

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و
نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه
متعلق به دانشگاه رازی است.



دانشکده شیمی
گروه شیمی فیزیک

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته‌ی شیمی
گرایش شیمی فیزیک

عنوان پایان‌نامه

اثر شرایط تهیه و شرایط عملیاتی بر عملکرد کاتالیتیکی نانوکاتالیستهای

MgO/Al₂O₃ برای تولید بیودیزل

استاد راهنما:

دکتر حمید رضا رفیعی

نگارش:

سحر رحمت آبادی

اسفند ماه ۱۳۹۱



دانشکده شیمی

گروه شیمی فیزیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته شیمی

گرایش شیمی فیزیک

نام دانشجو

سحر رحمت آبادی

عنوان پایان نامه

اثر شرایط تهیه و شرایط عملیاتی بر عملکرد کاتالیتیکی نانوکاتالیستهای

MgO/Al_2O_3 برای تولید بیودیزل

در تاریخ ۱۳۹۱/۱۲/۱۹ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه به تصویب نهایی رسید.

امضاء

۱- استاد راهنما دکتر حمید رضا رفیعی با مرتبه علمی استادیار

چکیده

نانوکاتالیست‌های MgO/Al_2O_3 به روش تلقیح تهیه شده و از آنها در فرآیند تولید بیودیزل به روش ترانس-استریفیکاسیون استفاده شده است. پارامترهای موثر بر عملکرد نانوکاتالیست نظیر: درصد وزنی فاز فعال MgO نسبت به ساپورت، درصد وزنی تقویت کننده CaO ، دمای کلسیناسیون، زمان کلسیناسیون مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین پارامترهای موثر بر شرایط عملیاتی تهیه بیودیزل نظیر: غلظت اولیه کاتالیست، نسبت متانول به روغن، زمان واکنش و دمای واکنش بررسی شده است. خواص فیزیکی نمونه‌های بیودیزل از قبیل ویسکوزیته و ضریب شکست به عنوان شاخصی برای مقایسه نمونه‌های بیودیزل و پیشرفت واکنش در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهند که شرایط بهینه بدست آمده برای نانوکاتالیست، ۶٪ وزنی از فاز فعال MgO ، ۶٪ وزنی از تقویت کننده CaO ، دمای کلسیناسیون ۶۰۰ درجه سانتیگراد و زمان کلسیناسیون ۵ ساعت و همچنین شرایط عملیاتی بهینه ۳ درصد وزنی کاتالیست نسبت به وزن اولیه روغن، نسبت متانول به روغن ۱:۱۲، زمان واکنش ۲ ساعت و دمای ۶۰ درجه سانتیگراد بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهند که درصد تبدیل بدست آمده در شرایط بهینه ۷۷/۸ می‌باشد. در نهایت کاتالیست‌های تهیه شده توسط تکنیک‌های $FT-IR$ و BET , SEM , XRD مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول:
۲-۱-۱-مقدمه	۲
۲-۱-بیودیزل	۴
۳-۱-مزایا و معایب بیودیزل	۴
۴-۱-منابع موجود در تولید بیودیزل	۵
۵-۱-روش‌های تولید بیودیزل	۷
۱-۵-۱-روش اختلاط مستقیم	۷
۲-۵-۱-روش میکروامولسیون	۸
۳-۵-۱-روش ترانس استری شدن	۸
۱-۳-۵-۱-کاتالیست‌های فرآیند تبادل استری	۱۰
۲-۳-۵-۱-پارامترهای موثر بر میزان تبدیل واکنش تبادل استری	۱۲
۶-۱-شناسایی بیودیزل	۱۸
۱-۶-۱-نقطه اشتعال	۱۹
۲-۶-۱-عدد ستان	۱۹
۳-۶-۱-ویسکوزیته	۱۹
۴-۶-۱-دانسیته	۲۰
۵-۶-۱-ضریب شکست	۲۰
۶-۶-۱-نقطه ابری شدن	۲۰
۷-۱-روش‌های آنالیز متیل استر	۲۱
۱-۷-۱-روش GC-MS	۲۱
	فصل دوم:
۱-۲-مقدمه	۲۳
۲-۲-مواد نانوساختار و نانوذرات	۲۳
۳-۲-کاتالیست	۲۴
۴-۲-خصوصیات کاتالیست‌ها	۲۵
۱-۴-۲-فعالیت	۲۵
۲-۴-۲-گزینش پذیری	۲۶
۳-۴-۲-پایداری	۲۶
۴-۴-۲-بازده	۲۷
۵-۴-۲-امکان بازیافت	۲۷
۶-۴-۲-هزینه	۲۷
۵-۲-اجزای کاتالیست‌ها	۲۸

عنوان	صفحه
۱-۵-۲- فاز فعال	۲۸
۲-۵-۲- ساپورت	۲۹
۳-۵-۲- تقویت کننده	۳۱
فصل سوم:	
۱-۳- مقدمه	۳۳
۲-۳- روش‌های تهیه کاتالیست‌ها	۳۳
۱-۲-۳- روش رسوبی	۳۴
۱-۱-۲-۳- رسوبگیری	۳۴
۲-۱-۲-۳- ته نشینی و صاف کردن رسوب	۳۵
۳-۱-۲-۳- شستشوی رسوب	۳۵
۴-۱-۲-۳- خشک کردن	۳۵
۵-۱-۲-۳- کلسیناسیون	۳۵
۲-۲-۳- روش تلقیح	۳۶
۱-۲-۲-۳- تلقیح مرطوب	۳۸
۲-۲-۲-۳- تلقیح خشک	۳۸
۳-۲-۲-۳- تلقیح متوالی یا پی‌درپی	۳۹
۴-۲-۲-۳- تلقیح همزمان	۳۹
۳-۲-۳- سل - ژل	۳۹
۱-۳-۲-۳- انواع فرآیندهای سل - ژل	۴۰
۳-۳- روش‌های شناسایی و تعیین خواص کاتالیست‌ها	۴۱
۱-۳-۳- خواص شیمیایی توده	۴۲
۲-۳-۳- خواص شیمیایی سطح	۴۲
۳-۳-۳- خواص فیزیکی و ریخت‌شناسی سطح	۴۳
۴-۳- تکنیک‌های شناسایی	۴۴
۱-۴-۳- میکروسکوپی الکترون روبشی (SEM)	۴۴
۲-۴-۳- روش BET	۴۵
۳-۴-۳- طیف سنجی پراش اشعه ایکس (XRD)	۴۶
۴-۴-۳- طیف سنجی مادون قرمز IR , FT-IR	۴۸
فصل چهارم:	
۱-۴- مقدمه	۵۱
۲-۴- مواد اولیه و دستگاه‌های مورد نیاز	۵۱
۳-۴- محاسبات استوکیومتری	۵۲
۴-۴- تهیه کاتالیست MgO/Al_2O_3	۵۴
۵-۴- انتخاب مواد مختلف در تولید بیودیزل	۵۴
۱-۵-۴- انتخاب منبع گیاهی	۵۴

عنوان	صفحه
۴-۵-۲- انتخاب نوع الکلی.....	۵۵
۴-۵-۳- انتخاب نوع کاتالیست.....	۵۵
۴-۵-۴- سایر پارامترهای سینتیکی و ترمودینامیکی.....	۵۵
۴-۵-۴-۱- نسبت مولاری.....	۵۵
۴-۵-۴-۲- دما.....	۵۵
۴-۵-۴-۳- شدت هم‌زدن.....	۵۶
۴-۶-۶- تعیین اندیس اسیدی و اندیس صابونی.....	۵۶
۴-۶-۱- اندیس صابونی.....	۵۶
۴-۶-۲- اندیس اسیدی.....	۵۷
۴-۷- روند کلی انجام آزمایشات برای تهیه نمونه بیودیزل.....	۵۹
۴-۸- استاندارد شناسایی بیودیزل.....	۵۹
۴-۸-۱- تعیین میزان ضریب شکست نمونه بیودیزل.....	۶۰
۴-۸-۲- تعیین میزان ویسکوزیته نمونه بیودیزل.....	۶۰
۴-۸-۳- تهیه نمونه استاندارد.....	۶۱
۴-۹- بررسی پارامترهای آزمایشگاهی.....	۶۴
۴-۹-۱- بررسی اثر درصد فاز فعال MgO.....	۶۵
۴-۹-۲- بررسی اثر درصد تقویت کننده CaO.....	۶۶
۴-۹-۳- بررسی اثر دمای کلسیناسیون.....	۶۷
۴-۹-۴- بررسی اثر زمان کلسیناسیون.....	۶۸
۴-۹-۵- بررسی اثر زمان واکنش.....	۶۹
۴-۹-۶- بررسی اثر درصد وزنی کاتالیست.....	۷۰
۴-۹-۶- بررسی اثر نسبت متانول به روغن.....	۷۱
۴-۹-۸- بررسی اثر دمای واکنش.....	۷۲
۴-۹-۹- بررسی GC-MS نمونه بهینه.....	۷۳
۴-۱۰- بررسی طیف FT-IR کاتالیست‌ها.....	۷۴
۴-۱۱- بررسی طیف XRD.....	۷۵
۴-۱۲- بررسی طیف SEM.....	۷۶
۴-۱۳- بررسی BET.....	۷۷
۴-۱۳- نتیجه‌گیری کلی.....	۷۹
فصل پنجم:	
۵-۱- جمع‌بندی.....	۸۱
۵-۲- پیشنهادات.....	۸۲
منابع	
پیوست	
.....	۹۰

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱- معادله‌ی واکنش ترانس استری شدن تری‌گلیسریدها.....	۹
شکل ۲-۱- معادله‌ی واکنش آب با تری‌گلیسرید.....	۱۵
شکل ۳-۱- اثر میزان آب در خوراک بر بازده متیل استر در سه فرآیند کاتالیست بازی، کاتالیست اسیدی و متانول فوق بحرانی.....	۱۶
شکل ۴-۱- تاثیر تتراهیدروفوران بر واکنش تبادل استری روغن mahua.....	۱۷
شکل ۱-۲- انرژی فعال‌سازی در حضور کاتالیست مسیر ۱ و در غیاب کاتالیست مسیر ۲.....	۲۶
شکل ۱-۳- تهیه کاتالیست به روش تلقیح مرطوب.....	۴۱
شکل ۲-۳- دستگاه XRD.....	۵۱
شکل ۱-۴- کروماتوگرام نمونه استاندارد.....	۶۶
شکل ۲-۴- منحنی کالیبراسیون (ضریب شکست - درصد میل استر).....	۶۸
شکل ۳-۴- منحنی کالیبراسیون (ویسکوزیته - درصد متیل استر).....	۶۸
شکل ۴-۴- اثر درصد فاز فعال MgO بر درصد تبدیل نمونه بیودیزل.....	۶۹
شکل ۵-۴- اثر درصد تقویت کننده CaO بر درصد تبدیل نمونه بیودیزل.....	۷۱
شکل ۶-۴- اثر دمای کلسیناسیون بر درصد تبدیل نمونه بیودیزل.....	۷۲
شکل ۷-۴- اثر زمان کلسیناسیون بر درصد تبدیل نمونه بیودیزل.....	۷۳
شکل ۸-۴- اثر زمان واکنش بر درصد تبدیل نمونه بیودیزل.....	۷۴
شکل ۹-۴- اثر درصد وزنی کاتالیست نسبت به روغن بر درصد تبدیل نمونه بیودیزل.....	۷۵
شکل ۱۰-۴- اثرنسبت متانول به روغن بر درصد تبدیل نمونه بیودیزل.....	۷۶
شکل ۱۱-۴- اثر دمای واکنش بر درصد تبدیل نمونه بیودیزل.....	۷۸
شکل ۱۲-۴- طیف FT-IR پیش ساز نانوکاتالیست 6% MgO/Al ₂ O ₃ تقویت شده با کلسیم.....	۸۰
شکل ۱۳-۴- طیف FT-IR نانوکاتالیست 6% MgO/Al ₂ O ₃ تقویت شده با کلسیم.....	۸۰
شکل ۱۴-۴- طیف FT-IR نانوکاتالیست در زمان‌های مختلف کلسیناسیون.....	۸۱
شکل ۱۵-۴- طیف XRD نانوکاتالیست 6% MgO/Al ₂ O ₃ تقویت شده با کلسیم.....	۸۱
شکل ۱۶-۴- تصویر SEM نانوکاتالیست 6% MgO/Al ₂ O ₃ تقویت شده با کلسیم.....	۸۲
شکل ۱۷-۴- اثر دمای کلسیناسیون بر مساحت سطح نانوکاتالیست.....	۸۳
شکل ۱۸-۴- اثر دمای کلسیناسیون بر حجم حفرات نانوکاتالیست.....	۸۳
شکل ۱۹-۴- اثر دمای کلسیناسیون بر قطر حفرات نانوکاتالیست.....	۸۴

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱- خواص شیمیایی روغن‌های گیاهی	۷
جدول ۲-۱- برخی از روش‌های تولید بیودیزل	۱۰
جدول ۳-۱- مشخصات بیودیزل بر اساس استاندارد ASTM D 6751-02	۱۹
جدول ۱-۲- انواع پایه‌های اکسیدی با نقطه ذوب بالا	۳۱
جدول ۱-۳- تکنیک‌های مورد استفاده جهت تعیین خواص شیمیایی سطح کاتالیست	۴۶
جدول ۲-۳- روش‌های منتخب مورد استفاده جهت تعیین خواص فیزیکی کاتالیست	۴۷
جدول ۱-۴- مشخصات روغن خریداری شده	۵۴
جدول ۲-۴- وسایل و دستگاه‌های مورد استفاده	۵۴
جدول ۳-۴- جرم مولکولی ترکیبات استفاده شده	۵۶
جدول ۴-۴- مقدار منیزیم در نمونه‌های سنتز شده	۵۶
جدول ۵-۴- مقدار تقویت کننده کلسیم در نمونه‌های سنتز شده	۵۷
جدول ۶-۴- نتایج اندیس صابونی	۶۰
جدول ۷-۴- توزین	۶۲
جدول ۸-۴- نتایج اندیس اسیدی روغن تصفیه شده	۶۲
جدول ۹-۴- درصد بیودیزل در ۶ نمونه متفاوت	۶۷
جدول ۱۰-۴- نتایج حاصل از اندازه‌گیری ویسکوزیته و ضریب شکست ۶ نمونه متفاوت	۶۷
جدول ۱۱-۴- بررسی اثر درصد فاز فعال در درصد تبدیل و خواص فیزیکی نمونه‌های بیودیزل	۶۹
جدول ۱۲-۴- بررسی اثر درصد تقویت کننده در درصد تبدیل و خواص فیزیکی نمونه‌های بیودیزل	۷۰
جدول ۱۳-۴- بررسی اثر دمای کلسیناسیون در درصد تبدیل و خواص فیزیکی نمونه‌های بیودیزل	۷۱
جدول ۱۴-۴- بررسی اثر زمان کلسیناسیون در درصد تبدیل و خواص فیزیکی نمونه‌های بیودیزل	۷۳
جدول ۱۵-۴- بررسی اثر زمان واکنش در درصد تبدیل و خواص فیزیکی نمونه‌های بیودیزل	۷۴
جدول ۱۶-۴- بررسی اثر درصد وزنی کاتالیست در درصد تبدیل و خواص فیزیکی نمونه‌های بیودیزل	۷۵
جدول ۱۷-۴- بررسی اثر نسبت متانول به روغن در درصد تبدیل و خواص فیزیکی نمونه‌های بیودیزل	۷۶
جدول ۱۸-۴- بررسی اثر دمای واکنش در درصد تبدیل و خواص فیزیکی نمونه‌های بیودیزل	۸۲
جدول ۱۹-۴- مقادیر سطح، حجم و قطر حفره‌ها در دماهای مختلف کلسیناسیون	۸۶

فصل اول

بيوديزل

در قرن گذشته، صنعتی شدن و رشد سریع جمعیت سبب شده است که مصرف سوخت نسبت به بقیه قرن‌ها ۱۰ برابر بیشتر باشد. در حقیقت بخش اصلی مصرف انرژی در فعالیتهای نقل و انتقالات نتیجه شده از سفرها و فعالیتهای تجاری است که سوخت اصلی مصرف شده در این راستا، سوخت‌های بنزین و گازوئیل است که هر دو از مشتقات سوخت‌های فسیلی هستند [۱].

علاوه بر افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی، اثر مهم دیگر استفاده از مشتقات نفتی آلودگی محیط‌زیست مثل هوا، آب و خاک است. در بین آنها آلودگی هوا بدلیل افزایش نواحی شهری آلوده، نگرانی اصلی به شمار می‌رود که تنها انتقالات جاده‌ای مسئول ۸۴٪ از کل انتشارات CO₂ است [۲]. برای کاهش گازهای سمی خروجی آگزوز و همچنین انتشارات تبخیری مضر از وسایل نقلیه، reformulated gasoline به عنوان یک راه حل جایگزین در نظر گرفته شد که تمرکز اصلی بررسی بر محتوای انرژی بالا و انتشار پایین گازهای سمی نظیر NO_x و SO_x است اما نتایج نشان داد که این روش خیلی در کاهش مستقیم انتشار CO₂ موثر نیست [۳].

یکی دیگر از جایگزین‌های سوخت‌های فسیلی، گاز مایع نفتی (LPG)^۱ است که در کاهش انتشار CO₂ تاثیرگذار است اما ذخیره کردن آن و مشکل نقل و انتقالات باعث می‌شود که استفاده از LPG بصورت یک خطر بالقوه باشد. در این راستا به نظر می‌رسد که منابع تجدیدپذیر انرژی راه‌حل بسیار موثرتری برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی برای کاهش انتشار CO₂ و رسیدن به رشد اقتصادی پایدار است [۳].

برق و هیدروژن حامل انرژی هستند و از آنجایی که آنها در طبیعت به صورت آزاد در دسترس نیستند باید آنها از یک منبع انرژی از قبیل منابع حرارتی، انرژی هسته‌ای و منابع تجدیدپذیر تولید شوند. وقتی که آنها از یک منبع انرژی بدون کربن تولید شده باشند، انتشار دی‌اکسید کربن به اتمسفر حذف می‌شود. با این حال، مشکلات فنی و اقتصادی استفاده از منابع تجدیدپذیر برای تولید برق و هیدروژن در مقیاس بزرگ مانند نیروگاه محدود است. عدم وجود تکنولوژی ممکن اقتصادی برای تولید دستگاه‌های ذخیره‌سازی و تولید هیدروژن از منابع تجدیدپذیر، استفاده از سیستم‌های انرژی مبتنی بر هیدروژن را به تاخیر می‌اندازد. علاوه بر این، زیرساخت‌های فعلی برای تحویل سوخت برای هیدروژن مناسب نیست [۴].

برای یک دوره کوتاه، استفاده از مواد خام تجدیدپذیر برای تولید سوخت‌های تجدید شونده مانند بیوالکل‌ها و بیودیزل^۲، برای حمایت از رشد اقتصادی پایدار و همچنین کاهش انتشار دی‌اکسید کربن و گازهای سمی

^۱ . Liquid Petroleum Gas

^۲ . Biodiesel

امیدوارکننده به نظر می‌رسید. برای مثال، الکل‌ها، به خصوص اتانول و متانول تولید شده از منابع بیولوژیکی، می‌توانند به عنوان سوخت یا موادافزودنی سوخت استفاده شوند. وقتی که اتانول در نسبت تراکمی بالاتر در موتورهای احتراق داخلی مورد استفاده قرار می‌گیرد، زمان سوختن کوتاهتر و سوخت بهره‌وری بسیار بهتری از بنزین دارد. در مقابل مشکل استفاده از اتانول محتوای انرژی و عدد ستان کم آن است. علاوه بر این نمی‌توان آن را بطور مستقیم در موتورهای موجود استفاده کرد و می‌بایست اصلاحات ساختاری روی موتورها صورت گیرد [۵]. متانول دارای محدودیت‌های بیشتری نسبت به اتانول است: خورنده، سمی، بی‌رنگ، بی‌بو است و در هنگام سوختن در روشنایی روز نامرئی است. مشابه اتانول چگالی انرژی آن کمتر از بنزین است. اگرچه به نظر می‌رسد که استفاده از الکل‌ها به عنوان سوخت ناکارآمد است اما استفاده از آنها به عنوان افزودنی سوخت روش خوبی برای کاهش انتشار آلودگی است [۳].

امروزه بیودیزل بدلیل تجدیدپذیر بودن، انتشار کمتر گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های محیط‌زیست و زیست-تجزیه‌پذیر بودن به عنوان یک منبع سوخت جایگزین بطور قابل ملاحظه‌ای مورد توجه است [۶،۷]. سوخت بیودیزل از سال‌های ۱۹۰۰ توسط رادلف دیزل مخترع موتور دیزلی مطرح گردید اما بدلیل حضور فراوان و ارزان منابع فسیلی تا به امروز مسکوت ماند. امروزه با درک خطرات آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی، افزایش قیمت و انحصاری بودن سوخت‌های فسیلی، استفاده از سوخت‌های زیستی بویژه بیودیزل بیشتر شده است [۸]. رادلف دیزل اولین شخصی بود که روغن‌های گیاهی را در موتور احتراق داخلی مورد آزمایش قرار داده بود. بعدها فهمید که مشکلات زیادی برای استفاده مستقیم از روغن‌های گیاهی در موتور دیزلی وجود دارد. اول، تزریق و اتمی شدن این نوع از سوخت بدلیل ویسکوزیته بالای روغن‌ها بویژه چربی‌ها در مقایسه با سوخت دیزل معمولی با موفقیت به دست نمی‌آید. دوم، جرم مولکولی بالای تری‌گلیسرید و دیگر ترکیبات آن که نتیجه آن احتراق ناقص سوخت بدلیل فراریت پایین آن است. سوم، رسوب کربن تشکیل شده در طول احتراق ناقص که سبب گرفتگی سیستم تزریق، شکستن رینگ‌های پیستون و همچنین غلیظ شدن روغن موتور به عنوان نتیجه آلودگی بوسیله‌ی روغن‌هاست که مشکل اصلی موتور است. برای مقابله با مشکل عموماً از پیرولیز استفاده می‌شد که باعث کاهش ارزش حرارتی و گاهی تولید بنزین به جای دیزل می‌شود. سرانجام اصلاح ساختار شیمیایی روغن‌های گیاهی توسط واکنش ترانس-استریفیکاسیون موجب گردید تا محصول دارای خواصی بسیار نزدیک و در بعضی موارد بهتر از دیزل شود [۹،۱۰].

۱-۲- بیودیزل

بر اساس تعریف ASTM (استادارد شناسایی بیودیزل در ایالات متحده آمریکا) بیودیزل عبارتست از "مونوآلکیل استرهای با زنجیر بلند که از مواد خام چرب تجدیدپذیر نظیر روغن‌های گیاهی یا چربی‌های حیوانی تهیه می‌گردد". عبارت "Bio" نماد تجدیدپذیری و منشأ زیستی آن و عبارت "Diesel" نماد شباهت آن به سوخت دیزلی و کاربرد آن در موتورهای دیزلی است [۱۱].

بیودیزل عبارتست از مخلوطی از استرهای مونوآلکیلی زنجیر بلند اسیدهای چرب حاصل از واکنش الکل با روغن. سنتز بیودیزل شامل واکنش تری‌گلیسرید با الکل توسط واکنش ترانس‌استری شدن می‌باشد که منجر به تولید متیل استرهای چرب و گلیسرین می‌شود. از مزایای آن می‌توان به روانسازی بهتر، انتشار کمتر آلاینده‌ها از قبیل دوده، ذرات ریز، مونوکسید کربن، دی‌اکسید نیتروژن، دمای جوش بالا، تجدیدپذیری و زیست‌تجزیه پذیری و از همه مهمتر کاهش تجمع گازهای گلخانه‌ای نظیر دی‌اکسید کربن و... اشاره کرد [۵, ۱۲].

روغن‌های مورد استفاده شامل روغن خوراکی مثل روغن آفتابگردان، سویا، روغن دانه‌ی شلغم و روغن‌های غیرخوراکی مثل Karanja, Jatropha و چربی‌های حیوانی و نیز روغن مصرف شده می‌باشد [۱۳]. در واکنش ترانس‌استری شدن از الکل‌های متانول، اتانول، بوتانول، پروپانول و آمیل الکل‌ها می‌توان استفاده کرد. اما بیشتر از متانول و اتانول استفاده می‌شود. متانول به سرعت با تری‌گلیسرید واکنش می‌دهد و کاتالیست‌های قلیایی به آسانی در آن پخش می‌شوند، به همین دلیل اصطلاح "متیل استرهای اسید چرب" یا "FAME"^۱ برای بیودیزل بکار می‌رود [۹, ۱۴].

۱-۳- مزایا و معایب بیودیزل

بیودیزل به عنوان سوخت دیزلی که قابلیت حمل و نقل ایمن، استفاده آسان، بازده احتراق بالا، انتشار کمتر آلودگی‌ها، عدم مسمومیت، قدرت روان‌کنندگی و فراریت کمتر را داراست. بیودیزل با خاصیت روان‌کنندگی بهتر نسبت به دیزل فسیلی استفاده از عمر مفید موتور را افزایش می‌دهد [۱۵]. بدلیل عدم حضور ترکیبات گوگردی و آروماتیکی انتشار آلودگی مربوطه منتفی است [۱۶].

ایمنی، تجزیه‌پذیری زیستی و سمیت پایین از ویژگی‌های مهم یک سوخت به حساب می‌آید. بررسی‌های انجام شده روی زیست تجزیه پذیری بیودیزل نشان‌دهنده اینست که بیودیزل و مخلوط‌های دیزلی در محیط

^۱ . Fatty Acid Methyl Ester

آبی ۷۷ و ۸۶ درصد است در حالیکه برای سوخت دیزل پایه نفتی این مقدار فقط ۱۸/۲ درصد بوده است. بنابراین به عنوان سوختی جایگزین، بسیار تجزیه پذیر و دوستدار محیط زیست است [۱۷].

از دیگر مزیت های بیودیزل عدد ستان بالاتر (در حدود ۵۰) نسبت به سوخت دیزلی است. عدد ستان یک شاخص معمول مورد استفاده برای تعیین کیفیت سوخت دیزلی بویژه ویژگی احتراق سوخت است که به عنوان آمادگی سوخت برای احتراق، وقتی که به داخل موتور تزریق می شود در نظر گرفته می شود. ویژگی احتراق یکی از خواص بیودیزل است که بوسیله ساختار اجزای FAME تعیین می شود [۱۸، ۱۹].

بیودیزل نسبت به سوخت دیزلی فواید ایمنی بیشتری دارد. بدلیل اینکه نقطه اشتعال بیودیزل (در حدود ۴۲۳K) در مقایسه با سوخت های فسیلی (در حدود ۳۵۰K) بالاتر و قابلیت احتراق آن کمتر است [۱۲، ۱۵]. بیش از ۸۰٪ انرژی مورد نیاز در دنیا توسط سوخت های تجدیدناپذیر فسیلی تهیه می شود که استفاده از این منابع باعث افزایش گازهای گلخانه ای موجود در اتمسفر می شود. بیودیزل به عنوان یک سوخت که انتشار گازهای گلخانه ای و سمی نظیر NO_x و SO_x بسیار کمتری دارد، می تواند جایگزین بسیار مناسبی برای سوخت های فسیلی باشد [۱۱]. با توجه به اینکه روغن های پس ماند خوراکی منبع مناسبی برای تولید بیودیزل می باشند و اینکه سالانه مقادیر بسیار بالایی روغن های پسماند در منازل و رستوران ها تولید و در محیط زیست رها می شود بنابراین استفاده از این منابع هم به دلیل قیمت پایین آنها، سبب کاهش قیمت بیودیزل تولیدی می شود و هم مشکل دفع آنها به محیط زیست را حل می کند [۲۰].

از مضرات اصلی بیودیزل به عنوان یک سوخت دیزلی محتوای انرژی پایین آن، نقطه ابری شدن بالاتر، انتشار اکسید نیتروژن، سرعت و قدرت موتور پایین تر و گرمایش موتور است [۱۲، ۱۵]. مشکل اصلی بیودیزل قیمت بالای آن است. به دلیل اینکه ماده خام مورد استفاده در تهیه بیودیزل بیشتر روغن های گیاهی تصفیه شده است و تعیین کننده قیمت بیودیزل، قیمت ماده خام اولیه آن است، قیمت بیودیزل نسبت به سوخت های فسیلی بسیار بالاتر است. به همین دلیل در حال حاضر بیودیزل نمی تواند بطور کامل جایگزین سوخت های فسیلی شود [۸، ۲۱]. البته می توان با استفاده از روغن های پس ماند خوراکی یا روغن های غیر خوراکی قیمت آن را کاهش داد [۲۰].

۱-۴- منابع موجود در تولید بیودیزل

بطور کلی موادخام اولیه بیودیزل به سه گروه دسته بندی می شود: روغن های گیاهی (خوراکی و غیرخوراکی)، چربی های حیوانی و استفاده از روغن های پس مانده [۲۰]. مبنای انتخاب ماده خام، قیمت و موجودیت آن است [۸]. قیمت بیودیزل یک عامل اقتصادی بسیار مهم در فرآیند تولید بیودیزل است. بر طبق

برخی از تحقیقات در حدود ۹۵-۷۰٪ از کل هزینه‌های تولید بیودیزل از قیمت ماده خام اولیه نتیجه می‌شود. بدلیل اینکه ماده خام اولیه، هزینه قابل توجهی برای تولید بیودیزل دارد بنابراین انتخاب ماده خام اولیه مناسب از نظر اقتصادی بسیار مهم است [۲۲].

روغن‌های نباتی تصفیه شده بهترین ماده خام است چون در فرآیند تولید، سریع به بیودیزل تبدیل می‌شود [۲۲]. بطور کلی در سراسر جهان، ۵۹٪ از منابع خام تولید بیودیزل را روغن کلزا تشکیل می‌دهد و در ادامه، سویا ۲۵٪، روغن خرما ۱۰٪، روغن آفتابگردان ۵٪ و دیگر منابع ۱٪ تولید بیودیزل در جهان بشمار می‌آیند [۲۳]. رشد سریع جمعیت جهان و افزایش سوخت‌های بیو، سبب افزایش تقاضای جهانی برای غذا و سوخت‌های بیو شده است. همچنین قیمت بالای روغن‌های خوراکی سبب شده است که محققان برای یافتن منابع غیرخوراکی و ارزان‌تر، در حال بررسی منابع دیگر برای تولید بیودیزل می‌باشند [۲۴].

روغن‌های گیاهی غیرخوراکی وجود دارند که می‌توان از آنها به عنوان منابع خام اولیه امید بخشی برای تولید بیودیزل استفاده کرد. در کشورهای در حال توسعه، استفاده از روغن‌های غیرخوراکی در مقایسه با روغن‌های خوراکی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است، بدلیل تقاضای فوق‌العاده برای روغن‌های خوراکی به غذا و اینکه در حال حاضر روغن‌های خوراکی برای استفاده به عنوان سوخت بسیار گرانقیمت می‌باشند [۲۵]. در سراسر جهان مقدار زیادی از گیاهان روغنی غیر خوراکی در طبیعت وجود دارد [۱۵]. تولید بیودیزل از دانه‌های روغنی غیرخوراکی مختلف در طول چند سال گذشته بطور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. به برخی از این روغن‌های غیرخوراکی نظیر: Karanja (ponogamia, Jatropha tree (jatropha curcas), rubber plant, neem, mahua, rice bran, tobacco seed (nicotiana tabacum L.), pinnata) microalgae, linseed, castor و ... می‌توان اشاره کرد [۱۲]. بطور مثال دانه‌های روغنی Jatropha و Karanja به ترتیب دارای ۴۰٪ و ۳۳٪ روغن در دانه‌های آن است که به دلیل مسمومیت آنها خوراکی نیستند [۸]. در تحقیقی با کاتالیست KOH برای روغن‌های Jatropha و Karanja به ترتیب تبدیل ۹۰ تا ۹۵٪ و ۸۰ تا ۸۵٪ به دست آمده است [۲۶].

تولید بیودیزل از روغن‌های پسماند پخت‌وپز برای جایگزینی نفت دیزلی، یکی از اقدامات موثر برای حل مشکلات آلودگی محیط زیست و کمبود منابع انرژی است [۲۷]. به منظور کاهش هزینه‌های تولید، روغن‌های پسماند یک انتخاب خوب به عنوان ماده خام اولیه برای تولید بیودیزل است. قیمت روغن‌های پسماند ۲-۳ برابر ارزان‌تر از روغن‌های گیاهی است [۲۸]. روغن‌های پسماند با توجه به محتوای اسیدهای چرب آزاد^۱ (FFA) طبقه بندی شده‌اند. برای مثال اگر درصد FFA موجود در روغن پسماند کمتر از ۱۵٪ باشد "گریس زرد"^۲ و در غیر این صورت "گریس قهوه‌ای"^۱ نامیده می‌شوند [۲۹]. امروزه در دنیا سالانه مقادیر

^۱ . Free Fatty Acid

^۲ . yellow grease

بسیار زیادی دانه‌های روغنی تولید می‌شود که مقدار زیادی از آنها برای سرخ کردن مصرف می‌شود. مقادیر زیادی از روغن‌های پسماند بطور غیرقانونی در رودخانه‌ها و محل‌های دفع زباله ریخته می‌شود که سبب آلودگی محیط‌زیست می‌شود. بنابراین استفاده از روغن‌های پسماند برای تولید بیودیزل به عنوان جایگزین سوخت دیزلی، به دلیل کاهش آلودگی محیط‌زیست و قیمت پایین، مزایای قابل توجهی دارد [۳۰].

بطور کلی چربی‌ها و روغن‌ها، نامحلول در آب و موادی آب‌گریز می‌باشند که معمولاً تری‌گلیسرید نامیده می‌شوند. اسیدهای چرب در طول زنجیره کربنی و تعداد باندهای دوگانه غیراشباع با یکدیگر متفاوت‌اند. اسیدهای چربی که در روغن‌های گیاهی یافت می‌شوند، در جدول ۱-۱ لیست شده‌اند. در این جدول، اعداد موجود در ردیف دوم مشخص‌کننده اسیدهای چرب متفاوت موجود در روغن است؛ عدد اول بیانگر تعداد کربن‌ها و عدد دوم بیانگر تعداد پیوندهای دوگانه است [۹].

جدول ۱-۱- خواص شیمیایی روغن‌های گیاهی [۹،۳۱]

عدد اسیدی	ترکیب درصد وزنی اسید چرب									روغن گیاهی
	C _{18:3}	C _{18:2}	C _{22:1}	C _{18:1}	C _{24:0}	C _{22:0}	C _{20:0}	C _{18:0}	C _{16:1}	
۰/۱۱	۰/۴۸	۶۰/۶۰	۰/۰۰	۲۵/۱۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۴	۱/۸۵	۱/۶۷	ذرت
۰/۰۷	۰/۰۰	۵۷/۵۱	۰/۰۰	۱۳/۲۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۸۹	۲۸/۳۳		پنبه دانه
۰/۳۶	۶/۸۵	۹/۰۰	۵۸/۵۱	۱۸/۸۶	۱/۱۲	۰/۸۰	۲/۰۹	۰/۷۰	۲۰/۷	crame
۰/۲۰	۰/۹۳	۳۱/۸۵	۰/۰۰	۴۸/۲۸	۱/۲۳	۲/۵۲	۱/۳۲	۲/۳۹	۱/۳۸	بادام زمینی
۱/۱۴	۸/۲۳	۲۲/۳۰	۰/۰۰	۶۴/۴۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۸۵	۳/۴۹	کلزا
۰/۲۰	۶/۳۱	۵۵/۵۳	۰/۰۰	۲۳/۲۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳/۱۵	۱/۷۵	سویا
۰/۱۵	۰/۰۰	۷۳/۷۳	۰/۰۰	۱۶/۹۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۳/۲۶	۶/۰۸	آفتابگردان

۱-۵- روش‌های تولید بیودیزل

۱-۵-۱- روش اختلاط مستقیم

استفاده مستقیم از روغن‌های گیاهی در موتور دیزلی مشکل و مسئله‌دار است. طی دو دهه گذشته، تحقیقات وسیعی در این زمینه انجام شده است. با وجود اینکه برخی از موتورهای دیزلی می‌توانند با روغن‌های گیاهی خالص عمل کنند ولی در موتورهای احتراق مستقیم از قبیل کامیون‌ها مشکلات زیادی به وجود می‌آید. محتوای انرژی روغن‌های خالص گیاهی و سوخت دیزلی یکسان است [۳۲].

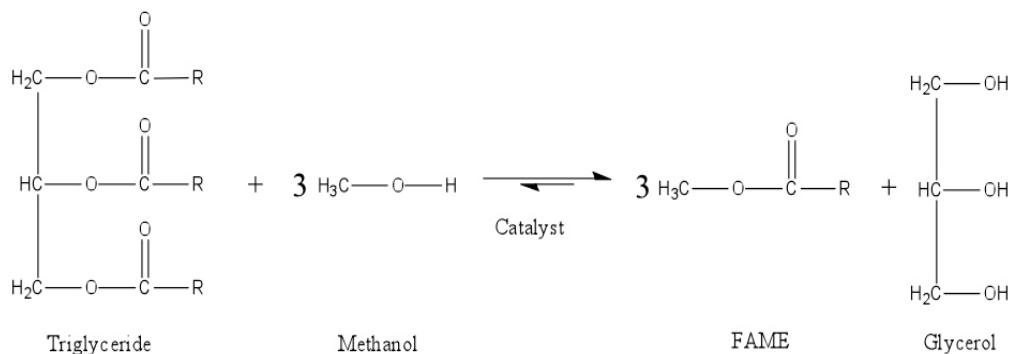
¹ . brown grease

۱-۵-۲- روش میکروامولسیون^۱

میکروامولسیون ذرات معلق کلوئیدی نوری ایزوتروپی هستند که معمولا ابعاد آنها در حدود ۱۵۰-۱ نانومتر است. اینها از دو محلول غیرقابل امتزاج و یک یا بیشتر امفوفیل‌های غیر یونی یا یونی تشکیل یافته‌اند. میکروامولسیون‌ها به منظور حل مشکلات ویسکوزیته بالای روغن‌های گیاهی خالص، با کاهش دادن ویسکوزیته روغن‌ها با حلال‌هایی از قبیل الکل‌های ساده طراحی شده‌اند. عملکرد یونی و غیر یونی میکروامولسیون‌ها نزدیک به سوخت دیزلی است در یک مدت آزمایش کوتاه آنها، مشخصات پاششی خوبی را با تبخیر انفجاری که خصوصیات احتراق را بهبود بخشیده است از خود نشان داده‌اند و در زمان طولانی از آزمایش هیچ زوال قابل توجهی در عملکرد مشاهده نشد. هر چند که چسبیدن قابل توجه سوزن انژکتور، رسوبات کربنی، احتراق ناقص و افزایش ویسکوزیته روغن گزارش شده بود [۹,۳۳].

۱-۵-۳- روش ترانس استری شدن^۲

ترانس استری شدن یا الکی شدن عبارتست از جایگزینی الکل از یک استر بوسیله دیگری در فرآیندی مشابه هیرولیز به استثنای اینکه بجای آب از الکل استفاده می‌شود. این فرآیند بطور گسترده‌ای برای کاهش ویسکوزیته بالای تری‌گلیسریدها استفاده می‌شوند. اگر در فرآیند تبادل استری از متانول استفاده شود، متانولیز نامیده می‌شود. متانولیز تری‌گلیسریدها در شکل ۱-۱ ملاحظه می‌گردد.



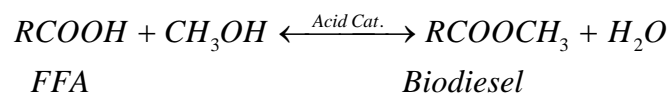
شکل ۱-۱- معادله‌ی واکنش ترانس استری شدن تری‌گلیسریدها [۳۴].

ترانس استری شدن، واکنش چربی یا روغن با یک الکل در حضور کاتالیست مناسب برای تشکیل استر و گلیسرین است. کاتالیست معمولا برای بهبود بخشیدن به سرعت و بهره‌وری واکنش استفاده می‌شود. کاتالیست‌های اسیدی و بازی بخوبی کاتالیست‌های آنزیمی بکار گرفته می‌شوند. کاتالیست‌های قلیایی همگن نظیر NaOH و KOH معمولا ترجیح داده می‌شوند زیرا نسبت به دیگر کاتالیست‌ها کارآمدتر هستند و نسبت به

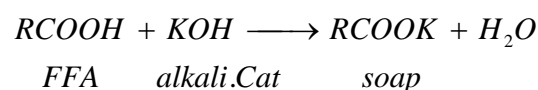
¹ . Micro-emulsion

² . Transesterification

کاتالیست‌های اسیدی خوردگی کمتری دارند. کاتالیست‌های اسیدی (شایع‌ترین استفاده از اسید سولفوریک) نسبت به اسیدهای چرب آزاد حساس نیستند اما نیازمند دمای واکنش بالا و زمان واکنش طولانی می‌باشند برای مثال، ۹۹٪ تبدیل روغن با استفاده از ۱٪ مول از اسید سولفوریک در ۵۰ ساعت تحت شرایط نسبت متانول به روغن ۳۰:۱ و دمای واکنش ۶۵°C بدست آمده است [۳۵]. بدلیل اینکه واکنش برگشت پذیر است، برای انتقال واکنش به سمت راست و تولید متیل استر بیشتر، از الکل اضافی استفاده می‌شود. الکل‌های مورد استفاده، ساده و یا الکل‌های آلیفاتیک مونوهیدریک با اتم‌های ۸-۱ می‌باشند. از میان الکل‌ها، متانول، اتانول، پروپانول، بوتانول و آمیل الکل قابل استفاده در واکنش تبادل استری می‌باشند اما بیشتر از متانول و اتانول استفاده می‌شود. متانول بدلیل قیمت ارزان، خواص فیزیکی و شیمیایی (نظیر قطبی بودن و کوتاه زنجیر بودن) به اتانول ترجیح داده می‌شود. متانول به سرعت با تری گلیسرید واکنش می‌دهد. بدلیل اینکه واکنشگرها در دو فاز غیرممزوج قرار دارند، در طول واکنش اختلاط شدید واکنشگرها لازم است و همچنین حضور کاتالیست اسید یا باز قوی میزان تبدیل را بهبود می‌بخشند. همچنین این فرآیند بسیار به حضور اسیدهای چرب آزاد و رطوبت حساس است، در صورتی که روغن دارای اسیدهای چرب آزاد زیاد باشد، اسیدهای چرب در حضور کاتالیست اسیدی طی واکنش استری شدن به بیودیزل تبدیل می‌شود [۱۴]:



هنگامی که در حضور اسیدهای چرب آزاد (بیش از ۰/۵٪ وزنی) از کاتالیست‌های قلیایی استفاده شود، طبق واکنش زیر کاتالیست مصرف شده و صابون تشکیل می‌شود [۹،۲۰]:



با انجام واکنش صابونی شدن از سویی کاتالیست مصرف می‌گردد و از سوی دیگر صابون ناخالصی است که باید حذف گردد. همچنین تشکیل آب باعث تضعیف واکنش استری شدن می‌شود. انحلال صابون در فاز گلیسرول موجب افزایش انحلال بیودیزل در گلیسرول و دشواری‌های جداسازی و خالص‌سازی محصول می‌شود [۲۰]. در جدول ۱-۲ مقایسه‌ای بین روش‌های مختلف تولید بیودیزل بیان شده است [۱۲].

جدول ۱-۲ برخی از روش‌های تولید بیودیزل [۱۲].

مشکلات استفاده در موتور	مضرات	فواید	تعریف	روش‌ها
تشکیل کک احتراق ناقص سوخت رسوب کربن شکستن رینگ و تغلیظ روغن موتور	ویسکوزیته بالا فراریت پایین واکنش پذیری پایین شاخه- های هیدروکربنی اشباع- نشده	طبیعت مایع-قابل حمل- محتوای انرژی (۸۰٪ از سوخت دیزلی)-در دسترس-تجدیدپذیر	استفاده بطور مستقیم بعنوان سوخت دیزلی یا مخلوط با سوخت دیزلی	استفاده مستقیم و مخلوط
احتراق ناقص رسوب کربن افزایش ویسکوزیته روغن موتور	عدد ستان پایین تر محتوای انرژی کمتر	پاشندگی بهتر در طول احتراق ویسکوزیته سوخت پایین تر	ذرات معلق کلوئیدی نوری ایزوتروپی که معمولاً ابعاد آنها در حدود ۱۵۰-۱ نانومتر	میکروامولسیون
-	دفع محصولات تولید شده (گلیسرول و فاضلاب)	تجدیدپذیری، عدد ستان بالا، انتشار آلودگی کمتر، بازده احتراق بالاتر	واکنش چربی یا روغن با یک الکل در حضور کاتالیست برای تشکیل استر و گلیسرول	تبادل استری

۱-۳-۵-۱- کاتالیست‌های فرآیند تبادل استری

کاتالیست‌های مورد استفاده در فرآیند تبادل استری بطور کلی به سه دسته اسیدی، بازی و آنزیمی تقسیم می‌شوند.

کاتالیست‌های اسیدی: کاتالیست‌های اسیدی مورد استفاده در واکنش ترانس‌استری شدن شامل اسید سولفوریک، اسید فسفریک، اسید هیدروکلریک و اسید سولفونیک آلی می‌باشد. اگرچه واکنش تبادل استری با کاتالیست‌های اسیدی بسیار آهسته‌تر از کاتالیست‌های بازی است اما برای گلیسریدهایی که حاوی مقادیر زیاد اسیدهای چرب آزاد و آب می‌باشند بسیار مناسب است [۱۰]. بطور کلی کاتالیست‌های اسیدی تاثیر زیادی از حضور اسید چرب آزاد در خوراک نمی‌پذیرند. کاتالیست‌های اسیدی می‌تواند هر دو واکنش اسیدی شدن و تبادل استری را باهم انجام دهد. بنابراین در یک فرآیند که در آن خوراک حاوی مقادیر زیاد از اسیدهای چرب آزاد است می‌توان در مرحله اول از کاتالیست اسیدی برای پیش استری شدن^۱ و در مرحله دوم از کاتالیست‌های بازی برای تبادل استری استفاده کرد [۳۶].

علی‌رغم عدم حساسیت کاتالیست‌های اسیدی به اسید چرب آزاد و جلوگیری از تشکیل صابون که آن را کاتالیست مهمی کرده است اما برای بدست آوردن تبدیل بالاتر تری گلیسرید به بیودیزل با استفاده از این

^۱ . Pre-esterification

کاتالیست‌ها نیاز به دما و فشار بالاتری نسبت به کاتالیست‌های بازی است زیرا فعالیت آنها در واکنش تبادل استری پایین است [۳۷].

کاتالیست‌های اسیدی ناهمگن نظیر رزین‌های جامد، زئولیت‌ها، اکسیدهای تنگستن، سولفات زیرکونیا و ... برای موارد خوراک ناخالص پیشنهاد می‌شود. فازهای بلوری مناسب، اندازه مناسب حفرات، میزان اسیدیته مناسب از عوامل موثر بر راندمان استری شدن است. کاتالیست‌های جامد اسیدی در جایگزین شدن به جای اسیدهای مایع قوی در راستای حذف مسائل خوردگی و آلودگی محیط‌زیستی که توسط کاتالیست‌های اسیدی مایع قوی ایجاد می‌شود حائز اهمیت هستند [۳۸].

کاتالیست‌های بازی: کاتالیست‌های قلیایی مورد استفاده در واکنش ترانس استری شدن شامل هیدروکسیدها (KOH, NaOH)، کربنات‌ها، آلکوکسیدهایی نظیر متوکسید سدیم، اتوکسید سدیم و ... می‌باشد. واکنش استری شدن با کاتالیست بازی ۴۰۰ بار سریعتر از کاتالیست اسیدی با همان شرایط یکسان، پیشرفت می‌کند. بنابراین اغلب استفاده تجاری دارند [۹]. مشکل اصلی موجود در ترانس استری شدن کاتالیست‌های بازی، مربوط به میزان اسید چرب آزاد موجود در خوراک است، زیرا روغن‌هایی که میزان اسید چرب آزاد آنها زیاد است با کاتالیست‌های بازی واکنش می‌دهند و تولید صابون می‌کنند که بازده تولید بیودیزل را کاهش می‌دهد و مانع از جداسازی کامل بیودیزل و گلیسرول می‌شود. به‌رحال جداسازی این کاتالیست‌ها مشکلات تکنیکی ایجاد کرده و هزینه‌های اضافی به سیستم تحمیل می‌کند [۳۹].

آلکوکسیدهای فلزات قلیایی مانند آلکوکسید سدیم یکی از فعال‌ترین کاتالیست‌هایی است که در صنایع و آزمایشگاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. آنها بازده بسیار بالا (>۹۸٪) در زمان کوتاه (۳۰ دقیقه) و غلظت پایین دارند [۹]. همچنین اکسید و هیدروکسیدهای فلزات قلیایی خاکی، هیدروکسید و نمک فلزات قلیایی بر پایه آلومینا، زئولیت، هیدروکسیدها و ... مورد بررسی قرار گرفته‌اند و خبر از توانایی کم انواع ناهمگن نسبت به قلیایی همگن داده‌اند. کاتالیست‌های قلیایی ناهمگن نظیر MgO، CaO، SrO و ZnO دارای تبدیل بین ۹۰ تا ۹۵٪ گزارش شده‌اند [۴۰]. قدرت بازی اکسیدهای و هیدروکسیدهای گروه دوم به ترتیب Ba > Sr > Ca > Mg افزایش می‌یابد. در این میان کاتالیست‌های بازی مشتق شده از کلسیم و منیزیم بیشتر ترجیح داده می‌شوند زیرا ارزان‌تر، غیرسمی، عدم فرسایش و حلالیت کمی در متانول دارند [۴۱]. پایه آلومینا بدون بارگذاری هیچ بازدهی در تولید متیل استر و گلیسرول ندارد و بازده آن پس از ۱۲ ساعت و در دمای ۴۳۳ K به ۷٪ می‌رسد. در حالیکه آلومینای بارگذاری شده با استفاده از کربنات لیتیم، فلورید پتاسیم و هیدروکسید سدیم بازدهی بالایی در تولید متیل استر و گلیسرول در ۱ ساعت و دمای ۳۳۳K دارد. این موضوع ثابت می‌کند که پایه‌های متخلخل با بارگذاری توسط نمک موثر واقع می‌شوند [۴۲].