



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی شیمی

بررسی آزمایشگاهی پارامترهای موثر بر عملکرد یک پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای به منظور تصفیه پساب لبنی در ساختار حلقوی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی

محمد مهدی مردان پور

اساتید راهنما

دکتر محسن نصر اصفهانی

دکتر طیبه بهزاد

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی شیمی

بررسی آزمایشگاهی پارامترهای موثر بر عملکرد یک پیل سوختی میکروبی تک‌محفظه‌ای به منظور تصفیه پساب لبنی در ساختار حلقوی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی

محمد مهدی مردان پور

اساتید راهنما

دکتر محسن نصر اصفهانی

دکتر طیبه بهزاد



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی شیمی

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی شیمی آقای محمد مهدی مردان‌پور
تحت عنوان

**بررسی آزمایشگاهی پارامترهای موثر بر عملکرد یک پیل سوختی میکروبی تک‌محفظه‌ای
به منظور تصفیه پساب لبنی در ساختار حلقوی**

در تاریخ ۹۰/۱۰/۲۶ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه دکتر محسن نصر اصفهانی

۲- استاد راهنمای پایان‌نامه دکتر طیبه بهزاد

۳- استاد داور دکتر علی اکبر دادخواه

۴- استاد داور دکتر حمید زیلویی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده دکتر حمید زیلویی

سپاس به پیشگاه حضرت دوست که هر چه هست از اوست.
سپاس فراوان از توجه، راهنمایی و تشویق استاد بزرگوارم، جناب آقای
دکتر محسن نصر اصفهانی. فرزانه‌ای که فراتر از اندیشه‌ها، اندیشیدن را به
من آموخت. بی شک آنچه اینجانب از مهندسی شیمی آموخته‌ام، حاصل
زحمات ایشان است و شاگردی ایشان همواره مایه مباهات اینجانب
خواهد بود.

سپاس از زحمات استاد عزیزم سرکار خانم دکتر طیبه بهزاد. بی شک تلاش
های بی دریغ ایشان در طول این پژوهش غیر قابل انکار است و سپاس
از وی در وصف نگنجد.

سپاس از همکاری سرکار خانم ندا موذنی، سرکار خانم مهندس فاطمه
نادری، و سرکار خانم مهندس فروغ شریفی که در طول این پژوهش
اینجانب را یاری نمودند.

سپاس از راهنمایی و تشویق دوستان و همکلاسی‌های عزیزم به ویژه
جناب آقای مهندس رسول رسولی، جناب آقای هادی نصر اصفهانی،
جناب آقای مهندس فراز میرچرخیان، جناب آقای مهندس حمید
پورضرغام، جناب آقای مهندس رامین صداقت‌وند، جناب آقای
مهندس روح اله صادقی، و جناب آقای مهندس امیر حسین فلاحي.
و سپاس از عزیزانی که از سراغماض رخصت بردن نامشان را به ما
ندادند که اگر حضورشان نبود، این پژوهش به اتمام نمی‌رسید.

محمد مهدی مردان پور

زمستان ۱۳۹۰

**کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع
این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی
اصفهان است.**

تقدیم به آنکه محبتش در خاطر من،

خاطرش در یاد من،

و یادش در قلم جاودانه است...

تقدیم به روان پدر بزرگ مهربان و دلسوز من،

جناب آقای عبدالمنان خان مردان پور

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب.....	هشت
فهرست شکل‌ها و نمودارها.....	یازده
فهرست جداول.....	چهارده
چکیده.....	۱
فصل اول: مقدمه	
پیشگفتار.....	۲
۱-۱ رشد جمعیت و تقاضای انرژی.....	۲
۲-۱ سوخت‌های فسیلی و چالش‌های کنونی.....	۴
۱-۲-۱ امنیت و ثبات منابع تأمین‌کننده انرژی.....	۴
۲-۲-۱ انرژی و چالش تغییر آب و هوای جهانی.....	۵
۳-۱ فناوری پیل‌های سوختی میکروبی.....	۷
۴-۱ پساب به عنوان چالشی زیست محیطی یا منبعی از انرژی.....	۹
۵-۱ کاربرد فناوری پیل‌های سوختی میکروبی در تصفیه پساب.....	۱۱
۶-۱ انواع پیل‌های سوختی میکروبی.....	۱۲
۷-۱ بررسی مکانیسم میکروبی موجود در پیل‌های سوختی میکروبی.....	۱۴
۱-۷-۱ عملکرد میکروارگانیسم‌ها به عنوان زیست کاتالیست.....	۱۴
۲-۷-۱ مکانیسم انتقال الکترون به خارج از سلول.....	۱۴
۳-۷-۱ گونه میکروارگانیسم‌های در پیل‌های سوختی میکروبی.....	۱۷
۸-۱ ارزیابی عملکرد پیل‌های سوختی میکروبی.....	۱۹
۱-۸-۱ بیشینه ولتاژها بر مبنای ترمودینامیکی.....	۱۹
۲-۸-۱ پتانسیل کاتدی پیل‌های سوختی میکروبی تک محفظه‌ای در شرایط استاندارد.....	۲۰
۳-۸-۱ تجزیه و تحلیل عملکرد پیل سوختی میکروبی به وسیله نمودار پلاریزاسیون.....	۲۱
۴-۸-۱ عوامل کاهش ولتاژ پیل سوختی میکروبی.....	۲۲
۹-۱ سایر کاربردهای فناوری پیل‌های سوختی میکروبی.....	۲۶
۱-۹-۱ پیل‌های سوختی میکروبی رسوبی.....	۲۶
۲-۹-۱ تولید هیدروژن با فناوری پیل‌های سوختی میکروبی.....	۲۶
فصل دوم: مروری بر پژوهش‌های پیشین	
پیشگفتار.....	۲۸
۱-۲ مروری بر ساختارهای گوناگون پیل‌های سوختی میکروبی تک محفظه‌ای.....	۲۹

۲-۲	مروری بر الکترودهای گوناگون به کار رفته در پیل های سوختی میکروبی	۳۴
۳-۲	مروری بر پژوهش های انجام شده در زمینه تصفیه پساب در پیل های سوختی میکروبی	۴۰
۴-۲	بررسی تصفیه پساب صنایع لبنی در پیل های سوختی میکروبی	۴۴

فصل سوم: سامانه آزمایشی، مواد، روش ها و نحوه محاسبات

۵۰	پیشگفتار	۵۰
۱-۳	مواد آزمایشی	۵۰
۲-۳	سامانه آزمایشی	۵۱
۱-۲-۳	ساختار بدنه پیل سوختی میکروبی	۵۱
۲-۲-۳	ساخت الکتروود کاتد پیل سوختی میکروبی	۵۴
۳-۲-۳	ساخت الکتروود آند پیل سوختی میکروبی	۵۶
۳-۳	ساختار پیل سوختی میکروبی تک محفظه ای حلقوی با آند حلزونی	۵۷
۴-۳	سامانه ثبت ولتاژ در طول زمان	۵۸
۵-۳	نحوه انجام آزمایش ها	۵۹
۱-۵-۳	غنی سازی میکروبی پیل سوختی میکروبی	۶۰
۲-۵-۳	اندازه گیری مشخصات پساب تصفیه شده	۶۰
۶-۳	نحوه انجام محاسبات	۶۱
۱-۶-۳	اندازه گیری جریان و توان	۶۱
۲-۶-۳	نمودار پلاریزاسیون و چگالی توان و اندازه گیری مقاومت درونی	۶۱
۳-۶-۳	محاسبه بازدهی عملیاتی پیل سوختی میکروبی	۶۱

فصل چهارم: نتایج و بحث

۱-۴	اندازه گیری ولتاژ مدار باز	۶۳
۲-۴	تأثیر مقاومت خارجی بر عملکرد پیل سوختی میکروبی حلقوی	۶۵
۳-۴	نمودار پلاریزاسیون و چگالی توان	۷۱
۴-۴	فرارفت توان و شدت جریان	۷۳
۵-۴	بررسی تأثیر سطح الکتروود بر عملکرد سامانه	۷۴
۶-۴	بررسی تأثیر غلظت پساب بر عملکرد سامانه	۷۶
۷-۴	بررسی کاهش کدورت پساب	۷۸
۸-۴	بررسی کاهش اکسیژن خواهی شیمیایی پساب لبنی	۷۹
۹-۴	محاسبه بازدهی عملیاتی پیل سوختی میکروبی با ساختار حلقوی و آند حلزونی شکل	۸۰
۱۰-۴	مقایسه عملکرد پیل سوختی میکروبی حلقوی با سایر پیل های سوختی	۸۲
۱۱-۴	ریخت شناسی زیست لایه تشکیل شده بر سطح آند حلزونی شکل	۸۵

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها

۱-۵	نتیجه گیری	۸۷
۲-۵	پیشنهادها	۹۰

فهرست شکل‌ها و نمودارها

- شکل ۱-۱: میزان مصرف انرژی‌های گوناگون تا سال ۲۰۳۰. ۳
- شکل ۲-۱: نمای اجزای بنیادی یک پیل سوختی میکروبی. محفظه‌های آند و کاتد توسط غشا از هم جدا شده‌اند. باکتری‌هایی که در محفظه آندی رشد می‌کنند، ماده آلی را اکسید می‌نمایند و الکترون‌ها را به سوی آند و پروتون‌ها را در محلول رها می‌سازند. ۸
- شکل ۳-۱: نمای پیل سوختی میکروبی دو محفظه‌ای [۵۶ و ۵۵]. ۱۲
- شکل ۴-۱: نمای پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای [۵۷]. ۱۳
- شکل ۵-۱: (A) انتقال الکترون از طریق غشای پیوند پروتئین (B) انتقال الکترون از طریق هادی‌های الکتریکی پیلوس (C) انتقال الکترون از طریق واسطه‌های خارجی [۴۷]. ۱۶
- شکل ۶-۱: نانو سیم‌های تولید شده توسط شوانلا که بر روی الکتروود در یک پیل سوختی میکروبی رشد نموده‌اند [۶۲]. ۱۷
- شکل ۷-۱: نمودار پلاریزاسیون و چگالی توان پیل‌های سوختی میکروبی [۵۶، ۷۴ و ۵۷]. ۲۱
- شکل ۸-۱: اتلاف‌های پتانسیل در طی انتقال الکترون در یک پیل سوختی میکروبی که شامل میکروارگانیزم در کاتد و آند است: (1) اتلاف‌های ناشی از محدودیت‌های انتقال جرم (2) اتلاف‌های ناشی از سینتیک متابولیسم باکتریایی (3) اتلاف‌های ناشی از انتقال الکترون به الکتروود یا از الکتروود (4) اتلاف‌های ناشی از مقاومت الکتروولیت، غشای تبادل یون و اتصال‌های مدار الکتریکی. این اتلاف‌ها باعث کاهش ولتاژ سلول از ولتاژ مدار باز به ولتاژ سلول می‌گردند [۴۷]. ۲۳
- شکل ۱-۲: پیل سوختی میکروبی هوا - کاتد که توسط لیو و لوگان طراحی گردید [۷۹]. ۲۹
- شکل ۲-۲: پیل سوختی میکروبی طراحی شده توسط لیو و همکارانش به منظور تصفیه پساب در حالت پیوسته [۵۱]. ۳۰
- شکل ۳-۲: اولین پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای در مقیاس نسبتاً بالا [۸۰]. ۳۱
- شکل ۴-۲: نمودار پلاریزاسیون اولین پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای در مقیاس نسبتاً بالا [۸۰]. ۳۱
- شکل ۵-۲: نمای پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای با به کارگیری گرانول گرافیت به عنوان آند [۸۱]. ۳۲
- شکل ۶-۲: نمودار تغییرات جریان بر حسب زمان در پیل سوختی میکروبی با بستر پر شده [۸۱]. ۳۲
- شکل ۷-۲: نمای ساختار پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای با قابلیت به کارگیری در مقیاس بالا [۸۳]. ۳۳
- شکل ۸-۲: تصاویر پویش میکروسکوپ الکترونی از زیست لایه تشکیل شده بر فیبر گرافیت و کربن پارچه‌ای [۹۵]. ۳۶
- شکل ۹-۲: نمودار چگالی توان و پلاریزاسیون پیل سوختی میکروبی با به کارگیری الکترودهای گوناگون کربن پارچه‌ای و فیبر گرافیت به عنوان کاتد و آند [۹۵]. ۳۷
- شکل ۱۰-۲: مقایسه هزینه ساخت کاتد با استفاده از کربن پارچه‌ای با توری استیل ضد زنگ و پوشش دهی با پودر کربن [۹۴]. ۳۹
- شکل ۱۱-۲: مقایسه اختلاف پتانسیل پیل سوختی میکروبی با کاتدهای گوناگون ساخته شده از کربن ۳۹

پارچه‌ای (CC)، کربن پارچه‌ای و غشای تبادل پروتون (CC+PEM) و توری استیل ضد زنگ با پوشش کربن و غشای تبادل پروتون (SSM+PEM) [۹۴].

- شکل ۲-۱۲: مورفولوژی زیست لایه تشکیل شده بر سطح کربن فعال و کربن پارچه‌ای [۸۳]. ۴۰
- شکل ۲-۱۳: تغییرات جریان الکتریکی با زمان در پیل‌های سوختی میکروبی با استفاده از پساب‌های گوناگون به عنوان سوسترا [۱۰۴]. ۴۱
- شکل ۲-۱۴: تغییرات جریان الکتریکی با زمان در پیل‌های سوختی میکروبی با به کار گیری پساب صنایع لبنی و صنایع کاغذ سازی به عنوان سوسترا [۱۰۴]. ۴۲
- شکل ۲-۱۵: تغییرات جریان بر حسب زمان پساب‌های گوناگون در دو شرایط دمایی ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد [۱۰۷]. ۴۳
- شکل ۲-۱۶: ساختار پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای با جریان پیوسته به منظور تصفیه پساب صنایع لبنی [۱۰۶]. ۴۵
- شکل ۲-۱۷: تغییرات ولتاژ مدار باز و جریان الکتریکی در مقاومت ۱۰۰ اهم بر حسب زمان [۱۰۶]. ۴۶
- شکل ۲-۱۸: نمودارهای چگالی توان و پلاریزاسیون پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای با میزان‌های بارگیری آلی متفاوت [۱۰۶]. ۴۷
- شکل ۳-۱: نقشه بدنه پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای که متشکل از سه قطعه به ضخامت ۱ سانتیمتر. ۵۲
- شکل ۳-۲: نقشه در پوش‌های بالایی و پایینی پیل سوختی میکروبی. ۵۳
- شکل ۳-۳: چیدمان پیل سوختی میکروبی حلقوی و جزئیات ابعاد آن. ۵۳
- شکل ۳-۴: ساختار کاتد پیشنهادی توسط چنگ و همکارانش [۱۲۳ و ۱۲۴]. ۵۴
- شکل ۳-۵: کربن پارچه‌ای پیش و پس از پوشش دهی لایه کاتالیست و غشا. ۵۶
- شکل ۳-۶: نمای پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای در ساختار حلقوی و با آند حلزونی شکل. ۵۷
- شکل ۳-۷: سامانه پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای با ساختار حلقوی و آند حلزونی. ۵۸
- شکل ۳-۸: دستگاه ثبات مورد استفاده در این پژوهش. ۵۹
- شکل ۴-۱: اندازه گیری ولتاژ مدار باز پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای با ساختار حلقوی و آند حلزونی شکل. ۶۴
- شکل ۴-۲: اختلاف پتانسیل ایجاد شده در مقاومت ۵۰۰ اهم. ۶۶
- شکل ۴-۳: (الف) توان و (ب) شدت جریان خروجی در مقاومت الکتریکی ۵۰۰ اهم. ۶۷
- شکل ۴-۴: نمودار اختلاف پتانسیل بر حسب زمان در طی چرخه‌های ناپیوسته گوناگون برگرفته از پژوهش لو و همکارانش [۹۷]. ۶۸
- شکل ۴-۵: نمودار تغییرات اختلاف پتانسیل حاصل از تجزیه فورفورال در پیل سوختی میکروبی هوا-کاتد [۱۳۰]. ۶۹
- شکل ۴-۶: (الف) شدت جریان و (ب) توان خروجی در مقاومت‌های ۱۰۰ اهم و ۲۰۰ اهم. ۷۰
- شکل ۴-۷: (الف) شدت جریان و (ب) توان خروجی پیل سوختی میکروبی حلقوی با آند حلزونی شکل در مقاومت ۵۰ اهم. ۷۰
- شکل ۴-۸: نمودار پلاریزاسیون پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای حلقوی با آند حلزونی شکل. ۷۲

- شکل ۴-۹: نمودار چگالی توان پیل سوختی میکروبی حلقوی با آند حلزونی شکل. ۷۳
- شکل ۴-۱۰: اختلاف پتانسیل مدار باز پیل سوختی میکروبی با سطح آند ۳۸×۲ سانتیمتر مربع. ۷۴
- شکل ۴-۱۱: شدت جریان خروجی از پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای حلقوی با سطح آند ۳۸×۲ سانتیمتر مربع. ۷۵
- شکل ۴-۱۲: مقایسه عملکرد پیل سوختی میکروبی حلقوی با دو سطح متفاوت از الکتروود آند. ۷۶
- شکل ۴-۱۳: تغییرات شدت جریان الکتریکی بر حسب زمان برای مقاومت ۱۰۰ اهم و با سطح ۲ در ۳۸ سانتیمتر مربع به عنوان سطح الکتروود آند در دو غلظت متفاوت. ۷۷
- شکل ۴-۱۴: تغییرات شدت جریان الکتریکی بر حسب زمان در دو چرخه خوراک با دو غلظت متفاوت. ۷۸
- شکل ۴-۱۵: کاهش کدورت پساب صنایع لبنی با بهره‌گیری از پیل سوختی میکروبی حلقوی و آند حلزونی شکل. ۷۹
- شکل ۴-۱۶: کاهش اکسیژن خواهی شیمیایی پساب لبنی با استفاده از پیل سوختی میکروبی حلقوی و اعمال مقاومت ۱۰۰ اهم. ۸۰
- شکل ۴-۱۷: تغییرات شدت جریان الکتریکی برای مقاومت ۱۰۰ اهم و سطح الکتروود آند ۲ در ۳۸ سانتیمتر. ۸۱
- شکل ۴-۱۸: مقایسه ولتاژ مدار باز پیل سوختی میکروبی حلقوی با آند حلزونی شکل با پیل سوختی میکروبی طراحی شده توسط موهان و همکارانش [۱۰۶]. ۸۳
- شکل ۴-۱۹: مقایسه شدت جریان خروجی در مقاومت ۱۰۰ اهم پیل سوختی میکروبی حلقوی با آند حلزونی شکل با پیل سوختی میکروبی طراحی شده توسط موهان و همکارانش [۱۰۶]. ۸۴
- شکل ۴-۲۰: تصاویر میکروسکوپ الکترونی پوششی از آند حلزونی شکل، (الف) توری استیل ضد زنگ پیش از رشد زیست لایه (ب) لایه گرافیت بر سطح توری استیل ضد زنگ (ج)، (د)، (ه) و (ز) زیست لایه تشکیل شده بر سطح توری استیل ضد زنگ با پوشش گرافیت در بزرگنمایی‌های گوناگون. ۸۶

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: تأثیر تغییرات غلظت پساب بر عملکرد پیل سوختی میکروبی در مطالعه لورنز و همکارانش [۸۱]. ۳۳
- جدول ۲-۲: تأثیر قرار دادن میله‌های گرافیتی بر عملکرد پیل سوختی میکروبی طراحی شده توسط جیانگ و لی [۸۳]. ۳۴
- جدول ۳-۲: تأثیر میزان گرانبول کربن فعال بر مقاومت داخلی و چگالی توان پیل سوختی میکروبی طراحی شده توسط جیانگ و لی [۸۳]. ۳۴
- جدول ۴-۲: مزایا و معایب الکترودهای پایه کربنی [۸۴]. ۳۴
- جدول ۵-۲: پژوهش‌های انجام با الکترودهای گوناگون پایه کربن و به کارگیری پساب‌های مختلف در پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای. ۳۸
- جدول ۶-۲: مشخصات پساب‌های گوناگون مورد استفاده در مطالعه شارما و ماچوریا [۱۰۷]. ۴۳
- جدول ۷-۲: مشخصات پساب صنایع لبنی [۱۱۱-۱۱۳]. ۴۴
- جدول ۸-۲: مقایسه عملکرد سامانه‌های گوناگون تصفیه پساب صنایع لبنی. ۴۸
- جدول ۹-۲: میزان تولید توان از پساب‌های صنایع لبنی و مواد مشابه در پیل‌های سوختی میکروبی گوناگون. ۴۸
- جدول ۱-۳: مشخصات پساب مورد استفاده در پیل سوختی میکروبی. ۶۰
- جدول ۱-۴: مقایسه عملکرد پیل سوختی میکروبی طراحی شده با سایر پیل‌های سوختی میکروبی. ۸۵

چکیده

این پژوهش ساختاری نوین از پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای را معرفی می‌کند. پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای با ساختار حلقوی و آند حلزونی شکل به منظور کاربردهای آتی فناوری پیل سوختی میکروبی در مقیاس بالا پیشنهاد می‌شود. در این مطالعه دو هدف اساسی مد نظر است. نخست آنکه توری استیل ضد زنگ با پوشش گرافیت به عنوان سطحی متخلخل برای رشد زیست لایه در ساختار پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای حلقوی طراحی و مشخصات آن بررسی می‌گردد. دوم آنکه تولید توان و مقاومت داخلی پیل سوختی میکروبی حلقوی با آند حلزونی شکل با سایر پیل های سوختی میکروبی هوا-کاتد مقایسه می‌شود تا کارایی این ساختار را بر عملکرد پیل سوختی میکروبی نشان دهد. پساب صنایع لبنی که حاوی ترکیبات آلی پیچیده است و در پیل های سوختی میکروبی متداول چگالی توان بسیار پایینی دارد، به عنوان سوبسترا به کار رفت. در این مطالعه بیشینه چگالی توان $20/2$ وات بر متر مکعب به دست آمد. عملکرد پیل سوختی میکروبی به عنوان مولد برق بر مبنای رفتار پلاریزاسیون و پتانسیل های پیل نشان داده شده است. همچنین، کاهش قابل ملاحظه در کدورت و اکسیژن خواهی شیمیایی پساب (به ترتیب $83/5\%$ و 91%) پس از تصفیه در پیل سوختی میکروبی مشاهده شد. تاثیر تغییر سطح تماس الکتروود و غلظت پساب لبنی مورد بررسی قرار گرفت. با کاهش سطح تماس الکتروود از 2×63 به 2×38 سانتیمتر مربع، شدت جریان خروجی حدود 34% کاهش یافت. همچنین، پیل سوختی میکروبی با سطح تماس کمتر آند فاز ایستای طولانی تری از پیل سوختی میکروبی با سطح بیشتر آند دارد و مدت زمان فاز ایستا از 23 ساعت به 67 ساعت افزایش یافت. هندسه آند و ساختار آن در پیل سوختی میکروبی حلقوی با آند حلزونی شکل، بر سطح ویژه و فاصله الکتروودها تاثیر می‌گذارد. سطح ویژه بالاتر و فاصله کمتر با کاتد، بازدهی پیل سوختی میکروبی را افزایش می‌دهد. واضح است که با کاهش سطح تماس آند، گسترش زیست لایه در مقیاس با سطح تماس بیشتر آند، کاهش می‌یابد. این امر موجب به تجزیه کمتر زیست لایه گردید. افزون بر آن با کاهش سطح تماس آند در هندسه حلزونی شکل، فاصله الکتروودها افزایش یافت که منجر به افزایش مقاومت درونی پیل گردید. با افزایش مقاومت درونی پیل شامل مقاومت خارجی و داخلی، مدت زمان فاز ایستا افزایش یافت. غلظت پساب یکی از مهمترین پارامترهای عملکرد پیل های سوختی میکروبی است. با کاهش اکسیژن خواهی شیمیایی پساب لبنی پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای حلقوی از 1000 به 500 میلی گرم بر لیتر، بیشینه شدت جریان خروجی از $1/89$ به $1/2$ میلی آمپر کاهش یافت. همچنین، پیل سوختی میکروبی که پساب داده شده به آن با اکسیژن خواهی شیمیایی 500 میلی گرم بر لیتر بود، فاز نزولی با مدت زمان کوتاه‌تری از پساب با اکسیژن خواهی شیمیایی بیشتر داشت. افزون بر آن شدت جریان خروجی پیل سوختی میکروبی با پساب لبنی با اکسیژن خواهی شیمیایی کمتر، پس از 49 ساعت به $1/17$ میلی آمپر رسید در حالی که مدت زمان کاهش شدت جریان برای پیل سوختی میکروبی با اکسیژن خواهی شیمیایی بالاتر بیش از 72 ساعت بود. با کاهش غلظت پساب لبنی، شدت جریان خروجی به علت کاهش محتوی آلی در آنولیت، کاهش می‌یابد. تصاویر پویش میکروسکوپ الکترونی از توری استیل ضد زنگ با پوشش گرافیت پیش و پس از تشکیل زیست لایه، چسبندگی مناسب باکتری‌ها بر سطح حلزونی آند را نشان می‌داد. به علت سطح تماس بالا، مقدار زیادی از زیست توده به سطح اصلاح شده توری استیل ضد زنگ چسبیده بودند. از این رو، تخلخل آند می‌تواند مکان مناسبی برای تشکیل زیست لایه باشد. مورفولوژی زیست لایه یکنواخت بود که تولید و انتقال الکترون‌ها را آسان نمود.

کلمات کلیدی: پیل سوختی میکروبی تک محفظه‌ای، پارامترهای موثر، ساختار حلقوی، آند حلزونی شکل، پساب لبنی.

فصل اول

مقدمه

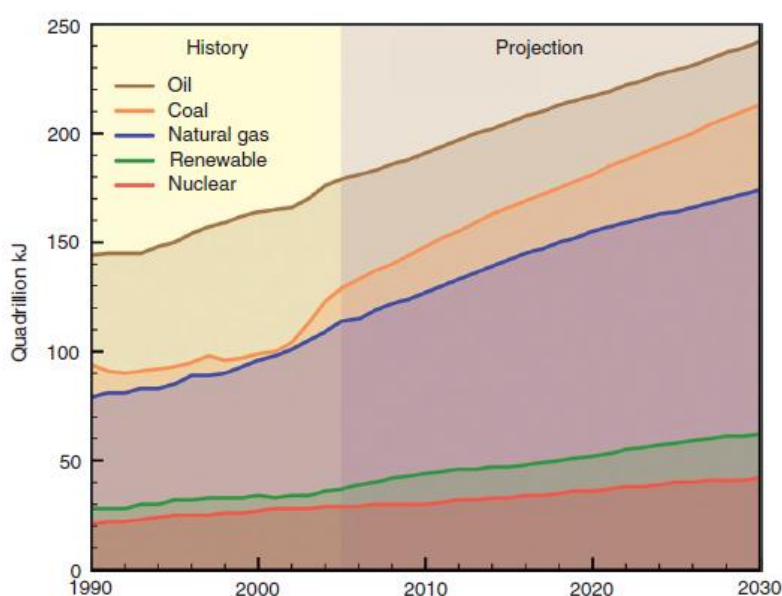
پیشگفتار

افزایش نیاز برای انرژی بیشتر، نیازمند رشد گسترده در تولید انرژی‌های مطمئن از منابع متنوع است که استراتژی موفقی را برای مهار تقاضا در پی داشته باشد. توسعه پایدار نیازمند منابع تأمین کننده انرژی است که پیوسته با هزینه‌های منطقی و قابل رقابت با سایر منابع انرژی و کم‌ترین تأثیرات منفی موجود باشد. در این فصل ابتدا چالش‌های اصلی انرژی بیان می‌گردد و سپس فناوری پیل سوختی میکروبی به عنوان راهکاری جهت مقابله با این چالش‌ها پیشنهاد می‌شود. در پایان کاربردهای مهم این فناوری نوین ارائه می‌گردد.

۱-۱ رشد جمعیت و تقاضای انرژی

در حال حاضر، جمعیت جهان بیش از ۶ میلیارد نفر است و تا سال ۲۰۵۰ جمعیت حدود ۹/۴ میلیارد نفر تخمین زده می‌شود [۱]. سوخت‌های فسیلی، موجب صنعتی سازی و رشد اقتصادی کشورها شده است اما واضح است که این منابع انرژی نمی‌توانند به طور نامحدود اقتصاد جهانی را پوشش دهند. نفت به طور قابل ملاحظه‌ای در حداقل یک‌صد سال یا بیشتر به اتمام نخواهد رسید اما پیش بینی می‌شود که تقاضا برای نفت منجر به ارتقا تولید از

ذخایر شناخته شده در طی ۱۰ تا ۲۹ سال آینده یا به عبارتی از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ می‌گردد. هزینه انرژی و مقدار انرژی مصرفی جهان، اقتصاد و ساختار زندگی جهان را در دهه‌های آتی تحت تأثیر قرار خواهد داد. یک تخمین از رشد جمعیت، همراه با تخمین رشد اقتصادی در سطح فعلی، تقاضای جهانی انرژی را در سال ۲۰۵۰، با رشد کنونی انرژی ۴۱ تراوات^۱ مطرح می‌کند. با این حال، ملاحظه روند انرژی مورد انتظار، یک طرح ریزی منطقی ۲۷ تراوات برای سال ۲۰۵۰ و برای سال ۲۱۰۰، ۴۳ تراوات می‌باشد [۱]. میزان مصرف انرژی‌های گوناگون تا سال ۲۰۳۰ در شکل ۱-۱ نشان داده شده است [۲]:



شکل ۱-۱- میزان مصرف انرژی‌های گوناگون تا سال ۲۰۳۰ [۲].

بحران انرژی وضعیتی است که دولت‌ها از آن به دلیل فروپاشی منابع تأمین کننده انرژی و رشد سریع قیمت انرژی که تهدید اقتصادی و امنیتی را در پی دارد رنج می‌برند. بحران‌های انرژی در سال‌های ۱۹۷۳ و ۱۹۸۰-۱۹۷۹، افزایش قیمت نفت و همچنین تحت‌الشعاع قرار گرفتن آن در نتیجه مسائل سیاسی عواملی است که انسان را به سمت یافتن انرژی‌های جایگزین هدایت می‌کند [۳-۵]. نیاز به انرژی در جهان در سال ۲۰۵۰، ۱/۵ تا ۳ برابر مقدار کنونی افزایش خواهد یافت [۶].

¹ Tera Watt

۲-۱ سوخت‌های فسیلی و چالش‌های کنونی

انرژی جهان بر پایه سوخت‌های کربنی شامل نفت، گاز و زغال سنگ می‌باشد، به طوری که ۸۸٪ مصرف عمده انرژی زمین را تشکیل می‌دهند [۷]. تنفس به عنوان مهم‌ترین عامل حیات تعریف می‌شود که قطع آن برای چند دقیقه موجب مرگ می‌گردد. با استفاده از این قیاس به صراحت می‌توان بیان کرد که سوخت‌های کربنی نقش تنفس را برای ادامه حیات جهان ایفا می‌کند [۸]. با قطع ذخایر نفت و گاز، پایه‌های بزرگ اقتصادی جهان در هم می‌شکند و با شکستن چنین پایه‌هایی سایر مشکلات سیاسی، اجتماعی، امنیتی و ... تحت‌الشعاع قرار خواهد گرفت. گذشت زمان و رشد جوامع، سیستم انرژی جهان را با چالش‌های گوناگونی رو به رو ساخته است که این چالش‌ها، کشورها را در یافتن راه حلی برای تغییر سیستم انرژی جهان از سوخت‌های پایه کربنی به سوخت‌های غیر پایه کربنی ترغیب می‌کند. در چند دهه آینده دو چالش اصلی رو درروی سیستم انرژی جهان خواهد بود، که یکی امنیت و ثبات منابع انرژی و دیگری نگرانی‌های زیست محیطی حاصل از سوخت‌های فسیلی می‌باشد [۹ و ۱۰].

۱-۲-۱ امنیت و ثبات منابع تأمین کننده انرژی

امنیت ذخایر انرژی به عنوان یکی از علت‌های مداخله سیاسی دولت‌ها در سرتاسر جهان شناخته می‌شود. توسعه جغرافیای سیاسی در مناطقی از جهان موجب پیشروی چشمگیری در این تمایل شده است. وابستگی رایج به کشورهای محدود تأمین کننده نفت از مناطق سیاسی ناپایدار و بیان عکس‌العمل به اختلالات بالقوه ذخایر، موجب ادامه یافتن چالش‌های سیاسی شده است [۱۱-۱۳]. این چالش‌ها در کشورهایی که رشد تقاضای انرژی در آن‌ها مشاهده می‌شود رو به افزایش است [۱۴-۱۶]. تقاضای مازاد از ذخایر انرژی زمین، و افزایش جمعیت، فعالیت‌های اقتصادی را در تهدیدی بالقوه برای تأمین انرژی قرار خواهد داد و در نهایت منجر به تخلیه ذخایر نفت و گاز خواهد شد. با بهبود پایداری تجاری ذخایر محدود اقتصادی، تحریک برای جستجوی منابع بیشتر، ترویج فناوری خلاق و تشویق صرفه جویی این امر به صورت فرآیندی تدریجی نسبت به پایان غیر قابل پیش بینی ذخایر ظهور خواهد کرد [۱۰].

با رشد کنونی اقتصاد جهان، تقاضای نفت از ۸۰ میلیون بشکه در روز به ۱۲۰ میلیون بشکه در روز در سال ۲۰۳۰ یعنی بیش از ۱/۵ برابر حال حاضر افزایش خواهد یافت. پیوند بحرانی ما بین انرژی، رشد اقتصادی و اشتغال بسیاری از کشورها را برای یافتن منابع قابل اطمینان و ایمن انرژی هدایت می‌کند. دولت‌ها با افزودن امنیت انرژی خود توسط منابع قابل اطمینان انرژی در هزینه‌های منطقی، اقتصاد و صنعت داخلی را حمایت می‌نمایند. نگرانی‌های

موجود در امنیت انرژی در برخی از کشورها منجر به سرمایه گذاری غیر اقتصادی و خطر پذیر به منظور دسترسی به انرژی شده است. جستجو برای منابع جدید انرژی رقابت جغرافیایی سیاسی بین منابع را در پی دارد [۷].

در دهه های آینده عطش انرژی در کشورهای در حال توسعه به منظور بالا رفتن سطح استاندارد زندگی و رشد اقتصادی افزایش خواهد یافت. کشورهای در حال توسعه از هر شکلی از انرژی برای ایجاد رشد اقتصادی استفاده می کنند حتی اگر بهره گیری از انرژی مستلزم آلودگی منطقه ای باشد. انرژی الکتریسیته اساس جوامع پیشرفته است بر طبق گزارش آژانس بین المللی انرژی^۲، بیش از ۱/۶ میلیارد نفر از مردم جهان بدون انرژی الکتریسیته، چشم اندازهای اقتصادی، امکانات مناسب پزشکی و ارتباطات می باشند. انتظار می رود در سال ۲۰۳۰ این رقم به ۸ میلیارد نفر برسد [۱۵ و ۷].

۲-۲-۱ انرژی و چالش تغییر آب و هوای جهانی

همان طور که گفته شد، در حال حاضر اقتصاد جهان را سوخت های فسیلی تشکیل داده است. ۸۲٪ از سوخت های فسیلی در مصارفی مورد استفاده قرار می گیرد که مستلزم فرآیندهای احتراق است و متعاقباً انتشار دی اکسید کربن به اتمسفر (معادل ۷ گیگا تن کربن در سال) را در پی دارد. انتظار می رود که انتشار دی اکسید کربن در سال ۲۰۵۰ به ۱۴ گیگا تن کربن برسد [۱۷ و ۱۸]. در سال ۲۱۰۰، تخمین زده می شود که غلظت دی اکسید کربن از ۵۴۰ ppmv به ۹۷۰ ppmv خواهد رسید. بدون تغییرات اساسی در روش های تولید انرژی، غلظت دی اکسید کربن در اتمسفر از مقدار کنونی بسیار تجاوز خواهد کرد. تجمع دی اکسید کربن تا ۵۰۰ سال دیگر دوام خواهد آورد. در واقع عامل کلیدی که در بلند مدت لازم است به طور اساسی مورد توجه قرار گیرد، کاهش انتشار گازهای گلخانه ای است [۱۹].

هم زمان با صنعتی شدن کشورهای غربی، افزایش مصرف سوخت های فسیلی منجر به تغییرات آب و هوایی زمین شده است [۲۰-۲۲]. سوخت های فسیلی و محصولات حاصل از احتراق آنها به عنوان عامل اصلی تخریب محیط زیست تعریف می شود. فناوری سوخت های فسیلی شامل استخراج، انتقال و استفاده نهایی به خصوص فرآیند احتراق تأثیراتی ناخوشایند بر محیط زیست داشته که به صورت مستقیم یا غیر مستقیم اقتصاد را هم تحت تأثیر قرار می دهد [۱۷]. احتراق سوخت های فسیلی با تولید گازهای متنوع (CO_x , SO_x , NO_x)، دوده، خاکستر، ذرات قیر و سایر ترکیبات آلی و آزاد شدن آنها در اتمسفر، موجب آلودگی هوا می گردند [۲۳ و ۲۴]. آلودگی هوا بسته به

² International Energy Agency (IEA)

میزان برخی گازها که سازنده طبیعی در اتمسفر ندارند یا سازنده‌های طبیعی آن‌ها در غلظت غیرعادی موجود هستند، تعریف می‌شود [۱۷].

مرگ نابهنگام مؤثرترین تأثیر آلودگی هوا بر روی انسان است. هزینه‌های درمان برای بیماری‌های مهلک دستگاه‌های تنفسی و سایر بیماری‌های غیر مهلک، تحریک چشم و پوست و همچنین سرطان پوست حداقل ۱۰-۱۲٪ کل هزینه‌های درمانی را تشکیل داده که تنها در آمریکا ۴۴/۶ میلیارد دلار است [۲۵ و ۲۶]. آلودگی داخلی ناشی از سوزاندن چوب، کاه یا کود تأثیرات منفی بر روی ۴۰۰ تا ۷۰۰ میلیون نفر داشته و سالانه موجب مرگ ۴ میلیون کودک می‌گردد. خسارت‌های ناشی از آلودگی هوا بر روی مزارع پرورش دام، ۷ میلیارد دلار تقریب زده می‌شود که معادل ۱۰٪ در آمد ناخالص مزارع است [۲۷]. به طور تقریبی، تا سال ۲۰۵۰ یک میلیون گونه از حیوانات منقرض شده یا در حال انقراض خواهند بود. ۲۴ گونه از پرندگان در شمال شرقی آمریکا به علت تأثیر باران‌های اسیدی بر روی ذخیره غذایی در معرض خطر هستند. نیاز برای انتقال نفت با خطر نشت آن در ارتباط است این عامل تأثیر مهمی بر روی سواحل و اکوسیستم آبی خواهد داشت. سالانه حدود ۶۰ تانکر سوخت متحمل سانحه می‌شوند که منجر به نشت ۲۸۰ هزار تن از نفت در آب‌های آمریکا می‌شود [۲۸].

بارندگی‌های اسیدی به عنوان عامل اسیدی کردن بسیاری از اکوسیستم‌های آبی در شمال شرقی آمریکا، کانادا، نروژ، سوئد و انگلستان گزارش شده است. در ایالات متحده بیش از ۲۰۰ دریاچه به علت باران‌های اسیدی فاقد آبزیان می‌باشند [۲۹-۳۱]. در شرق ایالات متحده خسارت ناشی از باران‌های اسیدی سالانه ۷ میلیارد دلار تخمین زده می‌شود. به طور تقریبی، ۱۴ هزار دریاچه در کانادا به علت باران‌های اسیدی از لحاظ زیست محیطی مرده به شمار می‌آیند. در سوئد ۴۰۰۰ دریاچه فاقد ماهی بوده و خساراتی را بر صیادان تحمیل کرده‌اند. این رقم در جنوب نروژ به ۱۷۵۰ دریاچه می‌رسد [۳۰ و ۳۲]. در سال ۲۰۰۴، مجموع خسارت ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی ۷۱۷۶ میلیارد دلار بود که معادل ۱۰٪ تولید ناخالص جهان است [۳۳ و ۳۴].

با تجمع دی اکسید کربن و سایر گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر دمای سطح زمین افزایش می‌یابد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که دمای سطح زمین بین ۰/۵ تا ۰/۷ درجه سانتی‌گراد از سال ۱۸۶۰ افزایش یافته است. اگر درصد رشد گازهای گلخانه‌ای همچنان ادامه یابد، در سال ۲۰۳۰ دمای کره زمین حداقل ۳ درجه سانتی‌گراد و شاید تا ۶ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد [۳۵]. چنین افزایشی در دمای سطح زمین موجب تغییرات آب و هوایی و بالا آمدن سطح آب می‌گردد. گرم شدن کره زمین منجر به تحولات ناگهانی آب و هوایی مانند موج‌های گرم، خشکسالی، سیل، طوفان و... می‌شود. انبساط آب اقیانوس‌های جهان، ذوب توده‌های یخ‌های در کوهستان و قطب‌ها، آزاد شدن حجم وسیع از آب را به همراه دارد. تقریباً سطح آب دریاها بین ۲۶ تا ۳۹ سانتیمتر در سال ۲۰۵۰ و ۹۱ تا ۱۳۶