEM fuel cells," *Applied Energy*, vol. 93, pp. 90-97, 2012/05/01/ 2012.
- [56] D. Seo, J. Lee, S. Park, J. Rhee, S. W. Choi, and Y.-G. Shul, "Investigation of MEA degradation in PEM fuel cell by on/off cyclic operation under different humid conditions," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 2, pp. 1828-1836, 2011/01/01/ 2011.
- [57] Q. Feng *et al.*, "A review of proton exchange membrane water electrolysis on degradation mechanisms and mitigation strategies," *Journal of Power Sources*, vol. 366, pp. 33-55, 2017/10/31/ 2017.
- [58] R. Singh, P. C. Sui, K. H. Wong, E. Kjeang, S. Knights, and N. Djilali, "Modeling the Effect of Chemical Membrane Degradation on PEMFC Performance," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 165, no. 6, p. F3328, 2018/04/27 2018.
- [59] A. Chandan *et al.*, "High temperature (HT) polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC)–A review," *Journal of Power Sources*, vol. 231, pp. 264-278, 2013.
- [60] J. Zhang *et al.*, "High temperature PEM fuel cells," *Journal of power Sources*, vol. 160, no. 2, pp. 872-891, 2006.
- [61] J. Wang, J. Wainright, H. Yu, M. Litt, and R. Savinell, "A H₂/O₂ fuel cell using acid doped polybenzimidazole as polymer electrolyte," *ECS Proceedings Volumes*, vol. 1995, no. 1, p. 202, 1995.
- [62] M. Mamlouk and K. Scott, "The effect of electrode parameters on performance of a phosphoric acid-doped PBI membrane fuel cell," *International journal of hydrogen energy*, vol. 35, no. 2, pp. 784-793, 2010.
- [63] Q. Li, R. He, J. Jensen, and N. Bjerrum, "PBI-based polymer membranes for high temperature fuel cells–preparation, characterization and fuel cell demonstration," *Fuel cells*, vol. 4, no. 3, pp. 147-159, 2004.
- [64] S. S. Araya *et al.*, "A comprehensive review of PBI-based high temperature PEM fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 46, pp. 21310-21344, 2016.
- [65] H. Shao, Z. Shi, J. Fang, and J. Yin, "One pot synthesis of multiwalled carbon nanotubes reinforced polybenzimidazole hybrids: Preparation, characterization and properties," *Polymer*, vol. 50, no. 25, pp. 5987-5995, 2009.
- [66] K. Hooshyari, B. Amini Horri, H. Abdoli, M. Fallah Vostakola, P. Kakavand, and P. Salarizadeh, "A review of recent developments and advanced applications of high-temperature polymer electrolyte membranes for PEM fuel cells," *Energies*, vol. 14, no. 17, p. 5440, 2021.
- [67] N. H. Jalani *et al.*, "Performance analysis and impedance spectral signatures of high temperature PBI–phosphoric acid gel membrane fuel cells," *Journal of Power Sources*, vol. 160, no. 2, pp. 1096-1103, 2006.
- [68] J. Wainright, J. T. Wang, D. Weng, R. Savinell, and M. Litt, "Acid-doped polybenzimidazoles: a new polymer electrolyte," *Journal of the electrochemical society*, vol. 142, no. 7, p. L121, 1995.
- [69] Y. Chang *et al.*, "Effect of superacidic side chain structures on high conductivity aromatic polymer fuel cell membranes," *Macromolecules*, vol. 48, no. 19, pp. 7117-7126, 2015.
- [70] S. J. Peighambaroust, S. Rowshanzamir, and M. Amjadi, "Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications," *International journal of hydrogen energy*, vol. 35, no. 17, pp. 9349-9384, 2010.
- [71] B. C. H. Steele and A. Heinzl, "Materials for fuel-cell technologies," *Nature*, vol. 414, no. 6861, pp. 345-352, 2001/11/01 2001.
- [72] W. Li, F. Zhang, S. Yi, C. Huang, H. Zhang, and M. Pan, "Effects of casting solvent on microstructure and ionic conductivity of anhydrous sulfonated poly(ether ether ketone)-

- inoic liquid composite membranes," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 748-754, 2012/01/01/ 2012.
- [73] L. Li, J. Zhang, and Y. Wang, "Sulfonated poly(ether ether ketone) membranes for direct methanol fuel cell," *Journal of Membrane Science*, vol. 226, no. 1, pp. 159-167, 2003/12/01/ 2003.
- [74] N. Sammes, R. Bove, and K. Stahl, "Phosphoric acid fuel cells: Fundamentals and applications," *Current opinion in solid state and materials science*, vol. 8, no. 5, pp. 372-378, 2004.
- [75] Z. Zhou, Z. Jiang, F. Chen, T. Kuang, D. Zhou, and F. Meng, "Research Progress in Energy Based on Polyphosphazene Materials in the Past Ten Years," *Polymers*, vol. 15, no. 1, p. 15, 2023.
- [76] J. Peng, X. Fu, J. Luo, L. Wang, and X. Peng, "Fabrication of high performance high-temperature proton exchange membranes through constructing stable cation-rich domain in polybenzimidazole membrane," *Chemical Engineering Journal*, vol. 453, p. 139609, 2023/02/01/ 2023.
- [77] L. A. Diaz, G. C. Abuin, and H. R. Corti, "Water and phosphoric acid uptake of poly [2, 5-benzimidazole](ABPBI) membranes prepared by low and high temperature casting," *Journal of Power Sources*, vol. 188, no. 1, pp. 45-50, 2009.
- [78] E. Quartarone *et al.*, "Pyridine-based PBI Composite Membranes for PEMFCs," *Fuel Cells*, vol. 9, no. 4, pp. 349-355, 2009.
- [79] S. Ghosh, A. Sannigrahi, S. Maity, and T. Jana, "Role of clays structures on the polybenzimidazole nanocomposites: potential membranes for the use in polymer electrolyte membrane fuel cell," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 115, no. 23, pp. 11474-11483, 2011.
- [80] S. Singha, R. Koyilapu, K. Dana, and T. Jana, "Polybenzimidazole-Clay Nanocomposite Membrane for PEM fuel cell: Effect of organomodifier structure," *Polymer*, vol. 167, pp. 13-20, 2019.
- [81] Y. Wang, Z. Shi, J. Fang, H. Xu, and J. Yin, "Graphene oxide/polybenzimidazole composites fabricated by a solvent-exchange method," *Carbon*, vol. 49, no. 4, pp. 1199-1207, 2011.
- [82] Y. Wang, Z. Shi, J. Fang, H. Xu, X. Ma, and J. Yin, "Direct exfoliation of graphene in methanesulfonic acid and facile synthesis of graphene/polybenzimidazole nanocomposites," *Journal of Materials Chemistry*, vol. 21, no. 2, pp. 505-512, 2011.
- [83] Y. Devrim and G. N. B. Durmuş, "Composite membrane by incorporating sulfonated graphene oxide in polybenzimidazole for high temperature proton exchange membrane fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 14, pp. 9004-9017, 2022.
- [84] S. Mondal, F. Papiya, S. N. Ash, and P. P. Kundu, "Composite membrane of sulfonated polybenzimidazole and sulfonated graphene oxide for potential application in microbial fuel cell," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 1, p. 104945, 2021.
- [85] K. Maegawa, H. Nagai, R. Kumar, M. M. Abdel-Galeil, W. K. Tan, and A. Matsuda, "Development of polybenzimidazole modification with open-edges/porous-reduced graphene oxide composite membranes for excellent stability and improved PEM fuel cell performance," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 294, p. 126994, 2023.
- [86] Y. Özdemir, N. Üregen, and Y. Devrim, "Polybenzimidazole based nanocomposite membranes with enhanced proton conductivity for high temperature PEM fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 4, pp. 2648-2657, 2017.
- [87] S. Díaz-Abad, M. A. Rodrigo, C. Sáez, and J. Lobato, "Enhancement of the Green H₂ Production by Using TiO₂ Composite Polybenzimidazole Membranes," *Nanomaterials*, vol. 12, no. 17, p. 2920, 2022.
- [88] P. Fröhvirt, A. Kregar, J. T. Törring, T. Katrašnik, and G. Gescheidt, "Holistic approach to chemical degradation of Nafion membranes in fuel cells: modelling and predictions," *Physical Chemistry Chemical Physics*, 10.1039/C9CP04986J vol. 22, no. 10, pp. 5647-5666, 2020.
- [89] A. LaConti, M. Hamdan, and R. McDonald, "Mechanisms of membrane degradation," *Handbook of fuel cells*, vol. 3, pp. 647-662, 2003.
- [90] J. Healy *et al.*, "Aspects of the chemical degradation of PFSA ionomers used in PEM fuel cells," *Fuel cells*, vol. 5, no. 2, pp. 302-308, 2005.
- [91] D. T. T. Hieu *et al.*, "Investigation of chemical degradation and water states in the graft-type polymer electrolyte membranes," *Polymer Engineering & Science*, vol. 62, no. 9, pp. 2757-2768, 2022.
- [92] F. De Bruijn, V. Dam, and G. Janssen, "Durability and degradation issues of PEM fuel cell components," *Fuel cells*, vol. 8, no. 1, pp. 3-22, 2008.
- [93] C. Huang, K. S. Tan, J. Lin, and K. L. Tan, "XRD and XPS analysis of the degradation of the polymer electrolyte in H₂-O₂ fuel cell," *Chemical Physics Letters*, vol. 371, no. 1-2, pp. 80-85, 2003.
- [94] D. E. Curtin, R. D. Lousenberg, T. J. Henry, P. C. Tangeman, and M. E. Tisack, "Advanced materials for improved PEMFC performance and life," *Journal of power Sources*, vol. 131, no. 1-2, pp. 41-48, 2004.
- [95] G. Escobedo, K. Raiford, G. S. Nagarajan, and K. E. Schwiebert, "Strategies for mitigation of

- PFSA polymer degradation in PEM fuel cells," *ECS Transactions*, vol. 1, no. 8, p. 303, 2006.
- [96] R. Maury, C. Auclercq, C. Devilliers, M. de Huu, O. B  ker, and M. MacDonald, "Hydrogen refuelling station calibration with a traceable gravimetric standard," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 74, p. 101743, 2020.
- [97] H. Sun, C. He, X. Yu, M. Wu, and Y. Ling, "Optimal siting and sizing of hydrogen refueling stations considering distributed hydrogen production and cost reduction for regional consumers," *International Journal of Energy Research*, vol. 43, no. 9, pp. 4184-4200, 2019.
- [98] P. K. Rose and F. Neumann, "Hydrogen refueling station networks for heavy-duty vehicles in future power systems," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 83, p. 102358, 2020.
- [99] E. D. Frank, A. Elgowainy, Y. S. Khalid, J.-K. Peng, and K. Reddi, "Refueling-station costs for metal hydride storage tanks on board hydrogen fuel cell vehicles," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 57, pp. 29849-29861, 2019.
- [100] M. A. Haque, A. B. Sulong, K. S. Loh, E. H. Majlan, T. Husaini, and R. E. Rosli, "Acid doped polybenzimidazoles based membrane electrode assembly for high temperature proton exchange membrane fuel cell: A review," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 14, pp. 9156-9179, 2017/04/06/ 2017.
- [101] C. Chen, G. Levitin, D. W. Hess, and T. F. Fuller, "XPS investigation of Nafion   membrane degradation," *Journal of Power Sources*, vol. 169, no. 2, pp. 288-295, 2007/06/20/ 2007.
- [102] V. O. Mittal, H. R. Kunz, and J. M. Fenton, "Effect of Catalyst Properties on Membrane Degradation Rate and the Underlying Degradation Mechanism in PEMFCs," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 153, no. 9, p. A1755, 2006/07/20 2006.
- [103] T. H. Yu, Y. Sha, W.-G. Liu, B. V. Merinov, P. Shirvanian, and W. A. Goddard, III, "Mechanism for Degradation of Nafion in PEM Fuel Cells from Quantum Mechanics Calculations," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 133, no. 49, pp. 19857-19863, 2011/12/14 2011.
- [104] S. Kundu, L. C. Simon, and M. W. Fowler, "Comparison of two accelerated Nafion   degradation experiments," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 93, no. 1, pp. 214-224, 2008/01/01/ 2008.
- [105] T. Kim, J. Lee, G. Cho, and K. Park, "Degradation of Nafion Membrane by Oxygen Radical," *Korean Chemical Engineering Research*, vol. 44, no. 6, pp. 597-601, 2006.
- [106] L. S. Pedersen *et al.*, "Full-scale co-firing of straw and coal," *Fuel*, vol. 75, no. 13, pp. 1584-1590, 1996/10/01/ 1996.
- [107] C. Sishtla, G. Koncar, R. Platon, S. Gamburzev, A. J. Appleby, and O. A. Velev, "Performance and endurance of a PEMFC operated with synthetic reformat fuel feed," *Journal of Power Sources*, vol. 71, no. 1, pp. 249-255, 1998/03/15/ 1998.
- [108] F. Nandjou, J. P. Poirot-Crouvezier, M. Chandesris, J. F. Blachot, C. Bonnaud, and Y. Bultel, "Impact of heat and water management on proton exchange membrane fuel cells degradation in automotive application," *Journal of Power Sources*, vol. 326, pp. 182-192, 2016/09/15/ 2016.
- [109] S. Caux, W. Hankache, M. Fadel, and D. Hissel, "PEM fuel cell model suitable for energy optimization purposes," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, pp. 320-328, 02/01 2010.
- [110] Z. Yang, Q. Du, S. Huo, and K. Jiao, "Effect of membrane electrode assembly design on the cold start process of proton exchange membrane fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 40, pp. 25372-25387, 2017.
- [111] Y. Jiang, Z. Yang, K. Jiao, and Q. Du, "Sensitivity analysis of uncertain parameters based on an improved proton exchange membrane fuel cell analytical model," *Energy conversion and management*, vol. 164, pp. 639-654, 2018.
- [112] Y. Qin, Q. Du, M. Fan, Y. Chang, and Y. Yin, "Study on the operating pressure effect on the performance of a proton exchange membrane fuel cell power system," *Energy Conversion and Management*, vol. 142, pp. 357-365, 2017.
- [113] D. Liu and S. Case, "Durability study of proton exchange membrane fuel cells under dynamic testing conditions with cyclic current profile," *Journal of Power Sources*, vol. 162, no. 1, pp. 521-531, 2006/11/08/ 2006.
- [114] B. Wahdame *et al.*, "Comparison between two PEM fuel cell durability tests performed at constant current and under solicitations linked to transport mission profile," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 17, pp. 4523-4536, 2007/12/01/ 2007.
- [115] L. Lu, M. Ouyang, H. Huang, P. Pei, and F. Yang, "A semi-empirical voltage degradation model for a low-pressure proton exchange membrane fuel cell stack under bus city driving cycles," *Journal of Power Sources*, vol. 164, no. 1, pp. 306-314, 2007/01/10/ 2007.
- [116] H. Noto, M. Kondo, Y. Otake, and M. Kato, "Development of Fuel Cell Hybrid Vehicle by Toyota -Durability," 2009.
- [117] R. Lin, B. Li, Y. P. Hou, and J. M. Ma, "Investigation of dynamic driving cycle effect on performance degradation and micro-structure change of PEM fuel cell," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 5, pp. 2369-2376, 2009/03/01/ 2009.
- [118] S. V. Selvaganesh, G. Selvarani, P. Sridhar, S. Pitchumani, and A. K. Shukla, "Durable electrocatalytic-activity of Pt-Au/C cathode in

- PEMFCs," *Physical Chemistry Chemical Physics*, 10.1039/C1CP20243J vol. 13, no. 27, pp. 12623-12634, 2011.
- [119] V. A. Sethuraman, J. W. Weidner, A. T. Haug, and L. V. Protsailo, "Durability of perfluorosulfonic acid and hydrocarbon membranes: effect of humidity and temperature," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 155, no. 2, p. B119, 2007.
- [120] K. Miyatake, H. Furuya, M. Tanaka, and M. Watanabe, "Durability of sulfonated polyimide membrane in humidity cycling for fuel cell applications," *Journal of Power Sources*, vol. 204, pp. 74-78, 2012/04/15/ 2012.
- [121] Y.-H. Lai, C. K. Mittelsteadt, C. S. Gittleman, and D. A. Dillard, "Viscoelastic stress analysis of constrained proton exchange membranes under humidity cycling," 2009.
- [122] H. Lin, Y. Hsieh, C. Chiu, T. Yu, and L. Chen, "Durability and stability test of proton exchange membrane fuel cells prepared from polybenzimidazole/poly (tetrafluoro ethylene) composite membrane," *Journal of Power Sources*, vol. 193, no. 1, pp. 170-174, 2009.
- [123] J. Chen *et al.*, "Effects of cycle duration and test hardware in relative humidity cycling of a polymer electrolyte membrane," *Journal of Power Sources*, vol. 476, p. 228576, 2020.
- [124] V. A. Sethuraman, J. W. Weidner, A. T. Haug, and L. V. Protsailo, "Durability of Perfluorosulfonic Acid and Hydrocarbon Membranes: Effect of Humidity and Temperature," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 155, no. 2, p. B119, 2007/12/03 2008.
- [125] Y.-H. Lai, C. K. Mittelsteadt, C. S. Gittleman, and D. A. Dillard, "Viscoelastic Stress Analysis of Constrained Proton Exchange Membranes Under Humidity Cycling," *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, vol. 6, no. 2, 2009.
- [126] S. Kim, B. K. Ahn, and M. Mench, "Physical degradation of membrane electrode assemblies undergoing freeze/thaw cycling: Diffusion media effects," *Journal of Power Sources*, vol. 179, no. 1, pp. 140-146, 2008.
- [127] W. Bi and T. Fuller, "Temperature effects on PEM fuel cells Pt/C catalyst degradation," *ECS Transactions*, vol. 11, no. 1, p. 1235, 2007.
- [128] T. Lochner, R. M. Kluge, J. Fichtner, H. A. El-Sayed, B. Garlyyev, and A. S. Bandarenka, "Temperature effects in polymer electrolyte membrane fuel cells," *ChemElectroChem*, vol. 7, no. 17, pp. 3545-3568, 2020.
- [129] T. Đukić *et al.*, "Understanding the Crucial Significance of the Temperature and Potential Window on the Stability of Carbon Supported Pt-Alloy Nanoparticles as Oxygen Reduction Reaction Electrocatalysts," *ACS catalysis*, vol. 12, no. 1, pp. 101-115, 2021.
- [130] R. McDonald, C. Mittelsteadt, and E. L. Thompson, "Effects of Deep Temperature Cycling on Nafion (R) 112 Membranes and Membrane Electrode Assemblies," *Fuel Cells*, vol. 4, pp. 208-213, 08/01 2004.
- [131] J. Hou *et al.*, "Analysis of PEMFC freeze degradation at -20°C after gas purging," *Journal of Power Sources - J POWER SOURCES*, vol. 162, pp. 513-520, 11/01 2006.
- [132] J. Jia *et al.*, "Enhancing proton conductivity at subzero temperature through constructing the well-ordered structure based on carbon dots," *Journal of Membrane Science*, vol. 653, p. 120536, 04/01 2022.
- [133] J. Jia, K. Liu, T. Zuo, S. Hu, X. Wei, and Q. Che, "Researching proton conduction behavior at subzero temperature of lamellar anhydrous proton exchange membranes," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 294, p. 126969, 2023.
- [134] J. Sabawa and A. Bandarenka, "Investigation of degradation mechanisms in PEM fuel cells caused by low-temperature cycles," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, 03/01 2021.
- [135] Q. Guo and Z. Qi, "Effect of freeze-thaw cycles on the properties and performance of membrane-electrode assemblies," *Journal of Power Sources*, vol. 160, no. 2, pp. 1269-1274, 2006.
- [136] R. C. McDonald, C. K. Mittelsteadt, and E. L. Thompson, "Effects of Deep Temperature Cycling on Nafion® 112 Membranes and Membrane Electrode Assemblies," *Fuel Cells*, vol. 4, no. 3, pp. 208-213, 2004.
- [137] J. Hou *et al.*, "Analysis of PEMFC freeze degradation at -20°C after gas purging," *Journal of Power Sources*, vol. 162, no. 1, pp. 513-520, 2006/11/08/ 2006.
- [138] Q. Yan, H. Toghiani, Y.-W. Lee, K. Liang, and H. Causey, "Effect of sub-freezing temperatures on a PEM fuel cell performance, startup and fuel cell components," *Journal of Power Sources*, vol. 160, no. 2, pp. 1242-1250, 2006/10/06/ 2006.
- [139] G. Diloyan, M. Sobel, K. Das, and P. Hutapea, "Effect of mechanical vibration on platinum particle agglomeration and growth in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell catalyst layers," *Journal of Power Sources*, vol. 214, pp. 59-67, 2012/09/15/ 2012.
- [140] N. Rajalakshmi, S. Pandian, and K. S. Dhathathreyan, "Vibration tests on a PEM fuel cell stack usable in transportation application," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 9, pp. 3833-3837, 2009/05/01/ 2009.
- [141] R. Banan, A. Bazylak, and J. Zu, "Effect of mechanical vibrations on damage propagation in polymer electrolyte membrane fuel cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 34, pp. 14764-14772, 2013/11/13/ 2013.
- [142] R. Banan, A. Bazylak, and J. Zu, "Combined effects of environmental vibrations and hygrothermal fatigue on mechanical damage in PEM fuel cells," *International Journal of*

Hydrogen Energy, vol. 40, no. 4, pp. 1911-1922,
2015.

دهمین کنفرانس انرژی های تجدیدپذیر و تولید پراکنده ایران

10th

Iranian Conference on Renewable Energy & Distributed Generation



دانشگاه صنعتی شاهرود

گواهی ارائه مقاله

تاریخ ۱۴۰۱/۱۲/۲۵

بدین وسیله گواهی می شود مقاله با عنوان

تخریب پیل های سوختی پلیمری در خودروهای الکتریکی: روش های عیب یابی و پیشگیری

نویسنده / نویسندگان : الهه آبیلا - احسان زهرانی

در دهمین کنفرانس انرژی های تجدیدپذیر و تولید پراکنده در تاریخ ۲۴ و ۲۵ اسفند ۱۴۰۱ در دانشگاه صنعتی شاهرود به صورت سخنرانی ارائه گردید. بدین وسیله از تلاش صورت گرفته در ارسال و ارائه مقاله قدردانی نموده و موفقیت های علمی و پژوهشی را از خداوند متعال آرزو مندیم.



۰۱۲۲۰-۹۴۳۹۹



دکتر علی دستغان
دبیر اجرایی کنفرانس



دکتر مهدی باقری
دبیر علمی کنفرانس