

پیل سوختی غشا پلیمری

لیف:

دکتر ابراهیم افشاری

(استادیار گروه مهندسی میکرو و نانو دانشگاه اصفهان)

دکتر یاسر ملائی بوزنی

مهندس حسین فریدانی

دانشگاه اصفهان

۱۳۹۲

سرشناسه	: افشاری، ابراهیم، ۱۳۵۶ -
عنوان و نام پدیدآور	: پیل سوختی غشا پلیمری / تألیف ابراهیم افشاری، یاسر ملایی برزی، حسین فرزانه.
مشخصات نشر	: اصفهان: دانشگاه اصفهان، ۱۳۹۲.
مشخصات ظاهری	: ۵۰۵ ص: مصور، جدول، نمودار.
فروست	: انتشارات دانشگاه اصفهان؛ ۵۹۴.
شابک	: ۹۷۸-۶۰۰-۱۱۰-۰۵۶-۷
نوعیت فهرست نویسی	: فپا
یادداشت	: واژه نامه.
یادداشت	: کتابنامه.
موضوع	: پیل های سوختی
موضوع	: پلی الکترولیت ها
شناسه افزوده	: ملایی برزی، یاسر، ۱۳۵۸ -
شناسه افزوده	: فرزانه حسین، ۱۳۶۷ -
شناسه افزوده	: دانشگاه اصفهان
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۲ ۶۹۰ الف TK۲۹۲
رده بندی دیویی	: ۶۲۱/۳ ۴۲۹
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۱۳۸۶۵۳



انتشارات دانشگاه اصفهان

تألیف: دکتر ابراهیم افشاری، دکتر یاسر ملایی برزی، مهندس حسین فرزانه

ناشر: دانشگاه اصفهان

نوبت چاپ: چاپ اول - بهار ۱۳۹۲

شمارگان: ۱۰۰۰ جلد

چاپ و صحافی: چاپخانه دانشگاه اصفهان

بهاء: ۱۶۰/۰۰۰ ریال

کلیه حقوق نشر برای ناشر محفوظ است

مراکز فروش کتاب:

اصفهان: میدان آزادی - خیابان دانشگاه - فروشگاه کتاب دانشگاه اصفهان

تلفن: ۷۹۳۲۱۷۷-۰۲۱۱ پُست الکترونیکی: entesharat@ui.ac.ir

تهران: میدان انقلاب - خیابان نصرت - خیابان دکتر قریب، نرسیده به خیابان فرصت - پلاک ۱۱

مؤسسه کتاببران، مرکز پخش کتاب های دانشگاهی - تلفن: ۱۵-۶۶۵۶۶۵۱۰ - ۰۲۱

فهرست مطالب

یباچ ♦ نویسندگان ک

فصل ۱: اصول پیل سوختی

۱-۱	مقدمه	۱
۲-۱	پیل سوختی چیست؟	۲
۳-۱	یک پیل سوختی ساده	۴
۴-۱	تاریخچه پیل سوختی	۶
۵-۱	مزایای پیل سوختی	۱۰
۶-۱	معایب پیل سوختی	۱۱
۷-۱	کاربردهای پیل سوختی	۱۳
۱-۷-۱	کاربرد در وسایل حمل و نقل	۱۴
۲-۷-۱	کاربرد در وسایل تولید توان قابل حمل	۲۰
۳-۷-۱	کاربرد در وسایل تولید توان ساکن	۲۰
۸-۱	روند توسعه پیل سوختی	۲۴
۹-۱	اصول کار پیل سوختی	۲۵
۱۰-۱	عملکرد پیل سوختی	۲۹
۱۱-۱	سوالات و مسائل	۳۲
۳۳	مراجع	

فصل ۲: ترمودینامیک پیل سوختی

۱-۲	مقدمه	۳۵
۲-۲	ترمودینامیک	۳۶
۱-۲-۲	قانون اول ترمودینامیک	۳۶
۲-۲-۲	قانون دوم ترمودینامیک	۳۸

۳۹	۳-۲-۲ اصل افزایش انتروپی
۴۰	۴-۲-۲ موتورهای حرارتی و چرخه کارنو
۴۳	۵-۲-۲ اگزرژی و اصل کاهش آن
۴۸	۳-۲ راندمان‌های تبدیل انرژی در موتورهای حرارتی و پیل‌های سوختی
۴۸	۱-۳-۲ راندمان‌های حرارتی ماکزیمم
۵۳	۲-۳-۲ راندمان قانون دوم
۵۳	۴-۱ واکنش‌های شیمیایی
۵۵	۵-۱ حالت استاندارد
۵۵	۶-۲ ترمودینامیک شیمیایی
۵۶	۱-۲-۲ مقیاس انرژی و تنش خود به خودی
۵۷	۲-۶-۲ اثر دما و فشار بر روی تغییرات گیبس
۵۸	۲-۶-۲ تعادل و مختلط گازی
۵۹	۴-۶-۲ کار ماکزیمم
۵۹	۵-۶-۲ معادله نرنست و حالت استاندارد
۶۱	۷-۲ تغییرات ولتاژ بازگشت پذیر با تغییر دما
۶۲	۸-۲ تغییرات ولتاژ بازگشت پذیر با تغییر فشار
۶۲	۹-۲ تغییرات ولتاژ بازگشت پذیر با تغییر پتانسیل: روشی دیگر برای استخراج معادله نرنست
۶۳	نرنست
۶۶	۱۰-۲ راندمان واقعی پیل سوختی
۶۹	۱۱-۲ سوالات و مسائل
۷۰	مراجع

فصل ۳: سینتیک واکنش‌های پیل سوختی

۷۱	۱-۳ مقدمه
۷۲	۲-۳ مقدمه‌ای بر سینتیک الکتروکاتود
۷۳	۱-۲-۳ واکنش‌های الکتروشیمیایی از واکنش‌های شیمیایی متفاوت است
۷۲	۲-۲-۳ فرایندهای الکتروشیمیایی ناهمگن هستند
۷۳	۳-۲-۳ جریان یک نرخ است
۷۳	۴-۲-۳ شارژ یک کمیت مقداری است

۷۴	۵-۲-۳ دانسیته جریان، بیانی اساسی تر از جریان است.
۷۵	۶-۲-۳ پتانسیل، انرژی الکترون را کنترل می کند.
۷۶	۷-۲-۳ نرخ واکنش ها محدود است.
۷۶	۳-۳ چرا واکنش های انتقال شارژ، انرژی فعال سازی دارند؟
۷۹	۴-۳ انرژی اکتیواسیون نرخ واکنش را تعیین می کند.
۸۰	۵-۳ محاسبه نرخ خالص یک واکنش
۸۱	۶-۳ نرخ واکنش در تعادل: دانسیته جریان تبادل
۸۱	۷- پتانسیل یک واکنش در تعادل: پتانسیل گالوانی
۸۴	۸-۳ پتانسیل نرخ: ماده ولرم - باتلر
۸۵	۹-۳ نمونه عملیات سینتیکی را بهبود بخشیم؟
۸۵	۱-۳ افزایش نرخ واکنشگر
۸۶	۲-۹-۳ سده فعال سازی
۸۷	۳-۹-۳ افزایش
۸۷	۴-۹-۳ افزایش سطح واکنش
۸۷	۱۰-۳ ساده سازی سینتیک اکتیواسیون ماده تافل
۸۹	۱۱-۳ سوالات و مسائل
۹۱	مراجع

فصل ۴: مروری بر انواع پیل های سوختی

۹۳	۱-۴ مقدمه
۹۴	۲-۴ پیل سوختی اسید فسفریک
۹۶	۳-۴ پیل سوختی آلکالین
۹۹	۴-۴ پیل سوختی کربنات مذاب
۱۰۱	۵-۴ پیل سوختی اکسید جامد
۱۰۴	۶-۴ پیل سوختی غشا پلیمری
۱۰۴	۷-۴ سوالات و مسائل
۱۰۹	مراجع

فصل ۵: پیل سوختی غشا پلیمری: اجزا و کاربرد

۱-۵	مقدمه	۱۱۱
۲-۵	اجزاء پیل	۱۱۲
۱-۲-۵	غشا	۱۱۴
۲-۲-۵	لایه کاتالیست	۱۱۸
۳-۲-۵	لایه پخش گاز متخلخل (GDL)	۱۲۱
۴-۲-۵	صفحات جمع کننده جریان	۱۲۸
۵-۲-۵	کانال‌های جریان گاز	۱۳۱
۴-۲-۵	کانال‌های خنک‌کاری	۱۳۳
۳-۵	پیل الکترولیت غشا	۱۳۴
۴-۵	توده پیل سوختی	۱۳۴
۵-۵	سوالات و مسائل	۱۳۵
۱۳۷	مراجع	

فصل ۶: شرایط عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری

۱-۶	فشار عملکرد	۱۳۹
۲-۶	دمای عملکرد	۱۴۰
۳-۶	نرخ جریان واکنشگرها	۱۴۱
۴-۶	رطوبت واکنشگرها	۱۴۸
۵-۶	بالانس جرم پیل سوختی	۱۵۸
۱-۵-۶	نرخ جریان‌های ورودی	۱۵۸
۲-۵-۶	نرخ جریان‌های خروجی	۱۶۰
۶-۶	بالانس انرژی در پیل سوختی	۱۶۲
۷-۶	سوالات و مسائل	۱۶۸
۱۷۰	مراجع	

فصل ۷: طراحی توده پیل سوختی

۱-۷	مقدمه	۱۷۱
۲-۷	تخمین اندازه توده پیل سوختی	۱۷۳

۱۷۷	۳-۷ ساختار توده پیل سوختی
۱۸۲	۴-۷ توزیع یکنواخت گازهای واکنشگر به هر پیل
۱۸۸	۵-۷ توزیع یکنواخت گازهای واکنشگر داخل هر پیل
۱۸۸	۱-۵-۷ شکل فلوفیلد
۱۸۹	۲-۵-۷ جهت گیری فلوفیلد
۱۹۱	۳-۵-۷ آرایش کانال ها
۱۹۳	۴-۵-۷ شکل کانال ها، ابعاد و فواصل
۱۹۷	۵-۵-۷ افت فشار در فلوفیلد
۲۰۴	۶-۷ گرما برداشتی از توده پیل سوختی
۲۰۸	۱-۶-۷ خنک کاری توسط یک سیال، بدون تغییر فاز
۲۱۲	۲-۶-۷ سیستم اجزا آن
۲۱۷	۳-۶-۷ ساختار کانال های خنک کننده
۲۱۸	۴-۶-۷ شکل کانال
۲۳۷	۱-۶-۷ آرایش کانال های جریان و کانال های خنک کاری
۲۳۹	۲-۶-۷ بالانس حرارت توده پیل
۲۴۰	۳-۶-۷ هدایت حرارتی
۲۴۶	۴-۶-۷ خارج شدن (دفع) گرمای فعال
۲۵۰	۵-۶-۷ پخش گرما از توده پیل به وسیله جابجایی طبیعی و تشعشع
۲۵۳	۶-۶-۷ انتخاب سیال خنک کاری
۲۵۸	۷-۷ سوالات و مسائل
۲۶۰	مراجع

فصل ۸: مدل سازی پیل سوختی غشا پلیمری

۲۶۳	۱-۸ مقدمه
۲۶۴	۲-۸ تئوری و معادلات حاکم
۲۶۷	۱-۲-۸ قانون بقا جرم
۲۶۶	۲-۲-۸ قانون بقا ممنت
۲۶۸	۳-۲-۸ قانون بقا انرژی
۲۷۱	۴-۲-۸ قانون بقا اجزا

۲۷۳	۸-۲-۵ قانون بقا پتانسیل
۲۷۵	۸-۳-۳ دامنه مدل سازی
۲۷۷	۸-۴-۴ مثال هایی از مدل سازی پیل سوختی غشا پلیمری
۲۷۸	۸-۴-۱ مدل یک بعدی برناردی و وربروگ
۲۸۵	۸-۴-۲ مدل یک بعدی لایه کاتالیست یو - لیو
۲۸۷	۸-۴-۳ مدل رو - لی
۳۰۹	۸-۴-۴ مدل دو بعدی جانگ و همکارانش
۳۱۲	۸-۴-۵ مدل دو بعدی گورودر طول کانال
۳۲۰	۸-۴-۶ مدل های دو بعدی و دو فاز
۳۲۰	۸-۴-۶-۱ تئوری جریان غیر اشباع
۳۲۳	۸-۴-۱۲ مدل مخلوط چند فاز (M^2)
۳۳۳	۸-۵ سوالات و تمرینات
۳۳۴	مراجع

فصل ۹: طراحی سیستم پیل سوختی

۳۳۷	۹-۱ مقدمه
۳۳۹	۹-۲ سیستم های اکسیژن - هیدروژن
۳۴۰	۹-۲-۱ تامین اکسیژن
۳۴۳	۹-۲-۲ تامین هیدروژن
۳۴۶	۹-۳ زیر سیستم مدیریت حرارت و آب
۳۴۸	۹-۴ سیستم های هوا - هیدروژن
۳۴۹	۹-۴-۱ تامین هوا
۳۵۳	۹-۴-۲ تامین هوای غیر فعال
۳۵۴	۹-۴-۳ تامین هیدروژن
۳۵۵	۹-۴-۴ روش های مرطوب سازی
۳۵۷	۹-۴-۵ مدیریت آب و حرارت - یکپارچه کردن سیستم
۳۶۰	۹-۵ سیستم های پردازش و تحویل سوخت
۳۶۲	۹-۵-۱ اکسیداسیون مستقیم حامل هیدروژن در پیل سوختی
۳۶۲	۹-۵-۲ تبدیل حامل های هیدروژن به هیدروژن در داخل پیل سوختی

۳۶۳	۳-۵-۹ تبدیل حامل هیدروژن به هیدروژن در خارج از پیل سوختی
۳۶۳	۶-۹ زیر سیستم الکترونیکی توان
۳۶۴	۱-۶-۹ تنظیم توان
۳۶۵	۲-۶-۹ معکوس کردن توان
۳۶۵	۳-۶-۹ سیستم کنترل و مانیتورینگ
۳۶۶	۴-۶-۹ مدیریت تأمین توان
۳۶۷	۷-۹ سوالات و مسائل
۳۶۸	تراجع

فصل ۱: مفاهیم پایه‌ای سوخت هیدروژن

۳۷۱	۱-۱۰
۳۷۳	۲-۱۰ خواص سوختی
۳۷۶	۳-۱۰ خواص شیمیایی
۳۷۸	۴-۱۰ خواص سوخت
۳۷۹	۱-۴-۱۰ ظرفیت انرژی
۳۷۹	۲-۴-۱۰ ویژگی‌های احتراق
۳۸۰	۱-۲-۴-۱۰ محدوده اشتعال پذیری
۳۸۱	۲-۲-۴-۱۰ انرژی اشتعال پایین
۳۸۱	۳-۲-۴-۱۰ مسافت کوئچینگ
۳۸۱	۴-۲-۴-۱۰ دمای خود اشتعالی
۳۸۲	۵-۲-۴-۱۰ سرعت شعله
۳۸۲	۶-۲-۴-۱۰ نرخ کندی هیدروژن
۳۸۱	۷-۲-۴-۱۰ نشت هیدروژن
۳۸۳	۸-۲-۴-۱۰ نسبت هوا به سوخت
۳۸۳	۵-۱۰ موتور احتراق داخلی هیدروژنی
۳۸۴	۶-۱۰ تأمین هیدروژن
۳۸۶	۱-۶-۱۰ هزینه تولید هیدروژن
۳۹۰	۲-۶-۱۰ جنبه‌های زیست محیطی
۳۹۱	۳-۶-۱۰ ذخیره سازی هیدروژن

۳۹۲	۱-۳-۶-۱۰ هیدروژن فشرده
۳۹۲	۲-۳-۶-۱۰ هیدروژن مایع
۳۹۳	۳-۳-۶-۱۰ هیدریدهای فلزی
۳۹۳	۴-۳-۶-۱۰ هیدریدهای شیمیایی آلی
۳۹۴	۵-۳-۶-۱۰ مواد کربنی
۳۹۴	۶-۳-۶-۱۰ ریز کره‌های سیلیکاتی
۳۹۴	۷-۳-۶-۱۰ چالش‌های کنونی
۳۹۵	۸-۳-۶-۱۰ چشم انداز آینده
۳۹۶	۹-۳-۶-۱۰ سوالات و مسائل
۳۹۸	مراجع

فصل ۱۱: روش‌ها و منابع تولید هیدروژن

۳۹۹	۱-۱۱ تولید هیدروژن از هیدروکربنها
۴۰۳	۲-۱۱ تولید هیدروژن از زغال سنگ
۴۰۶	۳-۱۱ تولید هیدروژن از انرژی هسته‌ای
۴۰۷	۴-۱۱ تولید هیدروژن از انرژی باد
۴۰۹	۵-۱۱ تولید هیدروژن به وسیله فرایند زیست
۴۱۳	۶-۱۱ تولید هیدروژن از انرژی خورشیدی
۴۱۵	۷-۱۱ جدا سازی و تصفیه هیدروژن
۴۱۷	۸-۱۱ سوالات و مسائل
۴۱۸	مراجع

فصل ۱۲: روش‌های ذخیره سازی هیدروژن

۴۱۹	۱-۱۲ اهداف ذخیره سازی
۴۲۱	۲-۱۲ انتقال و ذخیره سازی در مخازن برودتی و تحت فشار
۴۲۳	۳-۱۲ ذخیره سازی هیدروژن در هیدریدهای فلزی
۴۴۲	۴-۱۲ ذخیره سازی هیدروژن در مواد کربنی
۴۵۰	۵-۱۲ ذخیره سازی هیدروژن در هیدریدهای شیمیایی آلی
۴۵۲	۶-۱۲ سوالات و مسائل

مراجع ۴۵۳

فصل ۱۳: ایمنی و جنبه‌های زیست محیطی سوخت هیدروژنی

۱-۱۳ کدها و استانداردهای مربوط به ایمنی هیدروژن ۴۵۵

۲-۱۳ راه‌های سنجش و تشخیص هیدروژن ۴۵۷

۳-۱۳ روش‌های سنتی سنجش هیدروژن ۴۵۸

۴-۱۳ ایمنی انرژی هیدروژنی ۴۶۳

۵-۱ جدا سازی کربن ۴۶۵

۶-۱۳ سوالات و مسائل ۴۶۷

مراجع ۴۶۸

پیوست ۴۶۹

دیباجه نویسندگان

تامین انرژی و تولید آلاینده‌گی دو مساله مهم و اساسی سوخت‌های فسیلی است که بیش از ۸۰ درصد انرژی کنونی دنیا را تامین می‌کنند. در واقع فناپذیری سوخت‌های فسیلی مهمترین مشکل آنها است و دومین مساله سوخت‌های فسیلی این است که باعث آلودگی محیط زیست (گرم شدن زمین، تغییر آب و هوا، ذوب شدن یخ‌ها، باران‌های اسیدی، کمربندگی، تخریب لایه ازن و ...) می‌شوند. استفاده از انرژی‌های پاک نظیر انرژی خورشیدی، انرژی بادی، زمین گرمایی و ... به جای انرژی‌های محدود فسیلی، می‌تواند از خطرات و چالش‌های این سوخت‌ها جلوگیری کند.

هیدروژن به ویژه یکی از منابع به فردی از قبیل فراوانی، انتشار بسیار ناچیز آلاینده‌ها، برگشت‌پذیری و چرخه تولید و کاهش اثرات گلخانه‌ای، به روش‌های مختلف قابل تولید است و با مصرف پیل‌های سوختی عمل تبدیل انرژی شیمیایی موجود در هیدروژن به انرژی الکتریکی انجام می‌شود. پیل سوختی بعضی از مشخصات موتورهای احتراق داخلی و بعضی مشخصات باتری‌ها را دارد. اغلب رانندگان آن بالاتر از رانندگان موتورهای احتراق داخلی است. همه اجزا پیل‌های سوختی ثابت هیچ قسمت متحرکی ندارند. دوام و قابلیت اعتماد آنها نیز بالا است و آلاینده‌هایی مانند اکسیژن در پیل سوختی نزدیک صفر هستند. بر خلاف باتری‌ها، در پیل‌های سوختی توان و ظرفیت اغلب به یکدیگر وابسته نیست. باتری‌ها به ندرت در مقیاس‌های بزرگ ساخته می‌شوند، اما پیل‌های سوختی از محدوده مقیاس یک وات تا محدوده یک میلیون وات ساخته می‌شوند. پیل‌های سوختی بالقوه دارای دانسیته انرژی بالاتری نسبت به باتری‌ها می‌باشند. می‌تواند به سرعت تغذیه و به سهولت مورد بهره‌برداری قرار گیرند.

در میان انواع پیل‌های سوختی، پیل سوختی غشا پلیمری بالاترین دانسیته توان را نسبت به انواع دیگر پیل‌ها دارد؛ زمان راه‌اندازی آن بسیار کوتاه است؛ رانندگان آن می‌توانند به سرعت کارکرد آن پایین است؛ الکترولیت آن جامد بوده و مشکل خوردگی در این پیل وجود ندارد. این مزایا سبب شده پیل‌های سوختی غشا پلیمری برای کاربرد در وسایل حمل و نقل و وسایل حمل و نقل مورد توجه قرار گیرند و به صورت تجاری در آیند. با وجود این مزایا، معایبی از قبیل قیمت بالا و محدود بودن دانسیته توان باعث شده استفاده از پیل‌های

سوختی محدود باشد و اگر بخواهند در کاربردهای مختلف با تجهیزات متداول رقابت کنند، کاهش قیمت و افزایش دانسیته توان در آنها بسیار ضروری می‌باشد. بدین منظور ارتقاء دانش فنی در زمینه ساختمان، عملکرد، زیر سیستم‌ها، محدودیت‌ها و مشکلات پیل‌های سوختی غشا پلیمری و چگونگی تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد آنها ضروری می‌باشد.

در این کتاب، به ساختمان، طریقه عملکرد، مدل‌سازی و شرایط عملکرد پیل سوختی غشا پلیمری، تامین هیدروژن به عنوان سوخت مورد استفاده در پیل پرداخته می‌شود. در فصل ۱ این کتاب به اصول پیل سوختی می‌پردازیم. در فصل‌های ۲ و ۳، ترمودینامیک و محدودیت‌های عمده سینتیکی در عملکرد سیستم‌های الکتروشیمیایی مطالعه شده و روابط پتانسیل - زمان واقعی پیل سوختی در قالب معادله نرنست و معادله ولمر - باتلر استخراج می‌گردد. در فصل ۴ انواع پیل‌های سوختی بررسی شده و با تأکید بر مزایای پیل‌های سوختی غشا پلیمری در فصل ۵ به ساختمان و اجزای این پیل پرداخته می‌شود. در فصل‌های ۶ تا ۸ شرایط عملکرد پیل، طراحی پیل و مدل‌سازی تک سل پیل سوختی مطالعه شده و در نهایت در فصل ۹ به طراحی سیستم پیل سوختی می‌پردازیم. چهار فصل پایانی به هیدروژن به عنوان سوخت پیل سوختی اختصاص دارد. در فصل ۱۰، مفاهیم پایه‌ای این سوخت و در فصل‌های ۱۱ و ۱۲ روش‌های تولید و ذخیره هیدروژن بررسی شده است. در فصل آخر نیز ایمنی هیدروژن مطالعه شده است.

این کتاب برای استفاده دانشجویان دوره کارشناسی، دوره کارشناسی ارشد، فارغ‌التحصیلان، مهندسان و متخصصان رشته‌های مهندسی مکانیک، مهندسی انرژی و مهندسی شیمی تدوین شده است. علی‌رغم دقت زیاد نویسندگان، احتمال وجود مشکلاتی در متن وجود دارد. از خوانندگان درخواست می‌شود نظرات اصلاحی خود را از طریق e.afshari@eng.uii.ac.ir به اطلاع نویسندگان برسانند تا در چاپ‌های بعدی این نواقص اصلاح شوند.

در پایان لازم است از همه‌ی عزیزانی که در تهیه این کتاب ما را یاری کردند، به خصوص از خانواده‌هایمان به خاطر صبر و بردباریشان در طول مدت تألیف و چاپ کتاب صمیمانه سپاسگزاری کنیم.

ابراهیم افشاری

یاسر ملایی برزی

حسین فرزانه