



جمهوری اسلامی ایران
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری



دانشگاه اراک

دانشکده علوم پایه

کارشناسی ارشد شیمی (گرایش شیمی فیزیک)

ساخت و ارزیابی نانو کاتالیست جامد اسیدی غیرهمگن
دودکاتنگستوفسفریک اسید بر پایه مونتموریلونیت (HPW/K₁₀) و
نمک‌های سزیم، آمونیوم و پتاسیم دودکاتنگستوفسفریک اسید توده
و کاربرد آن در واکنش تبادل استری برای تولید سوخت طبیعی

بیودیزل

پژوهشگر

مریم موالات

استاد راهنما

دکتر وحید مهدوی

استاد مشاور

دکتر علیرضا صلابت

دانشگاه اراک

تابستان ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

ساخت و ارزیابی نانو کاتالیست جامد اسیدی غیر همگن
دود کاتنگستوفسفریک اسید بر پایه مونتموریلونیت (HPW/K10) و نمک‌های
سزیم، آمونیوم و پتاسیم دود کاتنگستوفسفریک اسید توده و کاربرد آن در
واکنش تبادل استری برای تولید سوخت طبیعی بیودیزل

توسط:

مریم موالات

پایان نامه

ارائه شده به مدیریت تحصیلات تکمیلی به عنوان بخشی از فعالیت های

تحصیلی لازم برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته شیمی (گرایش شیمی فیزیک)

از

دانشگاه اراک

اراک-ایران

ارزیابی و تصویب شده توسط کمیته پایان نامه با درجه عالی و نمره ۱۹٫۷۵

دکتر وحید مهدوی (استاد راهنما)

دکتر علیرضا صلابت (استاد مشاور)

دکتر محمد سلیمان نژاد (داور داخلی)

دانشیار

شهریور ۱۳۹۰

این مختصر پیشگویی است به محضر حضرت ولی

عصر صاحب الزمان عج



تشکر و قدردانی

حمد و سپاس خداوند متعال را که لطف و عنایت خویش را شامل حال من نمود تا با وجود فرازونشیب های بسیار این پروژه، آن را با موفقیت به پایان برسانم. در آغاز خدا را شاکرم که افتخار شاگردی استاد ارجمند جناب آقای دکتر مهدوی را به من عطا فرمود، تا در سایه ی علم ایشان به جهان، به ویژه به دنیای شیمی نظری هوشمندانه تر بیندازم. از ایشان به خاطر تلاش های بی دریغ و رهنمودهای ارزنده در طول انجام این پروژه تشکر نموده و سعادت و سلامتی ایشان را آرزو مندم.

در ادامه بر خود لازم می دانم از استاد گرانقدر جناب آقای دکتر صلابت که زحمت مشاوره این پایان نامه را بر عهده گرفتند و همچنین استاد ارجمندم جناب آقای دکتر سلیمان نژاد که زحمت داوری این پایان نامه را بر عهده داشتند مراتب تشکر را به جا آورم.

بالاترین سپاس هایم را را به پدر و مادر مهربانم تقدیم می کنم، عزیزانی که همواره گرم ترین و استوارترین پناهم بودند و نگاه پر مهرشان شور و شوق تحصیل را در من افزود. از برادران و خواهرانم که همواره مشوق من بودند کمال تشکر را دارم. از دوستان خوبم سرکار خانم مردانی و ذوالنوریان و هم اتاقی های مهربانم در خوابگاه الزهرا که حضورشان در کنارم مایه ی دلگرمی و امیدواری بود نهایت تشکر را دارم. در نهایت از همراه نوپای زندگی ام، همسر مهربان و صبورم به خاطر خوبی ها و از خودگذشتگی هایش سپاسگزارم.

چکیده

در بخش اول این پایان‌نامه کاتالیزور جامد اسیدی غیرهمگن هتروپلی دودکاتنگستوفسفریک اسید (HPW) بر روی پایه مونتموریلونیت (K_{10}) با درصد وزنی ۵ تا ۴۰ به شیوه‌ی تلقیح ساخته شد. این سری کاتالیزورها از لحاظ ساختاری با تکنیک‌های SEM، XRD، FT-IR، DTG و آنالیز عنصری EDX مورد بررسی قرار گرفتند. افزایش فاز کریستالی در الگوی XRD نشان می‌دهد، قرار گرفتن HPW روی K_{10} سبب افزایش سایت‌های اسیدی می‌شود. علاوه بر این در طیف FT-IR این کاتالیزورها پیوندهای مشخصه‌ای ساختار کگین حفظ شده و پیک‌های دیگر با K_{10} یکی می‌شود. در بخش دوم، نمک‌های کاتالیزوری سزیم، پتاسیم و آمونیم تنگستوفسفریک اسید با نسبت مولی ۱ تا ۳ به روش رسوبدهی ساخته شد. این کاتالیزورها نیز با تکنیک‌های SEM، FT-IR و DTG از لحاظ ساختاری شناسایی شدند. همه این کاتالیزورها در واکنش تبادل استری بوتیل استات با متانول در دمای ۳۶۸K و فشار یک اتمسفر بررسی شدند. در واقع این واکنش به عنوان یک مدل ساده مورد استفاده قرار گرفت تا در آن قدرت اسیدی کاتالیزورها، برای انجام واکنش تبادل استری و در نهایت تولید بیودیزل ارزیابی شود. بالاترین فعالیت در بخش اول به کاتالیزور 30% HPW/ K_{10} و در بخش دوم به کاتالیزورهای $(NH_4)_2HPW_{12}O_{40}$ و $K_2HPW_{12}O_{40}$ ، $CS_2HPW_{12}O_{40}$ دارای بازده ۷۱/۶۶٪، ۸۱٪، ۸۱٪ و ۸۴٪ بودند. اثر نوع پایه، نسبت مولی متانول به بوتیل استات، مقدار کاتالیزور، دمای واکنش، زمان واکنش و زمان فعال سازی بر راندمان واکنش و همچنین اثر قابلیت استفاده مجدد و اثر خیساندن برای کاتالیزورهای بهینه بررسی شد. در پایان از روغن کتان به عنوان نمونه طبیعی استفاده شد. بازده تولید بیودیزل در حضور روغن کتان ۸۰ درصد بود که بازده رضایت بخشی است. این گروه از کاتالیزورهای اسیدی،

فعالیت مناسبی را تحت یک واکنش کاتالیزوری ناهمگن برای تولید بیودیزل از خود نشان می‌دهند. جداسازی راحت کاتالیزور از مخلوط واکنش وعدم نیاز به مراحل خالص سازی وخنثی سازی از مزیت های بسیار مهم این گونه فرایندهای ناهمگن است.

۱	فصل اول : آشنایی با کاتالیزورها و مواد مولکولارسیو
۲	۱-۱- معرفی کاتالیزور
۲	۲-۱- تاریخچه
۳	۳-۱- چگونگی عملکرد کاتالیزور
۴	۴-۱- مکانیسم واکنش کاتالیزوری
۵	۵-۱- دسته بندی کاتالیزورها
۶	۱-۵-۱- کاتالیزورهای طبیعی (آنزیم)
۶	۱-۲-۵-۱- کاتالیزور همگن
۷	۱-۳-۵-۱- کاتالیزور ناهمگن
۸	۱-۶-۱- جذب سطحی
۸	۱-۶-۱- جذب فیزیکی و جذب شیمیایی
۱۱	۱-۷-۱- فرایندهای کاتالیزوری ناهمگن
۱۱	۱-۸-۱- ویژگی‌های کاتالیزوری ناهمگن
۱۱	۱-۸-۱- فعالیت
۱۲	۱-۸-۲- گزینش پذیری
۱۳	۱-۸-۳- پایداری
۱۳	۱-۸-۳-۱- عوامل خارجی
۱۴	۱-۸-۳-۲- عوامل داخلی
۱۵	۱-۸-۴- امکان بازیافت
۱۵	۱-۸-۵- تکرار پذیری

۱۶	۱-۸-۶- هزینه
۱۶	۱-۹- روش های تهیه کاتالیزور های ناهمگن
۱۶	۱-۹-۱- فرآیند مخلوط کردن
۱۷	۱-۹-۲- فرآیند تلقیح
۱۷	۱-۹-۳- فرآیند رسوب دادن
۱۸	۱-۱۰- ساخت کاتالیزورهای جامد
۱۸	۱-۱۰-۱- پایه کاتالیزور
۱۹	۱-۱۰-۲- تقویت کننده ها
۲۰	۱-۱۰-۳- نگهدارنده ها
۲۰	۱-۱۱- عملیات لازم برای ساخت کاتالیزور
۲۰	۱-۱۱-۱- شست و شو
۲۰	۱-۱۱-۲- خشک کردن
۲۱	۱-۱۱-۳- شکل دادن
۲۱	۱-۱۲- اندازه گیری سطح فعال و حجم منافذ در نانو مواد
۲۱	۱-۱۲-۱- اندازه گیری مساحت سطح
۲۴	۱-۱۲-۲- روش BET
۲۶	۱-۱۳- نگاهی کلی به نانوحفره ها یا مواد نانومتخلخل
۲۷	۱-۱۴- طبقه بندی نانوحفره ها
۲۸	۱-۱۵- ترکیبات مزوپور
۲۹	فصل دوم: مروری بر کاتالیزورهای اسیدی و کاربرد آن ها

- ۳۰-۱-۲- واکنش تبادل استری توسط کاتالیزورهای ناهمگن
- ۳۰-۲-۲- کاتالیزورهای اسیدی جامد
- ۳۱-۱-۲-۲- مکانیسم واکنش تبادل استری در حضور کاتالیزور اسیدی
- ۳۲-۳-۲- انواع کاتالیزورهای اسیدی جامد
- ۳۳-۱-۳-۲- کلی‌ها
- ۳۴-۱-۱-۳-۲- مونتموریلونیت
- ۳۶-۲-۳-۲- هتروپلی اسیدها
- ۳۵-۱-۲-۳-۲- ویژگی‌های منحصر به فرد هتروپلی اسید
- ۳۸-۲-۲-۳-۲- معایب هتروپلی اسید و روش برطرف کردن آن
- ۴۰-۳-۲-۳-۲- انواع واکنش‌های کاتالیزوری ناهمگن به وسیله‌ی پلی‌اکسومتالات
- ۴۲-۴-۲-۳-۲- واکنش‌های هتروپلی اسید
- ۴۳-۳-۳-۲- ژئولیت
- ۴۴-۱-۳-۳-۲- ساخت ژئولیت اسیدی
- ۴۵-۴-۳-۲- سیلیکا و آلومینای آمورف
- ۴۵-۵-۳-۲- مخلوط اکسیدها
- ۴۶-۴-۲- بیودیزل
- ۴۶-۱-۴-۲- ویژگی‌های سوخت بیودیزل
- ۴۷-۲-۴-۲- سوخت ایمن و تمیز
- ۴۸-۵-۲- مرور تاریخچه‌ای و انتخاب سیستم کاتالیزوری

- ۵۰ فصل سوم : مراحل تجربی
- ۵۱ ۱-۳- معرفی مواد شیمیایی
- ۵۲ ۲-۳- تهیه کاتالیزورهای دودکاتنگستوفسفرفریک اسید بر پایه مونتموریلونیت HPW/K₁₀ به روش تلقیح
- ۵۲ ۱-۲-۳- تهیه کاتالیزور HPW بر پایه‌ی مونتموریلونیت K₁₀ (سری الف)
- ۵۳ ۲-۲-۳- تهیه کاتالیزور HPW بر پایه‌ی مونتموریلونیت K₁₀ رفلکس شده با متانول
- ۵۴ ۳-۳- تست رآکتوری و انجام واکنش تبادل استری
- ۵۴ ۴-۳- آنالیز محصولات و شرایط آنالیز
- ۵۶ ۱-۴-۳- ضرایب تصحیح
- ۵۷ ۵-۳- بررسی پارامترهای موثر بر بازده واکنش تبادل استری n-بوتیل استات و متانول
- ۵۷ ۱-۵-۳- بررسی اثر نوع پایه، بر فعالیت کاتالیزوری تنگستوفسفرفریک اسید در واکنش تبادل استری
- ۵۸ ۲-۵-۳- بررسی اثر درصد وزنی هتروپلی اسید HPW، بارگذاری شده بر پایه K₁₀
- ۵۸ ۳-۵-۳- بررسی اثر مقدار کاتالیزور HPW/K₁₀ 30% در واکنش تبادل استری
- ۵۸ ۴-۵-۳- بررسی اثر زمان در واکنش تبادل استری، توسط کاتالیزور HPW/K₁₀ 30%
- ۵۹ ۵-۵-۳- بررسی اثر دما در واکنش تبادل استری، توسط کاتالیزور HPW/K₁₀ 30%
- ۵۹ ۶-۵-۳- بررسی اثر نسبت مولی مواد اولیه در واکنش تبادل استری توسط کاتالیزور 30% HPW/K₁₀

۳-۵-۷- بررسی اثر خیساندن (Leaching) و قابلیت کاربرد مجدد (Reuse ability)

۶۰ کاتالیزور $30\% \text{HPW/K}_{10}$

۳-۶- واکنش تبادل استری روغن کتان و متانول در حضور کاتالیزور بهینه

۳-۷- تهیه کاتالیزورهای اسیدی جامد غیرهمگن سری نمک سزیم، پتاسیم و آمونیوم تنگستو

۶۱ فسفریک اسید به روش رسوب دادن

۳-۷-۱- تهیه کاتالیزورهای $\text{CsH}_2\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$ ، $\text{Cs}_2\text{HPW}_{12}\text{O}_{40}$ ، $\text{Cs}_2\text{H}_{0.5}\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$ و

۶۲ $\text{Cs}_3\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$ (توده)

۳-۷-۲- تهیه کاتالیزورهای $\text{KH}_2\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$ ، $\text{K}_2\text{HPW}_{12}\text{O}_{40}$ ، $\text{K}_2\text{.5HPW}_{12}\text{O}_{40}$ و

۶۳ $\text{K}_3\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$ (توده)

۳-۷-۳- تهیه کاتالیزورهای $(\text{NH}_4)_2\text{HPW}_{12}\text{O}_{40}$ ، $(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$ و

۶۵ $(\text{NH}_4)_3\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$ (توده) و $(\text{NH}_4)_{2.5}\text{H}_{0.5}\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$

۳-۸- بهینه کردن کاتالیزورهای نمک تنگستوفسفریک اسید برای واکنش تبادل استری n-

۶۷ بوتیل استات و متانول

۳-۸-۱- بررسی اثر نسبت مولی نمک سزیم، پتاسیم و آمونیوم تنگستوفسفریک اسید در

۶۷ غیرهمگن کردن هتروپلی اسید

۳-۸-۲- بررسی اثر همزمان دما و زمان توسط کاتالیزورهای $\text{Cs}_2\text{HPW}_{12}\text{O}_{40}$ ،

۶۸ $(\text{NH}_4)_2\text{HPW}_{12}\text{O}_{40}$ ، $\text{K}_2\text{HPW}_{12}\text{O}_{40}$

- ۳-۸-۳- بررسی اثر خیساندن (Leaching) و قابلیت کاربرد مجدد (Reuseability) کاتالیزور
- ۶۹ $(\text{NH}_4)_2\text{HPW}_{12}\text{O}_{40}$ ، $\text{K}_2\text{HPW}_{12}\text{O}_{40}$ ، $\text{Cs}_2\text{HPW}_{12}\text{O}_{40}$
- ۶۹ -۹-۳- تعیین کاراکتر و خصوصیات ساختاری کاتالیزور
- ۷۰ -۱-۹-۳- طیف سنجی مادون قرمز FT-IR
- ۷۰ -۲-۹-۳- آنالیز ترموگراویمتری
- ۷۰ -۳-۹-۳- میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM
- ۷۲ -۴-۹-۳- آنالیز عنصری با استفاده از داده‌های Edx-SEM
- ۷۳ -۵-۹-۳- دیفراکسیون (پراش) اشعه X با Diffraction Philips
- ۷۴ **فصل چهارم : بحث و نتیجه گیری**
- ۷۵ -۱-۴- تعیین کاراکتر و خصوصیات ساختاری کاتالیزورها
- ۷۵ -۱-۱-۴- طیف‌بینی مادون قرمز (FT-IR)
- ۷۹ -۲-۱-۴- آنالیز حرارتی
- ۸۴ -۳-۱-۴- مطالعه SEM و تعیین مورفولوژی و اندازه‌ی ذرات
- ۹۹ -۴-۱-۴- آنالیز عنصری با استفاده از داده‌های Edx-SEM
- ۱۰۲ -۵-۱-۴- مطالعه دیفراکسیون اشعه X (XRD)
- ۱۰۴ -۲-۴- تست رآکتوری کاتالیزورها
- ۱۰۴ -۱-۲-۴- تست رآکتوری کاتالیزورهای سری (الف) HPw/K₁₀

- ۱۰۶ ۲-۲-۴- تست‌های رآکتوری کاتالیزورهای سری (ب) HPW/K_{10}
- ۳-۴- بررسی اثر عوامل موثر بر واکنش تبادل استری n - بوتیل استات و متانول در حضور
- ۱۰۸ کاتالیزور $30\%HPW/K_{10}$ سری(الف)
- ۱۰۸ ۱-۳-۴- بررسی اثر نوع پایه
- ۱۰۹ ۲-۳-۴- بررسی اثر مقدار کاتالیزور
- ۱۱۰ ۳-۳-۴- بررسی اثر زمان
- ۱۱۲ ۴-۳-۴- بررسی اثر دما
- ۱۱۲ ۵-۳-۴- بررسی اثر نسبت مولی مواد اولیه (متانول به بوتیل استات)
- ۶-۳-۴- بررسی اثر خیساندن (Leaching) و قابلیت کاربرد مجدد (Reuseability)
- ۱۱۴ کاتالیزور $30\%HPW/K_{10}$ سری الف و ب.
- ۷-۳-۴- بررسی اثر دما و زمان واکنش تبادل استری n - بوتیل استات با متانول در حضور
- ۱۱۶ کاتالیزور $30\%HPW/K_{10}$ سری الف
- ۴-۴- بهینه کردن کاتالیزورهای نمک تنگستوفسفریک اسید برای واکنش تبادل استری n -
- ۱۱۷ بوتیل استات و متانول
- ۱۱۷ ۱-۴-۴- بررسی اثر نسبت مولی نمک سزیم، پتاسیم و آمونیوم تنگستوفسفریک اسید
- ۲-۴-۴- بررسی اثر دما و زمان در واکنش تبادل استری n - بوتیل استات با متانول در حضور
- ۱۲۱ کاتالیزورهای بهینه: $(NH_4)_2HPW_{12}O_{40}$ و $K_2HPW_{12}O_{40}$ ، $CS_2HPW_{12}O_{40}$

- ۱-۲-۴-۴- بررسی اثر دما و زمان واکنش تبادل استری n - بوتیل استات با متانول در حضور
کاتالیزور $\text{Cs}_2\text{HPW}_{12}\text{O}_{40}$ ۱۲۱
- ۲-۲-۴-۴- بررسی اثر دما و زمان در واکنش تبادل استری n - بوتیل استات با متانول در
حضور کاتالیزور $\text{K}_2\text{HPW}_{12}\text{O}_{40}$ ۱۲۲
- ۳-۲-۴-۴- بررسی اثر دما و زمان در واکنش تبادل استری n - بوتیل استات با متانول در
حضور کاتالیزور $(\text{NH}_4)_2\text{HPW}_{12}\text{O}_{40}$ ۱۲۴
- ۳-۴-۴- بررسی اثر خیساندن (Leaching) و قابلیت کاربرد مجدد (Reuseability)
کاتالیزور ۱۲۵
- ۵-۴- نتیجه‌گیری کلی ۱۲۷
- ۶-۴- پیشنهاداتی برای آینده ۱۲۸
- مراجع ۱۳۰

- شکل (۱-۱): از چپ به راست: دیوی (۱۷۷۸-۱۸۲۹)، فارادی (۱۷۹۱-۱۸۶۷)،
 ۳ برزیلیوس (۱۷۷۹-۱۸۴۸) استوالد (۱۸۵۳-۱۹۳۲)
- شکل (۲-۱): مقایسه‌ی مکانیسم واکنش کاتالیزوردار با واکنش بدون کاتالیزور
 ۴
- شکل (۳-۱): مقایسه حداقل انرژی واکنش کاتالیز شده با واکنش بدون کاتالیزور
 ۵
- شکل (۴-۱): عملکرد کاتالیزورهای طبیعی
 ۶
- شکل (۵-۱): سمت راست جذب فیزیکی و شکل سمت چپ جذب شیمیایی
 ۱۰
- شکل (۶-۱): نقش پایه در پایداری حرارتی کاتالیست، a: عدم حضور پایه و b: در حضور پایه ۱۹
 شکل (۷-۱): پنج نوع ایزوترم جذب که توسط Brunauer و همکارانش طبقه‌بندی شده و با
 نام ایزوترم‌های BDDT شناخته می‌شوند
 ۲۳
- شکل (۸-۱): طبقه‌بندی مواد متخلخل
 ۲۷
- شکل (۱-۲): تعداد کاتالیست‌های جامد در فرآیندهای صنعتی
 ۳۰
- شکل (۲-۲): واکنش تبادل استری در حضور کاتالیزور
 ۳۲
- شکل (۳-۲): مکانیسم واکنش تبادل استری توسط کاتالیزور اسیدی
 ۳۲
- شکل (۴-۲): اجزا تشکیل دهنده‌ی مونتموریلونیت
 ۳۴
- شکل (۵-۲): ساختار لایه‌ای مونتموریلونیت
 ۳۴
- شکل (۶-۲): ساختار مرتبه‌ای ترکیبات هتروپلی‌اسید
 ۳۶
- شکل (۷-۲): ساختار واحد کگین
 ۳۷
- شکل (۸-۲): کاهش حلالیت نمک سزیم هتروپلی‌اسید
 ۳۹
- شکل (۹-۲): کپسوله کردن هتروپلی‌اسید درون زئولیت Y
 ۳۹
- شکل (۱۰-۲): سه مدل کاتالیز کردن واکنش توسط ترکیبات هتروپلی‌اسید
 ۴۰

- ۴۱ شکل (۲-۱۱): مدل کاتالیز کردن شبه مایع هتروپلی‌اسید
- ۴۳ شکل (۲-۱۲): واحدهای تشکیل‌دهنده زئولیت
- ۴۳ شکل (۲-۱۳): سایتهای اسیدی در زئولیت‌ها
- ۴۴ شکل (۲-۱۴): مراحل ساخت زئولیت اسیدی
- ۴۵ شکل (۲-۱۵): سیلیکا و آلومینای آمورف بدون آب
- ۴۵ شکل (۲-۱۶): سیلیکا و آلومینای آمورف آبدار
- شکل (۳-۱): نمونه کروماتوگرام محصول تبادل استری n- بوتیل استات و متانول در حضور کاتالیزور 20%HPW/K₁₀
- ۵۵
- ۷۱ شکل (۳-۲): آماده‌سازی نمونه برای لایه نشانی طلا.
- ۷۱ شکل (۳-۳): دستگاه لایه نشانی طلا بر نمونه‌های کاتالیزور سنتز شده
- ۷۲ شکل (۳-۴): میکروسکوب الکترون روبشی
- ۷۵ شکل (۴-۱): طیف مادون قرمز FT-IR دودکاتنگستوفسفریک اسید
- ۷۶ شکل (۴-۲): طیف FT-IR مونتموریلونیت
- ۷۶ شکل (۴-۳): طیف FT-IR کاتالیزور 40% HPW/K₁₀
- ۷۷ شکل (۴-۴): طیف FT-IR کاتالیزور 30% HPW/K₁₀ سری الف (a) سری ب (b)
- ۷۸ شکل (۴-۵): طیف مادون قرمز FT-IR نمک کاتالیزوری Cs₂HPW₁₂O₄₀

- ۷۹ شکل (۶-۴): طیف مادون قرمز FT-IR نمک کاتالیزوری $(\text{NH}_4)_2\text{HPW}_{12}\text{O}_{40}$
- ۸۰ شکل (۷-۴): نمودار TGA- DTG- DSC کاتالیزور $30\%\text{HPW}/\text{K}_{10}$ سری الف
- ۸۱ شکل (۸-۴): نمودار TGA- DTG- DSC کاتالیزور $\text{Cs}_2\text{HPW}_{12}\text{O}_{40}$
- ۸۲ شکل (۹-۴): نمودار TGA- DTG- DSC کاتالیزور $\text{K}_2\text{HPW}_{12}\text{O}_{40}$
- ۸۳ شکل (۱۰-۴): نمودار TGA- DTG- DSC کاتالیزور $(\text{NH}_4)_2\text{HPW}_{12}\text{O}_{40}$
- ۸۳ شکل (۱۱-۴): نمودار DSC کاتالیزور $(\text{NH}_4)_2\text{HPW}_{12}\text{O}_{40}$
- ۸۵ شکل (۱۲-۴): کاتالیزور $5\%\text{HPW}/\text{K}_{10}$ سری الف بزرگنمایی ۳۰۰۰۰
- ۸۵ شکل (۱۳-۴): کاتالیزور $10\%\text{HPW}/\text{K}_{10}$ سری الف. بزرگنمایی ۳۰۰۰۰
- ۸۶ شکل (۱۴-۴): کاتالیزور $20\%\text{HPW}/\text{K}_{10}$ در بزرگنمایی: (a) ۱۵۰۰۰، (b) ۳۰۰۰۰
- شکل (۱۵-۴): کاتالیزور $25\%\text{HPW}/\text{K}_{10}$ سری الف در بزرگنمایی: (a) ۳۰۰۰۰، (b) ۶۰۰۰۰
- ۸۷ (b): ۶۰۰۰۰
- شکل (۱۶-۴): کاتالیزور $30\%\text{HPW}/\text{K}_{10}$ سری الف در بزرگنمایی (a) ۱۵۰۰۰ و (b) ۳۰۰۰۰
- ۸۸ (b): ۳۰۰۰۰
- ۸۹ شکل (۱۷-۴): کاتالیزور $35\%\text{HPW}/\text{K}_{10}$ سری الف در بزرگنمایی: ۱۵۰۰۰
- ۸۹ شکل (۱۸-۴): کاتالیزور $40\%\text{HPW}/\text{K}_{10}$ سری الف در بزرگنمایی ۱۵۰۰۰
- ۹۰ شکل (۱۹-۴): کاتالیزور $\text{Cs H}_2\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$ در بزرگنمایی ۳۰۰۰۰

- ۹۱ شکل (۴-۲۰): کاتالیزور $\text{Cs}_2\text{HPW}_{12}\text{O}_{40}$ در بزرگنمایی ۳۰۰۰۰
- ۹۱ شکل (۴-۲۱): کاتالیزور $\text{Cs}_{2.5}\text{H}_{0.5}\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$ در بزرگنمایی ۳۰۰۰۰
- ۹۲ شکل (۴-۲۲): کاتالیزور $\text{Cs}_3\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$ در بزرگنمایی ۳۰۰۰۰
- ۹۳ شکل (۴-۲۳): کاتالیزور $\text{KH}_2\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$ در بزرگنمایی ۳۰۰۰۰
- ۹۳ شکل (۴-۲۴): کاتالیزور $\text{K}_2\text{HPW}_{12}\text{O}_{40}$ در بزرگنمایی ۳۰۰۰۰
- ۹۴ شکل (۴-۲۵): کاتالیزور $\text{K}_{2.5}\text{H}_{0.5}\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$ در بزرگنمایی ۳۰۰۰۰
- ۹۴ شکل (۴-۲۶): کاتالیزور $\text{K}_3\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$ در بزرگنمایی ۳۰۰۰۰
- ۹۵ شکل (۴-۲۷): کاتالیزور $(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$ در بزرگنمایی: (a): ۱۵۰۰۰، (b): ۳۰۰۰۰
- ۹۶ شکل (۴-۲۸): کاتالیزور $(\text{NH}_4)_2\text{HPW}_{12}\text{O}_{40}$ در بزرگنمایی: (a): ۱۵۰۰۰، (b): ۳۰۰۰۰
- شکل (۴-۲۹): کاتالیزور $(\text{NH}_4)_{2.5}\text{H}_{0.5}\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$ در بزرگنمایی: (a): ۱۵۰۰۰، (b): ۳۰۰۰۰
- ۹۷ (b): ۳۰۰۰۰
- ۹۸ شکل (۴-۳۰): کاتالیزور $(\text{NH}_4)_3\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$ در بزرگنمایی: (a): ۱۵۰۰۰، (b): ۳۰۰۰۰
- ۹۹ شکل (۴-۳۱): آنالیز عنصری کاتالیزور $5\%\text{HPW}/\text{K}_{10}$ سری الف
- ۱۰۰ شکل (۴-۳۲): آنالیز عنصری کاتالیزور $10\%\text{HPW}/\text{K}_{10}$ سری الف
- ۱۰۰ شکل (۴-۳۳): آنالیز عنصری کاتالیزور $15\%\text{HPW}/\text{K}_{10}$ سری الف
- ۱۰۱ شکل (۴-۳۴): آنالیز عنصری کاتالیزور $30\%\text{HPW}/\text{K}_{10}$ سری الف

- شکل (۴-۳۵): آنالیز عنصری کاتالیزور $35\% \text{HPW}/\text{K}_{10}$ سری الف ۱۰۱
- شکل (۴-۳۶): آنالیز عنصری کاتالیزور $40\% \text{HPW}/\text{K}_{10}$ سری الف ۱۰۲
- شکل (۴-۳۷): طیف XRD کاتالیزور HPW/K_{10} با درصد وزنی مختلف ۱۰۳
- شکل (۴-۳۸): تغییرات درصد تبدیل n - بوتیل استات برحسب درصد وزنی HPW ۱۰۷
- شکل (۴-۳۹): نمودار بررسی اثر مقدار کاتالیزور در بازده واکنش با استفاده از کاتالیزور ۱۱۰
- $30\% \text{HPW}/\text{K}_{10}$
- شکل (۴-۴۰): نمودار مربوط به اثر زمان در بازده واکنش با استفاده از کاتالیزور 30% ۱۱۱
- HPW/K_{10}
- شکل (۴-۴۱): نمودار مربوط به اثر زمان و نسبت مولی متفاوت مواد واکنش‌دهنده در بازده واکنش با استفاده از کاتالیزور $30\% \text{HPW}/\text{K}_{10}$ ۱۱۳
- شکل (۴-۴۲): نمودار اثر قابلیت کاربرد مجدد کاتالیزور $30\% \text{HPA}/\text{K}_{10}$ سری الف و ب بر اساس داده‌های جدول (۴-۸). ۱۱۵
- شکل (۴-۴۳): نمودار بررسی اثر دما و زمان واکنش تبادل استری n - بوتیل استات و متانول ۱۱۷
- شکل (۴-۴۴): جدا شدن ذرات کاتالیزوری از مخلوط واکنش، از سمت راست: کاتالیزور، $(\text{NH}_4)_2 \text{HPW}_{12}\text{O}_{40}$ و $\text{K}_2\text{HPW}_{12}\text{O}_{40}$ ، $\text{CS}_2\text{HPW}_{12}\text{O}_{40}$ ۱۲۰
- شکل (۴-۴۵): بررسی اثر دما و زمان واکنش تبادل استری n - بوتیل استات و متانول با کاتالیزور $\text{CS}_2\text{HPW}_{12}\text{O}_{40}$ ۱۲۱