

مروری بر زیست‌دیزل از روغن کرچک و بررسی پارامترهای مؤثر بر تولید

رئوف فروتن^۱، حسین اسماعیلی^{*۲}

۱- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

۲- دانشکده مهندسی شیمی، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۲۷

پیام‌نگار: esmaeili.hossein@iaubushehr.ac.ir

چکیده

امروزه، به دلیل افزایش جمعیت جهان، افزایش آلودگی‌های زیست محیطی، افزایش بهای نفت و کاهش ذخایر نفتی، پژوهش‌های زیادی در زمینه یافتن منابع سوختی مناسب و زیست سازگار انجام می‌شود. زیست‌دیزل یکی از منابع سوختی مناسب است که می‌تواند به جای سوخت‌های فسیلی چون نفت، گازوئیل و زغال سنگ مصرف شود. سوخت‌های فسیلی منابعی محدودند و باعث آلودگی‌های زیست محیطی می‌شوند، در حالی که زیست‌دیزل از منابع تجدیدپذیر و زیست سازگار تولید می‌شود و مقدار گازهای گلخانه‌ای گسیل شده از زیست‌دیزل در مقایسه با سوخت‌های فسیلی ناچیز است. برای تولید زیست‌دیزل از منابع مختلفی می‌توان سود جست. امروزه، برای تولید زیست‌دیزل، اغلب از فرایند استری شدن در حضور کاتالیست‌های مختلف قلیایی، اسیدی و آنزیمی و یک الکل (اتانول، متانول، پروپانول و بوتانول) استفاده می‌شود. در این مطالعه مروری، پارامترهای مؤثر بر تولید زیست‌دیزل نظیر دمای فرایند، زمان، نسبت الکل به روغن، درصد کاتالیست در حضور کاتالیست‌های قلیایی با استفاده از روغن کرچک بررسی می‌شود.

کلیدواژه‌ها: زیست‌دیزل، فرایند استری شدن، روغن کرچک، کاتالیست‌های قلیایی.

۱. مقدمه

و در مقایسه با سوخت‌های فسیلی گازهای کمتری منتشر می‌کند [۳-۴]. زیست‌دیزل در سراسر دنیا منبع سوختی عمومی به شمار نمی‌رود زیرا در مقایسه با سوخت‌های فسیلی و بهای آن بیشتر است و از مشکلات عمده آن در بازار می‌توان در دسترس نبودن منابع ارزان قیمت را نام برد [۵]. از منابع اولیه تولید زیست‌دیزل می‌توان انواع روغن‌ها مانند کرچک، آفتاب گردان، کنجد، سویا، جاتروپا و روغن‌هایی دیگر را نام برد که در شکل (۱) نمایی از منابع مختلف برای تولید زیست‌دیزل را مشاهده می‌کنید [۶].

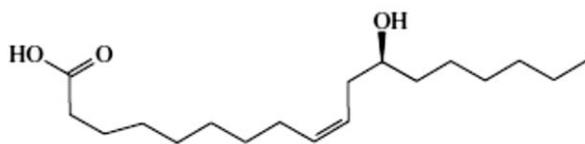
بر اثر کاهش ذخایر نفتی جهان و افزایش نگرانی‌های زیست محیطی، تقاضا برای جایگزینی منابع سوختی مناسب به جای سوخت‌های فسیلی مانند نفت و گازوئیل پدیده شده است [۱]. زیست‌دیزل منبع سوختی پاک است که از منابع تجدیدپذیری چون روغن‌های گیاهی، چربی‌های حیوانی و روغن‌های زائد تولید می‌شود [۲]. این منبع سوختی زیست تجزیه‌پذیر و غیر سمی است

* استادیار مهندسی شیمی

اما هم به صورت خودرو در جنگل و هم به صورت کشت شده در کشورهای دارای آب و هوای گرم و نواحی بین دو مدار که آب و هوای گرم دارند، رشد می‌کند. این گیاه در جنوب ایران و در استان بوشهر نیز به طور گسترده‌ای رشد می‌کند. در شکل (۲) نمایی از گیاه کرچک را در مرحله رشد مشاهده می‌کنیم. دانه گیاه کرچک معمولاً دارای ۴۰٪ تا ۵۰٪ روغن است که برای تولید روغن نسبت به دانه‌های روغنی دیگری چون آفتاب گردان، خرما، دانه انگور و سویا، دارای امکان بالقوه زیادی است [۱۲]. ترکیب روغن کرچک بین ۸۰٪ تا ۹۰٪ شامل ریسینولئیک اسید^۲ است که باعث می‌شود گرانروی این روغن بالا باشد. در شکل (۳) ساختار این اسید نمایش داده شده است. گرانروی بالای روغن کرچک باعث شده است که این روغن برای تولید زیست‌دیزل نامناسب باشد. روغن کرچک در الکلهای اتر، استیک اسیدهای سرد^۳، کلروفرم، کربن سولفید و بنزن به راحتی حل نمی‌شود [۱۳].



شکل ۲. نمایی از گیاه کرچک در دوران رشد [۱۱].



شکل ۳. ساختار شیمیایی ریسینولئیک اسید [۱۴].

2. Ricinoleic Acid
3. Glacial



شکل ۱. نمودار از منابع مختلف برای تولید زیست‌دیزل.

انجمن آمریکایی آزمایش و مواد (ASTM)، سوخت زیست‌دیزل را به صورت مونو آلکیل استر اسیدهای چرب با زنجیره‌های کوتاه تعریف می‌کند که از چربی‌های تجدید پذیر مانند روغن‌های گیاهی و چربی‌های حیوانی تولید می‌شود. پیشوند زیست (bio) حاکی از تجدیدپذیر و زیستی بودن منابع در برابر سوخت‌های سنتی است، و دیزل بیانگر مصرف آن به عنوان سوخت موتور است [۷]. زیست‌دیزل ترکیب متیل استر اسیدهای چرب (FAMES) است که از واکنش ترانس استری شدن تری گلیسرید با متانول تولید می‌شود [۸]. فرایند به‌کار رفته برای تبدیل روغن به زیست‌دیزل ترانس استری شدن نام دارد [۹] که در آن روغن در حضور یک الکل و یک کاتالیست قلیایی، اسیدی یا آنزیمی به زیست‌دیزل تبدیل می‌شود. زیست‌دیزل تولیدی می‌تواند خالص و یا به صورت ترکیب با سوخت تجاری مصرف شود. در تولید زیست‌دیزل پارامترهایی چون نسبت متانول به روغن، دمای واکنش، زمان واکنش، نوع و مقدار کاتالیست مؤثرند [۱۰].

هدف از این بررسی، مطالعه پارامترهای مؤثر در تولید زیست‌دیزل و خواص آن است. در این مطالعه روغن کرچک به عنوان منبعی مناسب برای تولید زیست‌دیزل انتخاب شد و پارامترهای مؤثر در تولید زیست‌دیزل بررسی شده است.

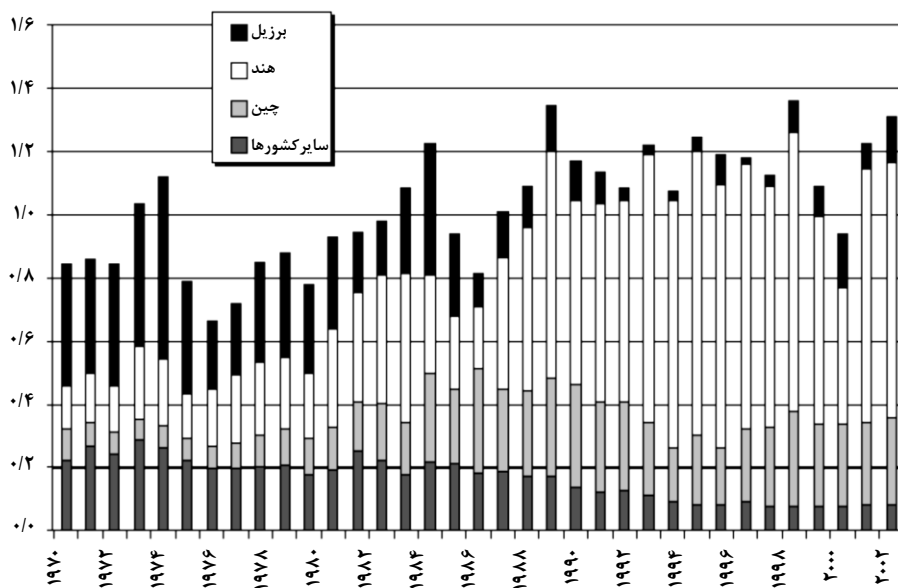
۲. گیاه کرچک

گیاه کرچک به خانواده ویژه ای از گل آتشی^۱ تعلق دارد و آن را معمولاً گیاه روغنی کرچک می‌نامند. خاستگاه این گیاه آفریقا است

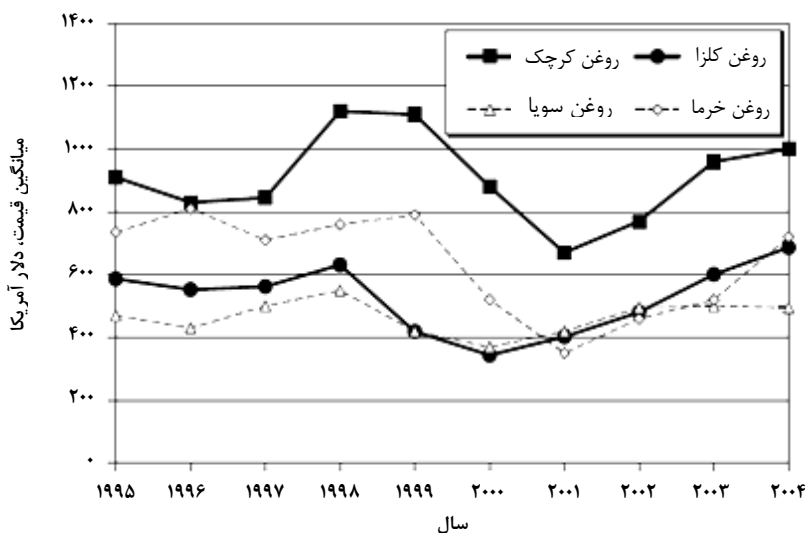
1. Euphorbiaceae

مشاهده می‌کنید [۱۱]. به این ترتیب، این گیاه می‌تواند منبع مناسبی برای تولید زیست‌دیزل به شمار آید زیرا نسبت به دانه‌های روغنی دیگر حجم تولید روغن آن بیشتر است و نیز این گیاه در تمام مناطق گرمسیری توانایی رشد و پرورش دارد. در شکل (۵)، ارزش این گیاه در مقایسه با سایر دانه‌های روغنی در کشور آلمان مشاهده می‌شود [۱۱].

دانه گیاه کرچک همه ساله حدود ۱ میلیون تن در هند، چین و برزیل به عنوان محصول اصلی تولید می‌شود. بنابراین، این گیاه در نواحی گرمسیری به راحتی رشد می‌کند [۱۵]. سازمان جهانی خواروبار و کشاورزی (FAO) میزان تولید این گیاه را تا سال ۲۰۰۴ گزارش داده است که حاکی از تولید روز افزون این گیاه در سراسر جهان است. در شکل (۴) نمودار میزان تولید جهانی گیاه کرچک را



شکل ۴. تولید جهانی گیاه کرچک بر اساس گزارش سازمان جهانی خواروبار و کشاورزی^۱.



شکل ۵. میزان ارزش گیاه کرچک در مقایسه با سایر دانه‌های روغنی در کشور آلمان.

است [۱۳]. در روغن کرچک بیشترین اسید چرب مربوط به ریسینولئیک اسید^۵ است که این اسید چرب باعث افزایش گرانیروی روغن در مقابل سایر روغن‌های گیاهی می‌شود. برای اندازه‌گیری اسیدهای چرب از دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC) بهره می‌گیرند. در جدول (۱) میزان ترکیب اسیدهای چرب روغن کرچک درج شده است [۱۷].



شکل ۶. روغن کرچک [۱۶].

۴. فرایند تولید زیست‌دیزل

فرایند ترانس استری شدن^۶ عبارت است از فرایندی که در آن از ترکیب انواع روغن‌های گیاهی و چربی‌های حیوانی با الکل‌ها در حضور کاتالیست، استر و گلیسرول تولید می‌شود. در شکل (۷) نمایی از فرایند ترانس استری شدن را مشاهده می‌کنید [۱۸].

۳. استخراج روغن کرچک و تعیین ترکیب اسیدهای چرب آن

برای استخراج روغن از دانه گیاه کرچک روش‌های مختلفی را به کار می‌گیرند که روش‌های شیمیایی و مکانیکی نام دارند و با جوشاندن دانه یا بدون جوشاندن دانه همراه‌اند. برای استخراج روغن در همه روش‌ها، ابتدا دانه را با هاون آسیاب می‌کنند. در روش جوشاندن مقداری از دانه کرچک (۱۵ گرم) را درون آب (۲۰۰ میلی‌لیتر) می‌ریزند و در دمای 100°C و به مدت ۲ ساعت می‌جوشانند. در روش‌های مکانیکی از اکسترودر (دستگاه روزنرانی)^{*} و در فشار بالا برای استخراج روغن استفاده می‌شود. برای استخراج روغن از دانه روغنی کرچک، از روش شیمیایی (استخراج با حلال) نیز بهره می‌گیرند. در این روش از حلال‌هایی چون متانول و یا نرمال هگزان استفاده می‌شود. از میان روش‌های یادشده در بالا، روش استخراج مکانیکی (استفاده از اکسترودر) برای استخراج روغن از دانه آفتاب گردان بازدهی خیلی کمی دارد که معادل ۰/۸ درصد وزنی است. بنابراین، برای استخراج روغن از دانه گیاه کرچک از میان روش‌های یادشده، روش مکانیکی استخراج روغن با اکسترودر تحت فشار روش مناسبی برای استخراج روغن به‌شمار نمی‌آید، چون بازدهی بسیار کمی دارد [۱۲]. در شکل (۶) نمایی از روغن کرچک استخراج شده مشاهده می‌شود.

روغن کرچک مانند سایر روغن‌های گیاهی دیگر دارای ترکیبات مختلف تری گلیسرید و حدود ۱۰٪ گلیسرین است. ترکیبات روغن کرچک شامل حدود ۹۱٪ تا ۹۵٪ ریسینولئیک اسید^۱، ۴٪ تا ۵٪ لینولئیک اسید^۲، ۱٪ تا ۲٪ پالمیتیک اسید^۳ و استئاریک اسید^۴

جدول ۱. ترکیبات اسید چرب روغن کرچک.

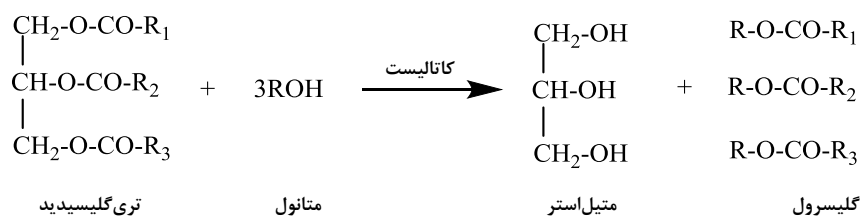
ترکیبات اسید چرب / %											
اسیدهای چرب دیگر	اراجیدیک اسید	لینولئیک اسید	لینولئیک اسید	اولئیک اسید	استئاریک اسید	پالمیتیک اسید	میرستیک اسید	لوریک اسید	کاپریک اسید	کاپریلیک اسید	کاپروئیک اسید
ریسینولئیک اسید	--	۵	--	۷	۱	۲	--	--	--	--	--
۸۶-۹۰											

1. Ricinoleic Acid
4. Stearic Acids

2. Linoleic Acid
5. Ricinoleic Acid

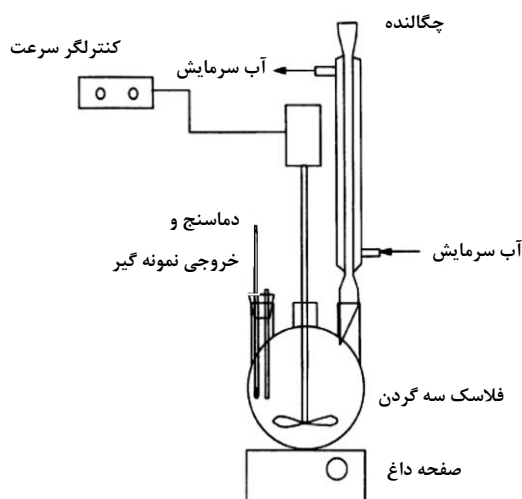
3. Palmitic Acid
6. Transesterification

* Eateudes: دستگاهی که جامدات شکل‌پذیر را از روزن قالبی به شکل موردنظر عبور می‌دهد تا قطعه‌ای با مقطع یکنواخت و طول معمولاً زیاد تولید کند.



شکل ۷. معادله کلی فرایند ترانس استری شدن تری گلیسیرید با متانول.

کاتالیست‌های قلیایی واکنش ترانس استری شدن انجام می‌شود [۲۱-۲۲]. فرایند ترانس استری شدن می‌تواند هم پیوسته و هم ناپیوسته انجام شود. در شکل (۸) نمایی از سامانه ناپیوسته تولید زیست‌دیزل مشاهده می‌شود [۲۳].



شکل ۸. سامانه ناپیوسته تولید زیست‌دیزل.

امروزه، در فرایند ترانس استری شدن کاتالیست‌های آنزیمی نیز به کار گرفته می‌شود. مارکودی لوکسیو^۱ و همکارانش، شرایط بهینه تولید زیست‌دیزل از طریق فرایند ترانس استری شدن، با استفاده روغن کرچک در حضور کاتالیست آنزیمی را بررسی کردند. آنها در این بررسی اثر دو نوع کاتالیست آنزیمی نووزیم^۲ ۴۳۵ و لیپوزیم^۳ IM را بررسی کردند. در این مطالعه، نسبت‌های مختلفی از اتانول به روغن و غلظت‌های مختلفی از کاتالیست‌های آنزیمی مورد بررسی قرار گرفت که در دمای ۶۵°C برای نووزیم ۴۳۵ حداکثر

در شکل (۷)، R₁، R₂ و R₃ زنجیره‌های طولانی هیدروکربنی‌اند که گاهی زنجیره‌های اسید چرب نامیده می‌شوند [۱۸]. در فرایند استری شدن از الکل‌ها و کاتالیست‌های مختلفی استفاده می‌شود. از الکل‌های به کار گرفته شده، می‌توان اتانول، متانول، پروپانول و بوتانول را برشمرد. مطالعات زیادی در فرایند ترانس استری شدن انجام شده است که حاکی از آنند که متانول نسبت به اتانول کاربرد بیشتری دارد، زیرا متانول ارزانتر و نیز خواص فیزیکی و شیمیایی بهتری دارد. علاوه بر این، متانول به راحتی از گلیسرول جدا می‌شود [۶]. از کاتالیست‌های به کار رفته در فرایند استری شدن می‌توان کاتالیست‌های قلیایی (سدیم هیدروکسید، پتاسیم هیدروکسید)، کاتالیست‌های اسیدی (سولفوریک اسید، سولفامیک اسید، کلریدریک اسید) و کاتالیست‌های آنزیمی را نام برد [۱۹]. از میان کاتالیست‌های یادشده، مصرف کاتالیست‌های قلیایی از همه بیشتر است، زیرا کاتالیست‌های قلیایی در دمای واکنش پایین و در فشار جوی واکنش می‌دهند و در زمان کمتری به درصد تبدیل بالایی می‌رسند [۶]، همچنین سرعت واکنش‌پذیری کاتالیست‌های قلیایی نسبت به کاتالیست‌های دیگر بیشتر است و این کاتالیست‌ها برای موادی نیز که دارای درصد اسید چرب کمی‌اند، هستند مانند روغن‌های گیاهی تصفیه شده، مناسب‌اند و می‌توان در فرایند استری شدن آنها از واکنش‌های قلیایی سود جست [۲۰]. امروزه، از فرایند استری شدن همراه با کاتالیست‌های اسیدی نیز برای تولید زیست‌دیزل استفاده می‌شود. کاربرد کاتالیست‌های اسیدی نیازمند زمان واکنش طول‌تری نسبت به کاتالیست‌های قلیایی است، زیرا کاتالیست‌های اسیدی در دو مرحله انجام می‌شوند که در مرحله اول، اسید با روغن مورد نظر واکنش می‌دهند و اسیدهای چرب استری همراه با روغن تولید می‌کند. این فاز را جدا می‌کند و در مرحله دوم به کمک

1. Marcodiluccio
2. Novozym
3. Lipozyme

اسید چرب است. خواص زیست‌دیزل به مقدار اسیدهای چرب موجود در منبع بستگی دارد. خواص فیزیکی و شیمیایی مهم زیست‌دیزل تولید شده نیز تحت تاثیر اسیدهای چرب موجود در روغن است. خواص فیزیکی و شیمیایی زیست‌دیزل تولید شده از روغن کرچک و ترکیبات اسید چرب آن، به ترتیب، در جدولهای (۲) و (۳) درج شده است. مطابق مندرجات جدول (۲)، گرانروی سینماتیکی زیست‌دیزل تولیدی در مقایسه با سایر منابع فوق العاده بالاست، بنابراین زیست‌دیزل تولید شده از روغن کرچک، به دلیل بالا بودن گرانروی آن سوخت مناسبی شمرده نمی‌شود [۲۵]. یکی از راه‌های کاهش گرانروی زیست‌دیزل تولید شده از روغن کرچک، مخلوط کردن آن با روغن‌های دیگر، و سپس تولید زیست‌دیزل از مخلوط آنها، مخلوط کردن زیست‌دیزل تولیدی با سوخت تجاری موجود در بازار (گازوئیل) است. عثمانو سوزا ولنت^۳ و همکارانش [۲۶] از روغن کرچک و روغن زائد خوراکی به طور جداگانه زیست‌دیزل تولید کردند. سپس آنها را با نسبت‌های مختلف با یکدیگر و سوخت تجاری ترکیب و خواصی از آنها مانند گرانروی سینماتیکی، چگالی، دمای تقطیر، عدد ستان و غیره را بررسی کردند. آنان در این بررسی نتیجه گرفتند که با افزایش غلظت زیست‌دیزل، گرانروی و چگالی ترکیب آنها افزایش ولی عدد ستان آنها کاهش می‌یابد. دانیل دا کوستا باربوسا^۴ و همکارانش [۱۴] از ترکیب روغن سویا با روغن کرچک زیست‌دیزل تولید کردند. در این بررسی، روغن‌ها با نسبت‌های مختلفی با یکدیگر ترکیب شدند سپس با بهره‌گیری از اتانول در حضور کاتالیست سدیم هیدروکسید و پتاسیم هیدروکسید زیست‌دیزل تولید شد. نتایج حاکی از آن بودند که هر چقدر غلظت روغن کرچک مصرف شده بیشتر باشد، میزان بازدهی تولید زیست‌دیزل کمتر است و نیز مقدار غلظت روغن کرچک مصرف شده بر خواص زیست‌دیزل تولیدی نیز اثر می‌گذارد. در جدول (۴)، خواص زیست‌دیزل تولید شده از ترکیب روغن‌های یادشده حاصل از بررسی آنها درج شده است.

تولید ۸۱/۴٪ و برای آنزیم لیپوزیم IM (استخراج شده از گونه ریزاندامگان موکور مای‌های^۱) در دمای ۶۵°C، بدون آب و نسبت اتانول به روغن ۱:۱۰ میزان تولید زیست‌دیزل بیش از ۹۸٪ گزارش شد [۲۴].

پس از اتمام فرایند ترانس استری شدن محلول را درون کیف جداکننده قرار دادند تا فاز گلیسرول و متیل استر (زیست‌دیزل) از هم جدا شوند. محصول مخلوطی از گلیسرول و روغن است که پس از جداسازی فاز گلیسرول و شستشوی فاز زیست‌دیزل، خواص آن بررسی شد. در شکل (۹) زیست‌دیزل تولید شده از روغن کرچک را مشاهده می‌کنید [۱۶].



شکل ۹. زیست‌دیزل تولید شده از روغن کرچک.

۵. اندازه‌گیری خواص و ترکیبات زیست‌دیزل تولیدشده از روغن کرچک و روش‌های بهبود آن

برای اندازه‌گیری ترکیبات اسید چرب در زیست‌دیزل تولید شده از دستگاه کروماتوگرافی گازی^۲ و خواص آن بر اساس استانداردهای ASTM و EN انجام می‌شود. زیست‌دیزل شامل ترکیبات سیرنشده

3. Osmano Souza Valente
4. Daniela da Costa Barbosa

1. Mucor Miehei
2. GC

جدول ۲. خواص فیزیکی و شیمیایی زیست‌دیزل تولید شده از روغن کرچک و منابع دیگر [۱۷].

پایداری اکسایش (h), 110 °C	نقطه اشتعال	نقطه اتصال صافی سرد	نقطه ابری شدن (°C)	ارزش حرارتی (MJ/kg)	عدد ستان (°C)	گرانروی سینماتیک در 40 °C (mm ² /s)	چگالی (kg/m ³)	روغن گیاهی
۰/۲	-	-۸	-۳/۸	-	-	۳/۷۵۲	۸۹۲/۵	اسفناج
۷/۶	-	-۱۳	-۳/۳	-	۵۴/۴	۴/۴۳۹	۸۸۲	کلزا
۰/۹	۱۸۳	-۳	۳/۴	۳۳/۵	۴۹	۴/۴۳۹	۸۸۰	آفتاب‌گردان
۲/۱	۱۷۸	-۴	۱	۳۳/۵	۴۵	۴/۰۳۹	۸۸۴	سویا
۲	۱۷۶	۱۷	۵	۳۳/۶	۵۴	۴/۹	۸۸۳	بادام زمینی
۴	۱۶۴	۱۲	۱۳	۳۳/۵	۶۲	۵/۷	۸۷۶	خرما
۰/۴	-	-۳	۰/۳	-	-	۴/۹۵۸	۸۸۵/۵	سبوس برنج
۳۵/۵	۱۱۰	-۴	۰	-	-	۲/۷۲۶	۸۰۷/۳	نارگیل
۳/۳	۱۷۸	-۶	-	-	۵۷	۴/۵	-	زیتون
۱/۱	-	۷	-۱۳/۴	-	-	۱۵/۲۵	۸۹۹	کرچک
۲/۲	۱۷۰	-۱۲	-۲/۸	-	۵۳	۴/۴	۸۸۵	ذرت
۲/۳	۱۳۵	۰	۲/۷	۳۹/۲	-	۴/۸	۸۷۹/۵	جاتروفا
-	۲۰۸	۶	-	۳۷	-	۳/۹۸	۸۵۰	ماهوا
۷/۱	-	۱۱	۱۴/۴	-	-	۵/۲۱۳	۸۸۴/۵	نیم ^۲ (زیتون تلخ)
-	۱۷۰	-۱۰	-۶	۴۰/۴	۵۰/۴۸	۴/۲	۸۶۷/۳	کنجد
۲/۳	-	۱۳	۱۳/۳	-	۶۷/۰۷	۴/۸۳	۸۷۷/۲	مورینگا الیفرا
-	-	-	-	۴۴/۶	-	۵/۲	۸۸۲	تنباکو
۰/۴	-	-۱۱	۱۰	-	-	۷/۵۳	۹۰۳	تونگ ^۳
۱/۶	-	۱۴	۱۶	۸	-	۴/۸۲۴	۸۷۴	پیه گاو
۵/۲	-	۲	۶	-	-	۴/۵۵۲	۸۸۲/۵	گریس زرد

جدول ۳. ترکیبات اسید چرب موجود در زیست‌دیزل تولید شده از روغن کرچک [۲۵].

مقدار (%)	ترکیبات اسید چرب
۹۰/۸۷	رسینولئیک اسید ^۴
۵/۰۰	لینولئیک اسید (C18:2)
۲/۵۷	اولئیک اسید (C18:1)
۰/۱۳	استئاریک اسید (C18:0)
۰/۴۱	پالمیتیک اسید (C16:0)
۰/۴۵	لینولئیک اسید (C18:3)
۰/۳۴	آراچیدیک اسید ^۵ (C 20:0)
۰/۷۴	لیگنوسریک اسید ^۶ (C24:0)

1. Cold filter Plugging Point
2. Neem
3. Tung
4. Ricinoleic Acid
5. Arachidic Acid
6. Lignoceric Acid

جدول ۴. نسبت ترکیبات، بازده، گرانی و چگالی زیست‌دیزل به دست آمده از ترکیب روغن کرچک/ روغن سویا با استفاده از فرایند اتانولیز^۱.

مشخصات زیست‌دیزل تولیدی		میانگین FAEs (%)	نسبت روغن کرچک / روغن سویا
چگالی ویژه در ۲۰ °C (kg/m ³)	گرانی در ۴۰ °C (mm ² /s)		
۸۸۰	۱۹/۷	۳۰	۰/۱۰۰
۸۹۱	۱۳/۷	۵۰	۲۵/۷۵
۹۰۳	۹/۹	۶۰	۵۰/۵۰
۹۱۰	۷/۲	۸۲	۷۵/۲۵
۹۱۸	۶/۰	۸۸	۸۵/۱۵
۹۲۵	۴/۹	۹۶	۱۰۰/۰

شرایط نسبت ۶:۱ متانول به روغن، دمای ۵۰ °C، مدت زمان واکنش ۱ ساعت و کاتالیست KOH (۵۰ g kg⁻¹ of the oil) زیست‌دیزل تولید، سپس آن را با سوخت تجاری ترکیب و از آن زیست‌دیزل B10 و B100 تولید کردند. در ادامه، خواص آنها را، به ترتیب، براساس استانداردهای ASTM D7467 B100 و ASTM D6751 B100 به دست آوردند و با سوخت تجاری مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که زیست‌دیزل تولیدشده از روغن کرچک به صورت ۱۰۰٪ (B100) دارای گرانی سینماتیکی بالایی است. در جدول (۵) نتایج بررسی آنها درج شده است.

مطابق مندرجات جدول (۴) خواص زیست‌دیزل تولیدشده به نسبت‌های ترکیب روغن کرچک با روغن سویا بستگی دارد. با افزایش نسبت روغن کرچک، گرانی نیز در ۴۰ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد ولی چگالی و میانگین اتیل استر اسیدهای چرب تولید شده (زیست‌دیزل) کاهش می‌یابد، زیرا گرانی روغن کرچک بالاست و این عامل باعث کاهش نفوذ الکل و کاتالیست در بین زنجیره‌ها می‌شود و میزان زیست‌دیزل تولیدی کاهش می‌یابد. پائولو برمان^۲ و همکارانش [۲۷] روغن کرچک و متانول را در حضور پتاسیم هیدروکسید به عنوان کاتالیست در

جدول ۵. خواص زیست‌دیزل B10 و B100 و سوخت تجاری.

ASTM D975 ULSD		ASTM D7467 B10		ASTM D6751 B100		خاصیت
محدوده	نتیجه	محدوده	نتیجه	محدوده	نتیجه	
۴/۱-۱/۹	۳/۲۷۷	۴/۱-۱/۹	۳/۶۲۱	۶-۱/۹	۱۵/۱۷	گرانی سینماتیکی در ۴۰ °C mm ² /s
۴۰ دقیقه	۵۱/۴	۴۰ دقیقه	۴۸/۵	۴۷ دقیقه	۴۸/۹	عدد ستان
-	-۱	-	-۱	-	-۱۴	نقطه ابری، °C
حداکثر ۳۳۸ تعیین نشده	-	حداکثر ۳۴۳	۳۴۰/۸	حداکثر ۳۶۰	۳۹۸/۷	دمای تقطیر، °C
حداکثر ۵۲۰ تعیین نشده	-	حداکثر ۵۲۰	۱۳۹	-	-	چربی، HFRR در ۶۰ °C، μm

1. Ethanolysis

2. Paula Berman

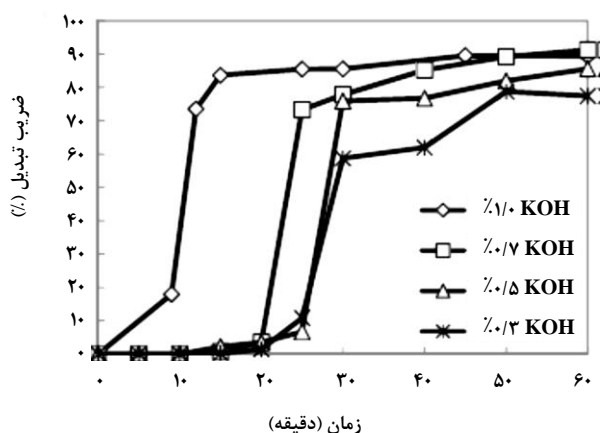
۶. پارامترهای مؤثر در فرایند ترانس استری شدن و تولید زیست‌دیزل

در تولید زیست‌دیزل از طریق فرایند متیل استر، پارامترهای مختلفی دخالت دارند. از پارامترهای مؤثر در تولید زیست‌دیزل می‌توان دمای واکنش، زمان واکنش، مقدار و نوع کاتالیست، نسبت الکل به روغن، نوع الکل به کار رفته، سرعت هم زدن محلول و مقدار آب موجود در خوراک اولیه را برشمرد، که این پارامترها را پژوهشگران مختلفی بررسی کرده‌اند [۲۳-۳۱ و ۳۱-۲۸]. دست یافتن به حالت بهینه و نیز بازدهی و خواص زیست‌دیزل به منبع اولیه زیست‌دیزل (روغن) وابسته است، زیرا منابع مختلف خواص فیزیکی و شیمیایی و ترکیبات مختلفی دارند.

۶-۱ اثر پارامتر دمای واکنش، مقدار و نوع کاتالیست، نسبت متانول به روغن

آهنگ تولید و پیشرفت فرایند استری شدن به طور گسترده ای به دمای واکنش بستگی دارد. فرایند استری شدن می‌تواند در دمای محیط نیز انجام شود، اما باید زمان کافی برای انجام واکنش مهیا باشد [۳۲]. در بسیاری از مطالعات قبلی نشان داده شده است که اگر متانول به عنوان الکل در واکنش به کار رود، فرایند استری شدن بیشتر در دمای جوش متانول انجام خواهد شد. در بررسی فرایند استری شدن روغن اردک با استفاده از متانول در حضور کاتالیست‌های قلیایی دمای بهینه برای تولید زیست‌دیزل 60°C به دست آمد [۳۳]. در بررسی دیگری که صورت گرفته، از روغن استخراج شده از دانه گلرنگ با استفاده از متانول و در حضور کاتالیست‌های قلیایی زیست‌دیزل تولید شد [۳۴]. در این بررسی، واکنش در دمای 60°C تا 65°C انجام شد. در بررسی ای که علی و همکارانش در تولید زیست‌دیزل از چربی‌های حیوانی با استفاده از کاتالیست‌های گوناگون (سدیم هیدروکسید، پتاسیم هیدروکسید و سدیم) انجام دادند، واکنش استری شدن در دمای 60°C نیز انجام شد [۳۵]. فرایند ترانس استری شدن در دماهای مختلفی می‌تواند صورت گیرد که براساس نوع روغن به کار رفته دمای واکنش برای تولید زیست‌دیزل متفاوت است. براساس بررسی کهمورات کلیک^۱ و همکارانش که با طراحی آزمایش انجام دادند بهترین دمای

واکنش برای روغن کرچک 65°C به دست آمد [۳۱]. مهمترین نقش را در فرایند استری شدن، کاتالیست و مقدار آن ایفا می‌کنند. به طور کلی، در فرایند شیمیایی ترانس استری شدن، دو نوع کاتالیست اسیدی و قلیایی (کاتالیست پایه) به کار گرفته می‌شود. کاتالیست‌های اسیدی برای روغن و چربی‌هایی که دارای درصد بالایی از اسیدهای چرب آزادند به کار می‌روند، زیرا کاتالیست‌های قلیایی برای واکنش با چربی‌های دارای اسیدچرب آزاد^۲ بالا کاربرد کمتری دارند. کاتالیست‌های قلیایی نیز برای واکنش ترانس استری شدن چربی‌ها و روغن‌هایی به کار می‌روند که درصد اسیدهای چرب آزاد آنها کم باشد، زیرا اگر اسیدهای چرب آزاد روغن یا چربی زیاد باشد احتمال واکنش صابونی شدن روغن با کاتالیست‌های قلیایی زیاد است که واکنش صابونی شدن باعث کاهش بازده تولیدی در زیست‌دیزل می‌شود. کاتالیست‌های قلیایی کاربردهای بیشتری در صنعت دارند زیرا در غلظت‌های یکسان نسبت به کاتالیست‌های اسیدی سرعت واکنش بالایی دارند [۳۶] و قابل دسترس و ارزان‌تر هم هستند. جی. ام. انسینار^۳ و همکارانش اثر غلظت مقدار کاتالیست را در تولید زیست‌دیزل از روغن کرچک در فرایند ترانس استری شدن از طریق پرتودهی فراصوت^۴ بررسی کردند [۳۷]. آنان در این بررسی از کاتالیست قلیایی پتاسیم هیدروکسید با غلظت‌های ۱٪ تا ۳٪، نسبت متانول به روغن ۶:۱ و قدرت فراصوت ۸۰٪ انجام گرفت، که نتیجه اثر مقدار کاتالیست در این بررسی را در شکل (۱۰) مشاهده می‌کنید.



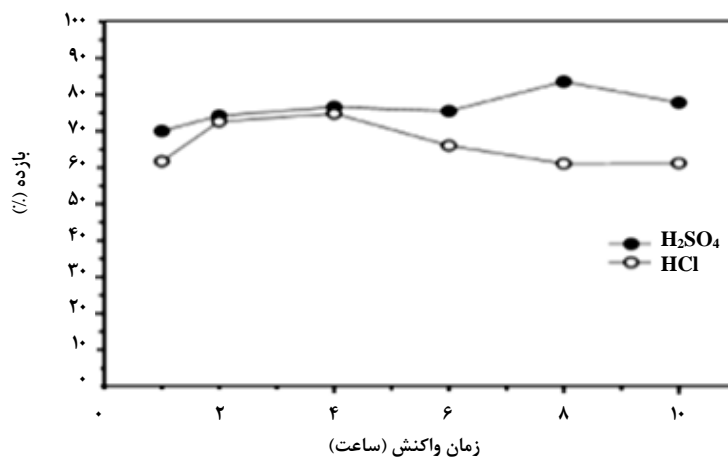
شکل ۱۰. اثر مقدار کاتالیست در تولید زیست‌دیزل از روغن کرچک.

2. Free Fatty Acid
3. J.M. Encinar
4. Ultrasonic Irradiation

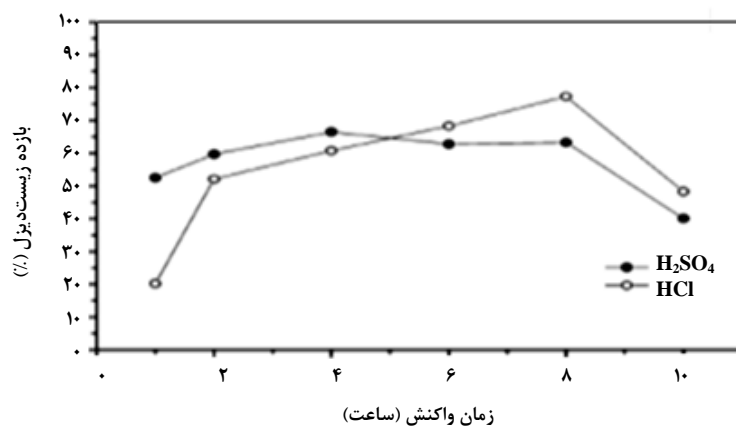
1. Murat Kılıç

در فرایند استری شدن به وسیله متانول و اتانول بررسی کردند. در شکل‌های (۱۱) و (۱۲)، به ترتیب، اثر مقدار کاتالیست اسیدی در فرایند ترانس استری شدن از طریق متانول و اتانول را مشاهده می‌کنید. آنان در این بررسی پی بردند که کاتالیست‌های اسیدی نسبت به کاتالیست قلیایی در تولید زیست‌دیزل (متیل استر) از روغن کرچک، بازدهی بیشتری دارند که دلیل این نتیجه را می‌توان زیاد بودن اسیدهای چرب آزاد روغن کرچک دانست، زیرا کاتالیست‌های قلیایی در حالتی که منبع روغن دارای اسیدهای چرب آزاد بالایی باشد، باعث واکنش صابونی می‌شوند که این امر به کاهش بازده زیست‌دیزل تولیدی می‌انجامد.

مطابق شکل (۱۰)، با افزایش غلظت کاتالیست مقدار زیست‌دیزل تولیدی افزایش می‌یابد و در زمان ۵۰ دقیقه برای غلظت‌های ۰/۷ و ۱٪ کاتالیست پتاسیم هیدروکسید، بازده زیست‌دیزل تولیدی با هم برابرند و بر اساس شکل یادشده بهترین زمان و مقدار کاتالیست، به ترتیب، ۵۰ دقیقه و ۰/۷٪ کاتالیست است. برای تولید زیست‌دیزل از روغن کرچک، علاوه بر کاتالیست‌های قلیایی از کاتالیست‌های اسیدی نیز بهره می‌گیرند. در بررسی‌ای که برای تولید زیست‌دیزل از روغن کرچک توسط سیمونی و همکارانش [۳۸] انجام شد، پی بردند که کاتالیست‌های اسیدی نیز برای تولید زیست‌دیزل بازدهی چشمگیری دارند. آنان در این بررسی اثر انواع کاتالیست‌ها را



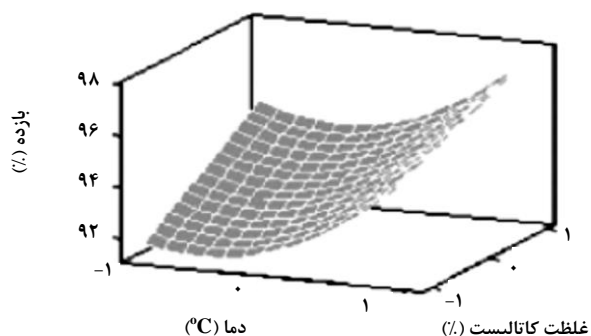
شکل ۱۱. تولید متیل استر از روغن کرچک از طریق فرایند متانولیز^۱ در حضور کاتالیست‌های اسیدی. مخلوط واکنش شامل متانول / روغن / کاتالیست به نسبت ۲:۱۰:۶۰ در دمای ۶۰ °C.



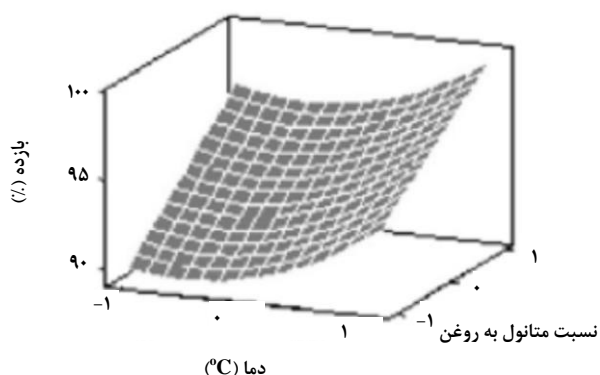
شکل ۱۲. تولید زیست‌دیزل از روغن کرچک از طریق فرایند اتانولیز در حضور کاتالیست‌های اسیدی. مخلوط واکنش شامل اتوکسید / روغن / کاتالیست به نسبت ۲:۱۰:۶۰ و دمای ۸۰ °C.

1. Ethanolysis

کاتالیست‌های قلیایی برای تولید زیست‌دیزل مطلوب، بیشتر است.



شکل ۱۳. اثر کاتالیست و دما در تولید زیست‌دیزل. نسبت روغن به متانول ۱:۶.



شکل ۱۴. اثر دما و نسبت متانول به روغن در تولید زیست‌دیزل. مقدار کاتالیست استفاده شده ۱ درصد وزنی بود.

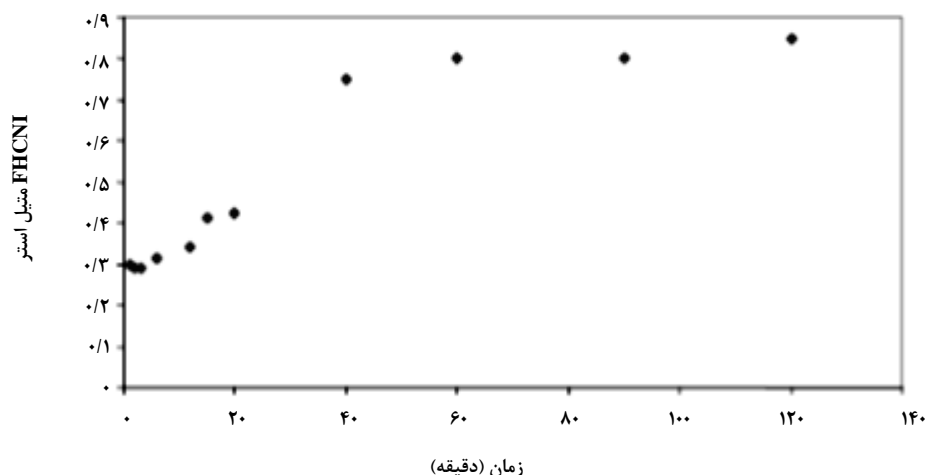
۶-۲ اثر پارامتر زمان واکنش

یکی از پارامترهای مهم دیگر در فرایند ترانس استری شدن، زمان واکنش است. در فرایند ترانس استری شدن روغن کرچک با استفاده از کاتالیست‌های قلیایی (پایه)، اثر زمان واکنش را رضانی^۲ و همکارانش [۳۰] بررسی و گزارش دادند. آنان در این مطالعه برای بررسی اثر زمان واکنش، آزمایش را در شرایط نسبت متانول به روغن ۱:۸، دمای واکنش ۶۵ °C، شدت هم زدن محلول ۴۰۰ rpm، مقدار ۰/۵٪ کاتالیست پتاسیم متوکسید^۳ و بازه زمانی واکنش ۱۲۰ دقیقه انجام دادند. در شکل (۱۵) اثر زمان بر بازده تولید زیست‌دیزل از روغن کرچک در شرایط یادشده مشاهده می‌شود.

پارامتر مهم دیگر مؤثر در تولید زیست‌دیزل، نسبت الکل به روغن است. در بسیاری از فرایندهای صنعتی برای تولید زیست‌دیزل، از نسبت ۶:۱ الکل به روغن بهره می‌گیرند. براساس بررسی ای که طالبیان و همکاران روی روغن زائد خوراکی با اسیدهای چرب آزاد یادشده در بالا در حضور کاتالیست اسیدی جامد انجام دادند، پی بردند که فرایند ترانس استری شدن برای تولید زیست‌دیزل به مقدار الکل بالایی در مقابل روغن نیاز دارد [۲۸]. در این بررسی بهترین نسبت الکل به روغن برای تولید زیست‌دیزل ۷۰:۱ به دست آمد. بنابر آزمایش‌های دیگری که روی کاتالیست‌های اسیدی انجام شده است، مشخص شده که برای تولید زیست‌دیزل، آزمایش در نسبت الکل به روغن بالایی انجام شده است [۳۹]، اما فرایند استری شدن برای تولید زیست‌دیزل در حضور کاتالیست‌های قلیایی در مقایسه با کاتالیست‌های اسیدی به نسبت الکل به روغن کمتری نیاز دارد. در بسیاری از بررسی‌های انجام شده، نسبت الکل به روغن به کار رفته در فرایند ترانس استری شدن در حضور کاتالیست‌های قلیایی ۶:۱ به کار رفته و این نسبت معمولاً بازدهی چشمگیری داشته است. کنیز فردوس^۱ و همکاران [۴۰] با استفاده از کاتالیست‌های پایه (قلیایی) و متانول از روغن کنجد در شرایط عملیاتی نظیر دمای واکنش ۶۰ °C، زمان واکنش ۹۰ دقیقه و مقدار کاتالیست استفاده شده ۱ درصد وزنی و نسبت‌های مختلف متانول به روغن (۵:۱، ۶:۱، ۹:۱ و ۱۲:۱) زیست‌دیزل تولید کردند که بهترین نسبت برای تولید زیست‌دیزل ۶:۱ به دست آمد. مورات کلیک و همکاران [۳۱] نیز با طراحی آزمایش روی فرایند ترانس استری شدن روغن کرچک بررسی‌هایی انجام دادند و زیست‌دیزل تولید کردند. بهترین نسبت متانول به روغن برای تولید زیست‌دیزل از روغن کرچک که آنها گزارش دادند، ۷:۱ بود. در این بررسی حالت بهینه برای تولید زیست‌دیزل از روغن کرچک شامل ۱/۵ درصد وزنی کاتالیست مورد استفاده، دمای واکنش ۶۵ °C و نسبت متانول به روغن ۷:۱ به دست آمد که بازدهی تولیدی فرایند در این حالت ۹۹/۸۱٪ گزارش شد. در شکل‌های (۱۳) و (۱۴)، به ترتیب، اثر دما و مقدار کاتالیست، دما و نسبت متانول به روغن نمایش داده شده است. بنابراین، براساس نوع خوراک اولیه و نوع کاتالیست به کار رفته در فرایند ترانس استری مقدار الکل مورد استفاده متفاوت است و مقدار الکل به کار رفته برای کاتالیست‌های اسیدی نسبت به

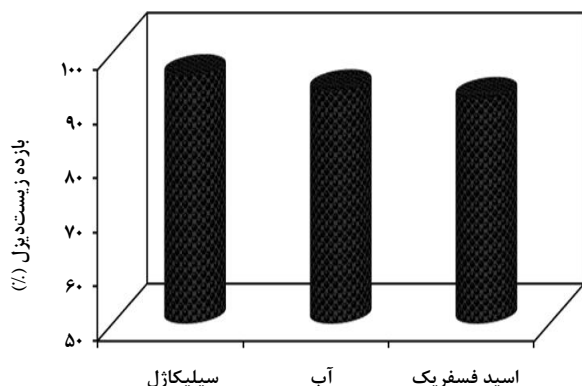
2. Ramezani
3. KOCH₃

1. Kaniz Ferdous



شکل ۱۵. اثر زمان بر بازده تولیدی زیست‌دیزل از روغن کرچک.

می‌شویند تا آب خروجی از فاز متیل استر بی‌رنگ و محصول به طور کامل خنثی شود. برای جداسازی آب اضافی درون محصول مقداری سدیم سولفات (به ازای هر ۵ ml محصول ۱ گرم سدیم سولفات) نیز به آن اضافه می‌کنند و به مدت ۱۰ تا ۲۰ دقیقه هم می‌زنند و سپس محصول را از صافی می‌گذرانند؛ بنابراین، سدیم سولفات تحت خلأ از آن جدا می‌شود و یا می‌توان محصول را پس از شستشو با آب، به مدت ۱ ساعت و در دمای 70°C درون کرده قرار داد و یا به وسیله سللیکاژل خشک کرد. در شکل (۱۶) نمایی از مقایسه شستشوی زیست‌دیزل تولید شده از روغن کرچک با سه روش یادشده مشاهده می‌شود، که خالص‌سازی با سللیکاژل برای زیست‌دیزل تولید شده از روغن کرچک بازده بالاتری دارد.



شکل ۱۶. اثر نوع خالص‌سازی در بازده زیست‌دیزل [۳۱].

مطابق شکل (۱۵) قابل مشاهده است با گذشت زمان بازده زیست‌دیزل تولیدی افزایش می‌یابد زیرا کاتالیست‌ها برای انجام واکنش به دما و مدت زمان خاصی نیاز دارند و بر اساس بررسی که رمضانی و همکاران انجام داده‌اند. میزان زیست‌دیزل تولیدی از طریق کاتالیست پتاسیم متوکسید از روغن کرچک پس از گذشت ۴۰ دقیقه از زمان واکنش تغییر چشمگیری پیدا می‌کند و در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

۳-۶-۳ خالص‌سازی و شستشوی زیست‌دیزل

پس از پایان یافتن واکنش ترانس استری شدن و جداسازی فاز گلیسرول با استفاده از کیف جداکننده، متیل استر را شستشو می‌دهند. این مرحله تاثیر به‌سزایی در خواص زیست‌دیزل دارد. هدف از انجام این مرحله، خالص‌سازی محصول و جداسازی کاتالیست‌های باقی مانده، الکل اضافی و گلیسرول از محصول است. برای شستشوی زیست‌دیزل روش‌های مختلفی در دسترس است که از این روش‌ها می‌توان شستشوی فاز متیل استر (زیست‌دیزل) با آب گرم، سللیکاژل و فسفوریک اسید را نام برد.

۳-۶-۳-۱ روش شستشو با آب گرم

در این روش ابتدا فاز گلیسرول را از فاز متیل استر جدا می‌کنند و سپس فاز متیل استر (زیست‌دیزل) را چندین بار با آب 60°C

۷. مزایا و معایب زیست‌دیزل

زیست‌دیزل سوختی تجدید پذیر است که از پسماندهای خانگی و شهری تولید می‌شود. زیست‌دیزل نمی‌تواند به طور کامل جایگزین نفت و سوخته‌های فسیلی شود اما نسبت به سوخته‌های فسیلی دارای مزایایی است که موجب توسعه و گسترش آن شده است. از مزایایی زیست‌دیزل که باعث توجه زیاد برای تولید آن شده، می‌توان به این موارد اشاره کرد:

- زیست‌دیزل می‌تواند به طور کامل و یا جزئی، جانشین سوخته‌های مشتق از نفت شود؛
- تلمبه‌های ویژه و یا فشارهای بالایی برای سوختگیری و انتقال آن لازم نیست؛
- زیست‌دیزل سوختی اکسیژن دار است که به طور کامل می‌سوزد، بنابراین گازهای خطرناک کمتری تولید و گسیل می‌کند؛
- زیست‌دیزل سوختی تجدیدپذیر است و می‌تواند وابستگی به واردات سوخته‌های فسیلی را کاهش دهد؛
- زیست‌دیزل سوختی است که انتقال و ذخیره سازی آن نسبت به سوخت مشتق از نفت آسان‌تر است زیرا دارای نقطه اشتعال بیش از 150°C است؛
- زیست‌دیزل سوختی است که قدرت چرب کنندگی بالایی دارد که این خاصیت باعث افزایش عمر موتور می‌شود؛
- زیست‌دیزل سوختی زیست سازگار است و در تغییر اقلیم

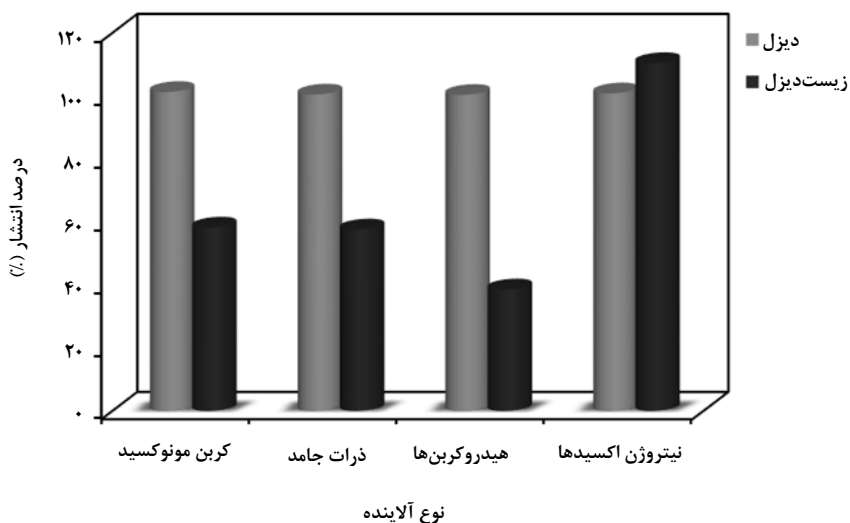
و گرمایش زمین نقشی ندارد، زیرا آنالیز زیست‌دیزل نشان داده که انتشار CO_2 حاصل این سوخت در مقایسه با سوخت نفتی ۸۷٪ کمتری است [۴۱].

اما زیست‌دیزل با وجود این‌که به سوختی پاک، تجدیدپذیر و زیست سازگار به‌شمار می‌آید، دارای زیان‌هایی هم هست که از جمله آنها می‌توان این موارد را برشمرد:

- انتشار NO_x آن بالاست؛ زیست‌دیزل در مقایسه با سوخته‌های مشتق از نفت مقدار NO_x بالایی منتشر می‌کند؛
 - مقدار انرژی تولیدی از زیست‌دیزل در مقایسه با سوخته‌های نفتی کمتر است، بنابراین کارایی موتور را کاهش می‌دهد؛
 - به علت وجود گلیسرین در زیست‌دیزل و حالت چسبندگی آن در صورت استفاده طولانی مدت از این سوخت پیستون‌ها به همدیگر می‌چسبند.
- در شکل (۱۷) نمودار مقایسه گازهای گسیل شده از سوخت زیست‌دیزل و سوخت مشتق از مواد نفتی را مشاهده می‌کنید.

۸. نتیجه‌گیری کلی

روغن کرچک برای تولید زیست‌دیزل می‌تواند یکی از منابع با ارزش و کم هزینه بشمار رود که این گیاه به راحتی در مناطق



شکل ۱۷. نمودار مقایسه گازهای تولید شده از نفت و زیست‌دیزل [۴۲].

- using Alkaline Catalysts", *Advances in Bioresearch*, 7, 44-52, (2016).
- [3] Ramos, M. J., Fernández, C. M., Casas, A., Rodríguez, L., Pérez, Á., "Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties", *Bioresource Technology*, 100, 261-268, (2009).
- [4] Çaylı, G., Küsefoğlu, S., "Increased yields in biodiesel production from used cooking oils by a two step process: Comparison with one step process by using TGA.", *Fuel processing technology*, 89, 118-122, (2008).
- [5] Jacobson, K., Gopinath, R., Charan Meher, L., Kumar Dalai, A., "Solid acid catalyzed biodiesel production from waste cooking oil." *Applied Catalysis B: Environmental*, 85, 86-91, (2008).
- [6] Ali, E. N., Tay, C. I., "Characterization of biodiesel produced from palm oil via base catalyzed transesterification", 53, 7-12, (2013).
- [7] Van Kasteren, J. M. N., Nisworo, A. P., "A process model to estimate the cost of industrial scale biodiesel production from waste cooking oil by supercritical transesterification", *Resources, Conservation and Recycling*, 50, 442-458, (2007).
- [۸] فروتن، ر.، اسماعیلی، ح.، کوثری فرد، م.، قدرتی، ث.، "بهبودسازی تولید زیست‌دیزل از پیه گوسفند با استفاده از کاتالیست‌های قلیایی"، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۸۳، ۶۰-۶۹، (۱۳۹۴).
- [9] Esmaeili, H., Foroutan, R., "Optimization of Biodiesel Production from Goat Tallow Using Alkaline Catalysts and Combining them with Diesel", *Chemistry and Chemical Technology*, 12, 120-126, (2018).
- [10] Meng, X., Chen, G., Wang, Y., "Biodiesel production from waste cooking oil via alkali catalyst and its engine test", *Fuel Processing Technology*, 89, 851-857, (2008).
- [11] Scholz, V., Nogueira da Silva, J., "Prospects and risks of the use of castor oil as a fuel", *Biomass and Bioenergy*, 32, 95-100, (2008).
- [12] Dias, J. M., Araújo, J. M., Costa, J. F., Alvim-Ferraz, M. C. M., Almeida, M. F., "Biodiesel production from raw castor oil", *Energy*, 53, 58-66, (2013).
- [13] Forero, C. L. B., "Biodiesel from castor oil: a promising fuel for cold weather", *Renewable Energies and Power Quality Journal*, 1, 59-62, (2005).
- [14] Barbosa, D. D. C. Serra, T. M., Plentz Meneghetti, S. M., Meneghetti, M. R., "Biodiesel production by ethanolysis of mixed castor and soybean oils", *Fuel*, 89, 3791-3794, (2010).
- [15] Neves Dias, A., Rodrigues Cerqueira, M. B., Rodrigues de Moura, R., Kurz, M. H. S., Clementin, R. M., D'Oca, M. G. M., Primel, E. G., "Optimization of a method for the simultaneous determination of glycerides, free and total glycerol in biodiesel ethyl esters from castor oil using gas chromatography", *Fuel*, 94, 178-183, (2012).

گرم می‌تواند رشد کند. اما گرانروی روغن کرچک به دلیل دارا بودن مقدار بالای اسید ریسینولئیک، در مقایسه با سایر منابع دیگر، بالاست که این عامل باعث می‌شود گرانروی زیست‌دیزل حاصل از روغن کرچک در مقایسه با سایر زیست‌دیزل‌های تولید شده از منابع دیگر بالا باشد. برای کاهش گرانروی زیست‌دیزل تولید شده از روغن کرچک می‌توان زیست‌دیزل تولید شده را با سایر زیست‌دیزل‌های تولید شده از منابع دیگر یا سوخت تجاری ترکیب کرد. برای تولید زیست‌دیزل از روغن کرچک، می‌توان از کاتالیست‌های اسیدی، آنزیمی و قلیایی بهره گرفت. هر یک از این کاتالیست‌ها نسبت به کاتالیست‌های دیگر دارای معایب و مزایایی است. مثلاً، کاتالیست‌های آنزیمی در اثر واکنش و تولید زیست‌دیزل، محصولات جانبی مانند گلیسرول تولید نمی‌کنند ولی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیستند زیرا کاتالیست‌های آنزیمی نیز مانند کاتالیست‌های اسیدی به مدت زمان واکنش طولانی نیاز دارند و به مقدار فراوان در دسترس نیستند. کاتالیست‌های اسیدی برای تولید زیست‌دیزل از منابع روغنی که دارای اسیدهای چرب آزاد بالایی‌اند، مصرف می‌شوند، زیرا بر اثر واکنش ترانس استری شدن صابون تولید نمی‌کنند ولی برای انجام واکنش به مقدار بسیار زیادی الکل (اتانول یا متانول) نیاز دارند و معمولاً در دماهای بالا انجام می‌شوند. کاتالیست‌های قلیایی نسبت به کاتالیست‌های اسیدی و آنزیمی به نسبت الکل کمتر و زمان کمتری نیاز دارند ولی برای منابع روغنی که دارای مقدار بالایی اسیدهای چرب آزاد است، کاربرد زیادی ندارد زیرا باعث تولید صابون می‌شود و بازده تولیدی زیست‌دیزل کاهش می‌یابد. اما باید گفت که امروزه برای تولید زیست‌دیزل بیشتر از واکنش ترانس استری شدن و کاتالیست‌های قلیایی استفاده می‌شود. خالص‌سازی و شستشوی زیست‌دیزل در مقایسه با سایر کاتالیست‌ها دشوارتر می‌شود. وچند روش برای خالص‌سازی زیست‌دیزل وجود دارد که بهترین روش برای خالص‌سازی زیست‌دیزل تولید شده از روغن کرچک، روش خالص‌سازی با سیلیکاژل است.

مراجع

- [1] Leung, D. Y. C., Wu, X., Leung, M. K. H. "A review on biodiesel production using catalyzed transesterification", *Applied Energy*, 87, 1083-1095, (2010).
- [2] Esmaeili, H., Foroutan, R., Asl, M. Z., "Producing the Biodiesel by Combination of Olive Oil and Chicken Fat

- [16] Sreenivas, P., Mamilla, V. R., Sekhar, K. C., "Development of biodiesel from castor oil", *International Journal of Energy Science*, 1, 192-197, (2011).
- [17] Karmakar, A., Karmakar, S., Mukherjee, S., "Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production", *Bioresource technology*, 101, 7201-7210, (2010).
- [18] Leung, D. Y. C., Wu, X., Leung, M. K. H., "A review on biodiesel production using catalyzed transesterification", *Applied Energy*, 87, 1083-1095, (2010).
- [19] Bhatti, H. N., Hanif, M. A., Qasim, M., Rehman, A., "Biodiesel production from waste tallow", *Fuel*, 87, 2961-2966, (2008).
- [20] Cho, H. J., Kim, S. H., Hong, S. W., Yeo Y. K., "A single step non-catalytic esterification of palm fatty acid distillate (PFAD) for biodiesel production", *Fuel*, 93, 373-380, (2012).
- [21] Alptekin, E., Canakci, M., Sanli, H., "Methyl ester production from chicken fat with high FFA", *World Renewable Energy Congress – Sweden*, 8–13 May, Linköping, Sweden, (2011).
- [22] Charoenchaitrakool, M., Thienmethangkoon, J., "Statistical optimization for biodiesel production from waste frying oil through two-step catalyzed process", *Fuel Processing Technology*, 92, 112-118, (2011).
- [23] Ma, F., Clements, L. D., Hanna, M., "The effects of catalyst, free fatty acids, and water on transesterification of beef tallow", 41, 1261-1264, (1998).
- [24] De Oliveira, D., Di Luccio, M., Faccio, C., Rosa, C. D., Bender, J. P., Lipke, N., Menoncin, S., Amroginski, C., de Oliveira, J. V., "Optimization of enzymatic production of biodiesel from castor oil in organic solvent medium", *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 771, 113-116, (2004).
- [25] Okullo, A. A., Temu, A. K., Ogwok, P., Ntalikwa, J. W., "Physico-chemical properties of biodiesel from *Jatropha* and castor oils", *International Journal of Renewable Energy Research*, 2, 47-52, (2012).
- [26] Valente, O. S., Duarte Pasa, V. M., Pereira Belchior, C. R., Sodré, J. R., "Physical-chemical properties of waste cooking oil biodiesel and castor oil biodiesel blends", *Fuel*, 90, 1700-1702, (2011).
- [27] Berman, P., Nizri, S., Wiesman, Z., "Castor oil biodiesel and its blends as alternative fuel", *Biomass and Bioenergy*, 35, 2861-2866, (2011).
- [28] Talebian-Kiakalaieh, A., Amin, N. A. S., Zarei, A., Jaliliannosrati, H., "Biodiesel Production from High Free Fatty Acid Waste Cooking Oil by Solid Acid Catalyst" *Proceedings of the 6th International Conference on Process Systems Engineering (PSE ASIA)*, 25, (2013).
- [29] Patil, P. D., Gude, V. G., Reddy, H. K., Muppaneni, T., Deng, S., "Biodiesel Production from Waste Cooking Oil Using Sulfuric Acid and Microwave Irradiation Processes", *Journal of Environmental Protection*, 3, 107-113, (2012).
- [30] Ramezani, K., Rowshanzamir, S., Eikani, M. H., "Castor oil transesterification reaction: A kinetic study and optimization of parameters", *Energy*, 35, 4142-4148, (2010).
- [31] Kılıç, M., Uzun, B. B., Pütün, E., Pütün, A. E., "Optimization of biodiesel production from castor oil using factorial design", *Fuel Processing Technology*, 111, 105-110, (2013).
- [32] Srivastava, A., Prasad, R., "Triglycerides-based diesel fuels" *Renewable and sustainable energy reviews* 4, 111-133, (2000).
- [33] Kang, L., Wang, R., "Biodiesel production by transesterification of duck oil with methanol in the presence of alkali catalyst", *Petroleum and Coal*, 55, 68-72, (2013).
- [۳۴] تحویل‌داری، ک.، امامی، م. ع.، "تهیه بیودیزل از روغن گلرنگ و بررسی ویژگی‌های مخلوط ۲۰ درصد آن با سوخت دیزل"، پژوهش‌های کاربردی در شیمی، ۴، ۵۷-۶۴، (۱۳۸۹).
- [35] Ali, A., Ahmad, F., Farhan, M., Ahmad, M., "Biodiesel production from residual animal fat using various catalysts", *Pakistan Journal of Science*, 64, 282-286, (2012).
- [36] Schuchardt, U., Sercheli, R., Matheus Vargas, R., "Transesterification of vegetable oils: a review", *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 9, 199-210, (1998).
- [37] Encinar, J. M., González, J. F., Pardal, A., "Transesterification of castor oil under ultrasonic irradiation conditions. Preliminary results", *Fuel Processing Technology*, 103, 9-15, (2012).
- [38] Meneghetti, S. M. P., Meneghetti, M. R., Wolf, C. R., Silva, E. C., Lima, G. E. S., de Lira Silva, L., Serra, T. M., Cauduro, F., de Oliveira, L. G., "Biodiesel from castor oil: a comparison of ethanolysis versus methanolysis", *Energy & Fuels*, 20, 2262-2265, (2006).
- [39] Wang, Y., Ou, S., Liu, P., Xue, F., Tang, S., "Comparison of two different processes to synthesize biodiesel by waste cooking oil", *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 252, 107-112, (2006).
- [40] Ferdous, K., RakibUddin, M., "Biodiesel from Sesame oil: Base catalysed transesterification", *International Journal of Engineering & Technology*, 1, 420-431, (2012).
- [41] Sheehan, J., Camobreco, V., Duffield, J., Graboski, M., Shapouri, H., "Life cycle inventory of biodiesel and petroleum diesel for use in an urban bus", *National Renewable Energy Lab., Golden, CO (US)*, (1998).
- [42] Juan, J. C., Kartika, D. A., Wu, T. Y., Yun Hin T. Y., "Biodiesel production from *jatropha* oil by catalytic and non-catalytic approaches: an overview", *Bioresource technology*, 102, 452-460, (2011).