



تهیه سوخت سبز بیودیزل از روغن سوخته آشپزی به دو روش الکترولیز و رفلاکس در حضور کاتالیست کلینوپتیلولیت

مریم حلمی

گروه شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

کامبیز تحویل‌داری*

گروه شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

چکیده

امروزه به دلیل افزایش مصرف انرژی در جهان، کاهش منابع نفتی و آلودگی هوا، ضرورت سالم نگه داشتن محیط زیست امری ضروری و غیرقابل اجتناب است. بیودیزل یکی از منابع تجدیدپذیر است که جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی به شمار می‌آید. روش رایج تولید بیودیزل واکنش ترانس استریفیکاسیون از طریق رفلاکس است که دارای مشکلاتی از جمله مصرف بالای انرژی، واکنش صابونی شدن و به دلیل پساب‌های حاصل از آب‌شویی سبب آلودگی محیط زیست می‌گردد. لذا دانشمندان در پی یافتن روش جدیدی برای تولید بیودیزل هستند. در این تحقیق بیودیزل به دو روش مختلف رفلاکس و الکترولیز با نسبت‌های مختلف کاتالیست کلینوپتیلولیت، الکل به روغن و در مدت زمان‌های متفاوت تولید شد. مقدار بازده بیودیزل تولید شده به روش رفلاکس و الکترولیز به ترتیب برابر با ۷۲٪ و ۸۷٪ می‌باشد. جهت اطمینان از انجام واکنش طیف FTIR از بیودیزل گرفته شد. تمامی تست‌های استاندارد بر روی نمونه‌ها انجام شد که همه نتایج در محدوده مجاز استاندارد ASTM D6751, EN 14214 بود. در آخر تست‌های XRD, SEM و EDX جهت بررسی ویژگی‌های کاتالیست صورت گرفت.

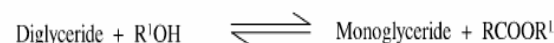
کلید واژه: بیودیزل، ترانس استری کردن، الکترولیز، رفلاکس، ژئولیت طبیعی، کلینوپتیلولیت

* Email: K_tahvildari@iau-tnb.ac.ir

مقدمه

یکی از مهم‌ترین اهداف اصلی جهت بهبود وضعیت محیط‌زیست، بخش حمل و نقل است. انتشار گازهای حاصل از احتراق سوخت‌های فسیلی در موتور ماشین‌ها سبب گرم شدن زمین، باران‌های اسیدی و از همه مهمتر انتشار گازهای آلاینده هوا شده است [۱]. هم‌چنین کاهش منابع نفتی دانشمندان را در پی یافتن منابع انرژی جایگزین و مناسب واداشته و بیودیزل به عنوان منبع انرژی تجدیدپذیر بسیار حائز اهمیت است [۲]. بیودیزل در محیط‌زیست نسبت به دیزل نفتی سازگاری بیشتری با محیط زیست دارد. زیست تخریب‌پذیر و غیر سمی است و در طول فرآیند سوختن انتشار گازهای سمی و خطرناک مانند CO و CO₂ کم‌تری تولید می‌نماید [۳].

اساساً بیودیزل ترکیبی از آلکیل‌استرهای با زنجیره بلند اسید چرب است که از واکنش ترانس‌استریفیکاسیون چربی حیوانات، روغن‌های گیاهی و روغن سوخته آشپزی با الکل (متانول و اتانول) در حضور کاتالیست مناسب به‌دست می‌آید [۴]. واکنش ترانس‌استریفیکاسیون شامل ۳ مرحله واکنش-های پی در پی: تبدیل تری‌گلیسرید به دی‌گلیسرید، دی-گلیسرید به مونوگلیسرید و در انتها مونو گلیسرید به مولکول استر و گلیسرول می‌باشد [۵].



شکل ۱: واکنش ترانس استری کردن تری گلیسریدها

کاتالیست‌های مورد استفاده در واکنش ترانس استریفیکاسیون به گروه‌های هموزن که کاتالیست‌های اسیدی، بازی هستند و هتروژن تقسیم می‌شوند [۶]. استفاده از کاتالیست‌های هموزن دارای معایبی می‌باشد از جمله استفاده مجدد از این نوع کاتالیست امکان‌پذیر نیست و باعث تشکیل امولسیون پایدار می‌شوند [۷]. هم‌چنین مقادیر زیادی آب زائد که از جدا و تمیز کردن محصولات بوجود می‌آید و

حاوی پساب‌های اسیدی و بازی مخاطره‌انگیز است و بعد از فرآیند آب‌شویی وارد محیط می‌گردد [۸].

کاتالیست‌های هتروژن منجر به کاهش آلودگی محیط زیست می‌شوند. این کاتالیست‌ها به راحتی قابل بازیابی و استفاده مجدد هستند و دارای طول عمر بالا می‌باشند. از طرفی استفاده از کاتالیست‌های جامد در راکتور بستر ثابت در فرآیندهای پیوسته بسیار کاربردی‌تر و آسان‌تر است [۷]. تنوع وسیعی از کاتالیزورهای ناهمگن موجود است که زئولیت‌ها نمونه‌ای از این نوع کاتالیست‌ها می‌باشند [۹]. زئولیت‌ها گروهی از آلومینوسیلیکات‌های هیدراته متبلور با خلل و فرج ریز هستند که به دو صورت سنتزی و طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. کلینوپتیلولیت زئولیت مورد استفاده در این تحقیق در دسته زئولیت‌های طبیعی قرار دارد [۱۰]. زئولیت‌ها بدلیل دارا بودن خواص فیزیکی و شیمیایی به‌عنوان جاذب نفت و مشتقات آن، تصفیه آب و فاضلاب و کاتالیزور در صنعت کاربرد دارند [۱۱].

روش‌های مختلفی برای تولید بیودیزل وجود دارد که عبارتند از میکروامولسیون، مایکروویو، پیرولیز، ترانس-استریفیکاسیون و... امروزه رایج‌ترین روش تولید بیودیزل واکنش ترانس‌استریفیکاسیون حاصل از رفلاکس است. اما اولین بار گوان و همکارانش [۱۲] از روش الکترولیز برای تولید بیودیزل استفاده کردند. الکترولیز زیر مجموعه علم الکتروشیمی بوده و فرآیندی آسان‌تر از سایرین است و شامل بعضی مزایایی است. از جمله مقدار آبی که در ماده اولیه (روغن) وجود دارد در روش رفلاکس سبب واکنش صابونی شدن شده و اثر مستقیمی بر روی فرآیند الکترولیز دارد. نهایتاً سبب هیدرولیز آب از آند به کاتد می‌شود. دیگر از مزایای این روش قابلیت آن در دمای اتاق است [۱۳].

در این تحقیق از دو روش مختلف رفلاکس و الکترولیز برای واکنش ترانس استری شدن به منظور دستیابی به بیش‌ترین بازده تولید بیودیزل استفاده شد. در نهایت علاوه بر بیش‌ترین راندمان عواملی مانند صرفه جویی در مصرف انرژی، کاهش مصرف آب جهت تولید بیودیزل و در نهایت کاهش هزینه‌های تولید بیودیزل مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده

مواد شیمیایی مورد استفاده، از قبیل پتاسیم هیدروکسید (۹۹٪ درصد)، سدیم سولفات (۹۹٪ درصد) همگی از شرکت مرک و کلینوپتیلولیت از شرکت نگین پودر سمنان تهیه شد. روغن پسماند نیز از رستوران‌های شهر تهران جمع‌آوری گردید.

دستگاه‌های مورد استفاده

دستگاه‌های استفاده شده عبارتند از کوره مدل BATE pc21 ساخت ایران، هیتر استایرر Ralbin com-81 ساخت شرکت Heidolph آلمان، آون مدل Lab tech ساخت ایران، دستگاه طیف سنج زیر قرمز مدل Nicolet 8700 ساخت هلند، منبع تغذیه مدل DC power supply 8303 ساخت ایران، الکتروود گرافیت، دستگاه ESEM مدل XL30 ESEM ساخت شرکت Philips آمریکا، دستگاه XRD مدل Stidy- mp ساخت شرکت STOE آلمان و ویسکوزیتر کانوندار (Fensk).

تهیه کاتالیزور

صد گرم KOH را در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل کرده، سپس پودر کلینوپتیلولیت به آن اضافه گردید، ترکیب حاصل به مدت ۲۴ ساعت بر روی همزن مغناطیسی همزده شد، سپس به مدت ۲۴ ساعت تا دمای 110°C داخل آون گرما داده تا خشک شود و در انتها در کوره در دمای 450°C کلسینه شد.

تهیه بیودیزل به روش رفلاکس

۵۰ گرم روغن پسماند آشپزی به همراه سولفات سدیم در حمام آب گرم به مدت ۳۰ دقیقه به منظور جذب آب روغن پیش گرم شد، سپس روغن از سولفات سدیم جدا شد و پس از آن (۱، ۲، ۳، ۴، ۵ درصد وزنی کاتالیست نسبت به وزن روغن) و متانول با نسبت مولی (۴:۱، ۶:۱، ۹:۱، ۱۱:۱) نسبت به روغن در دمای 60°C و در مدت زمان‌های متفاوت تحت رفلاکس و هم‌زدن قرار گرفت. جهت جداسازی بیودیزل و گلیسرین از قیف جداکننده استفاده شد که

گلیسرین به دلیل چگالی بیشتر نسبت به بیودیزل در قسمت پایین و بیودیزل روی آن قرار گرفت.

تهیه بیودیزل به روش الکترولیز

ابتدا ۵۰ گرم روغن پسماند آشپزی داخل راکتور ۱۰۰ سی سی ریخته شد، $1/3$ گرم آب مقطر به آن اضافه گردید و سپس (۱، ۲، ۳، ۴، ۵ درصد وزنی کاتالیست نسبت به وزن روغن) و الکل با نسبت مولی (۴:۱، ۶:۱، ۹:۱، ۱۱:۱) متانول به روغن) به محلول واکنش اضافه شد، مخلوط واکنش دوفازی بوده و جهت تک فاز کردن محلول از کمک حلال استون استفاده شد، سپس واکنش در دمای محیط و با اعمال جریان ۱۰ ولت و با دور همزن ۱۰۰ دور در دقیقه تحت واکنش قرار گرفت، در آزمایش بعد از نیم ساعت گلیسرین از بیودیزل جدا شد. اما برای کامل شدن فرآیند مدت زمان‌های مختلفی به آن اختصاص یافت.

آب‌شویی بیودیزل

عمل آب‌شویی جهت حذف کاتالیست، متانول، گلیسرین، صابون و استون باقی مانده انجام گرفت پس از جداسازی گلیسرین، محصول جهت آب‌شویی به قیف دکانتور بازگردانده شد و آب‌شویی تا خنثی شدن کامل محیط ادامه یافت که برای اطمینان از خنثی شدن محیط از کاغذ تورنسل استفاده شد. آب‌شویی بیودیزل ۲ تا ۴ بار انجام شد تا آب حاصل از شست‌وشو به طور کامل شفاف شود، جهت حذف آب باقی مانده، مقداری سدیم سولفات به آن اضافه گردید. بازده واکنش ترانس‌استری کردن نیز به صورت وزنی محاسبه شد.

$100 \times (\text{وزن روغن} / \text{وزن بیودیزل}) = \text{راندمان واکنش}$

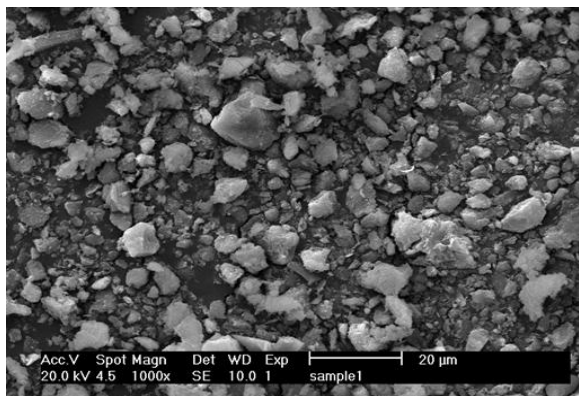
$72\% = \text{راندمان بیودیزل تولید شده به روش رفلاکس}$

$87\% = \text{راندمان بیودیزل تولید شده به روش الکترولیز}$

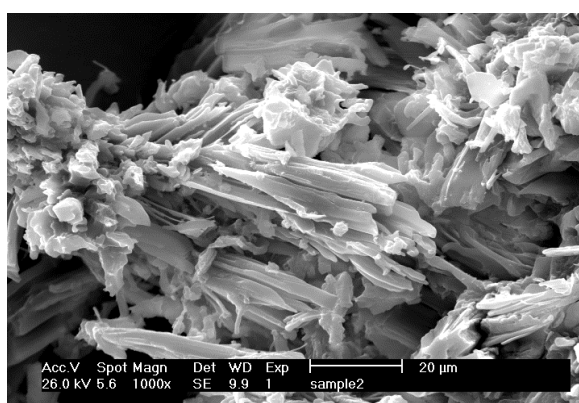
یافته‌ها

بررسی طیف XRD

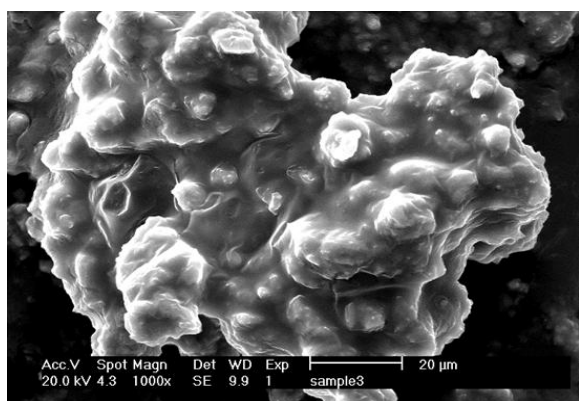
آنالیز XRD ساختمان داخلی، فاز جامد و کریستالی ژئولیت خام و کاتالیست را بررسی می‌کند. برای ژئولیت الگوی XRD نوارهای متفاوتی را در زاویه براگ (2θ) نشان می‌دهد که آن زاویه‌ها عبارتند از $25/69^{\circ}$ ، $48/36^{\circ}$



شکل ۴: نمودار SEM زئولیت خام.



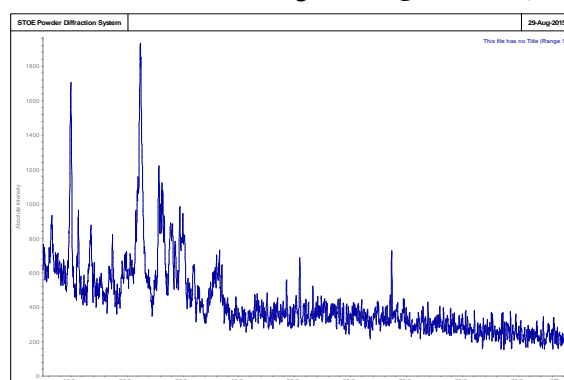
شکل ۵: نمودار SEM کاتالیست.



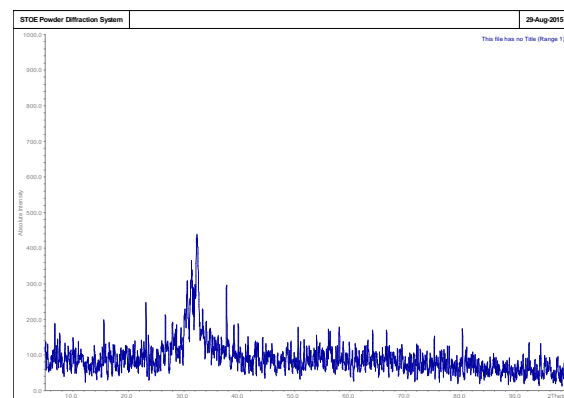
شکل ۶: نمودار SEM کاتالیست استفاده شده.

بعد از اتمام واکنش کاتالیزور بازیابی شده از محلول که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، به دلیل حل شدن KOH که جذب سطح کلینو شده بود به ساختار اولیه زئولیت شباهت بیشتری دارد و اطلاعات EDX نیز تاییدکننده این موضوع می‌باشد.

۲۹/۴۶°، ۲۲/۴۱° و ۹/۹۷° که بر اساس الگوهای XRD، زئولیت خام در گروه ترکیبات معدنی قرار می‌گیرد (شکل ۲). نوارهای XRD کاتالیست فاز جدید K_2O در محدوده (2θ) که شامل نوارهای ۳۷/۷۱°، ۳۲/۳۷° و ۵۶/۲۶° است که به دلیل کلسیناسیون، مولکول‌های پتاسیم هیدروکسید در سطح زئولیت تبدیل به K_2O شده‌اند. سبب عملکرد بالای کاتالیستی می‌گردیده‌اند. K_2O نقش مهمی را در واکنش ترانس‌استریفیکاسیون روغن به اسیدهای چرب آزاد ایفا می‌کند (شکل ۳).



شکل ۲: طیف XRD زئولیت خام.



شکل ۳: طیف XRD کاتالیست.

بررسی طیف SEM

با مقایسه دو طرح SEM، شکل ۴ و ۵ همان‌طور که مشاهده می‌شود با بارگذاری زئولیت کلینوپتیلولیت توسط KOH، مقدار زیادی از KOH بر روی سطح زئولیت جذب شده است و ساختار سوزنی شکلی بر روی ساختار کلینوپتیلولیت خام بوجود آورده است.

بررسی طیف EDX

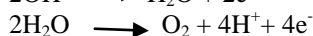
در این پروژه EDX برای اندازه‌گیری مقدار پتاسیم زئولیت خام، زئولیت بارگذاری شده و زئولیت بازیابی شده بکار گرفته شده است. که نتایج به ترتیب ۳/۳۶ wt%، ۲۲/۸۵ wt% و ۵۴/۰۸ wt% را نشان می‌دهد. افزایش میزان پتاسیم بعد از فرآیند بارگذاری بر روی ساختمان زئولیت کاملاً بر روی نمودارهای EDX مشخص می‌باشد.

روش الکترولیز

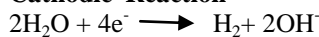
در این روش با اعمال جریان برق به دو الکترود صفحه‌ای گرافیت که با فاصله مشخصی از هم جدا شده‌اند، سلول‌های الکترولیز مخلوط واکنش که شامل الکل، روغن، کمک حلال، آب و کاتالیست هستند با محلول الکترولیت پوشیده می‌شوند. غلظت کاتالیست ۰/۵ درصد وزنی بر اساس وزن روغن و غلظت آب ۲ درصد وزنی بر اساس وزن مخلوط واکنش برای به دست آوردن مقدار بهینه تعیین گردیده است. عمل الکترولیز در دمای اتاق بر اساس روش (ولتاژ ثابت) صورت گرفت. ولتاژ الکترولیز ۱۰ ولت تنظیم گردید و با استفاده از هم‌زن مغناطیسی مخلوط واکنش هم‌زده شد.

زمانی که مخلوط واکنش شامل آب و KOH بارگذاری شده بر روی زئولیت طبیعی (کلینوپتیلولیت) وارد سلول الکترولیز می‌شود. در آند OH⁻ از پتاسیم هیدروکسید بارگذاری شده بر روی بستر جدا شده و الکترون آزاد می‌کند. از طرفی دیگر یون‌های هیدروکسیل و هیدروژن در کاتد تشکیل می‌شود. ترانس‌استریفیکاسیون تری‌گلیسرید^۱ الکل نیاز به یک گونه فعال یعنی یون متوکسید برای بدست آوردن یک بازده معقول از بیودیزل دارد که یونهای متوکسید از واکنش متانول با هیدروکسید به دست می‌آیند که به شدت هسته دوست هستند. این‌ها به کربن میانی در مولکول‌های گلیسرید حمله کرده و منجر به تولید متیل استر می‌شوند.

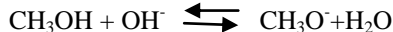
Anodic Reaction



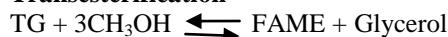
Cathodic Reaction



Proton transfer reaction

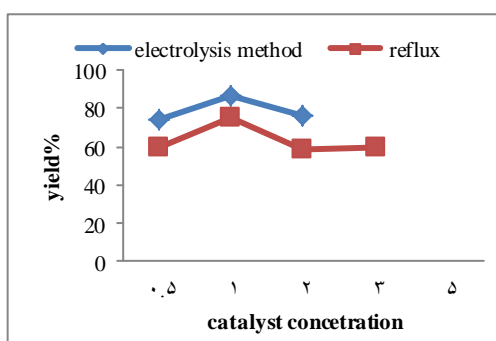


Transesterification



تغییر درصد وزنی کاتالیست

همان‌طور که در نمودار شکل ۷ قابل مشاهده است با افزایش مقدار درصد وزنی کاتالیست از ۰/۵ درصد وزنی به ۱ درصد وزنی در هر دو روش الکترولیز و رفلاکس راندمان افزایش یافته ولی بر خلاف انتظار با افزایش غلظت کاتالیست به ۲، ۳، ۵ درصد وزنی به دلیل واکنش صابونی شدن، راندمان کاهش یافته است.

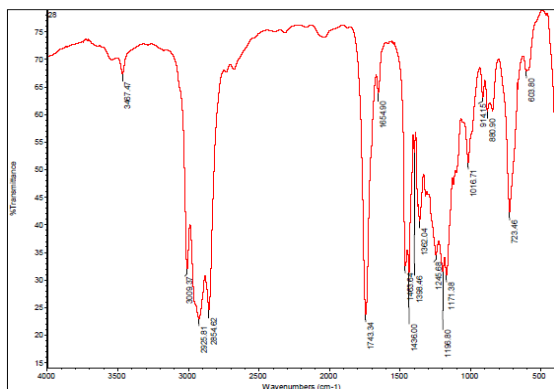


شکل ۷: بازده تولید بیودیزل به دو روش الکترولیز و رفلاکس در درصد-های مختلف کاتالیست.

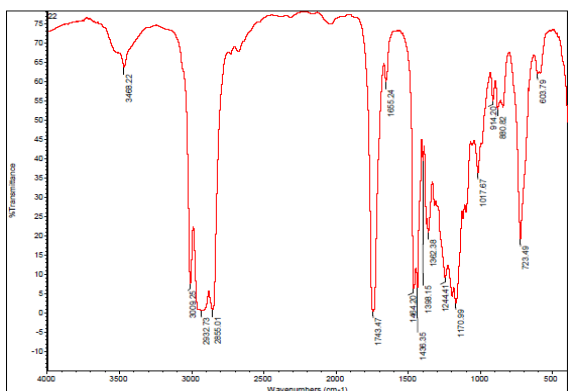
تغییر نسبت به متانول به روغن

در روش الکترولیز با افزایش مقدار الکل از نسبت ۱:۴ به ۱:۶ به بیشترین بازده ۸۷٪ رسیده شد ولی در روش رفلاکس با افزایش مقدار الکل به نسبت ۱:۹ (روغن به الکل ۱۱/۸ گرم)، بالاترین بازده ۷۲٪ شد و با افزایش مقدار الکل به نسبت ۱:۱۱ بازده کاهش یافت (شکل ۸).

^۱ Triglyceride(TG)



شکل ۱۰: طیف FTIR حاصل از کاتالیست کلینوپیتولیت در روش رفلکس.



شکل ۱۱: طیف FTIR حاصل از کاتالیست کلینوپیتولیت در روش الکترولیز.

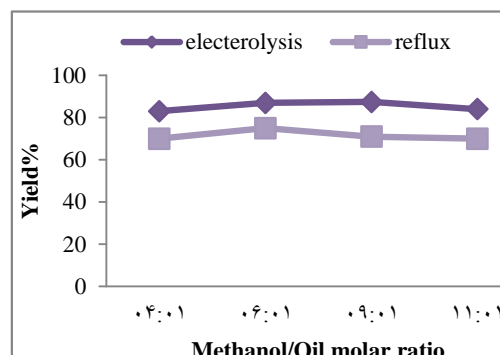
جدول ۱: پیک‌های شاخص در طیف بیودیزل

فرکانس (cm ⁻¹)	گروه عاملی	نوع ارتعاش	شدت
۱۴۳۶	-O-CH ₂	کششی	متوسط
۱۱۹۱	-O-CH ₂	جنبشی	متوسط
۱۱۷۰	-C-O-(CH ₂)	کششی متقارن	شدید

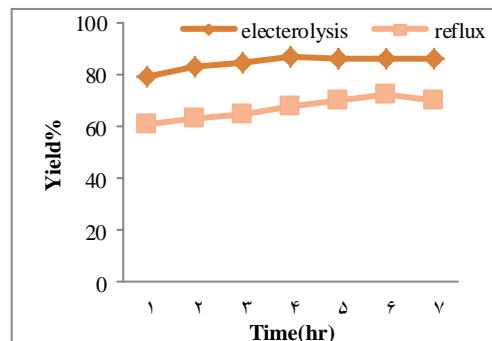
در جدول ۱ نوارهای شاخصی که در طیف بیودیزل وجود دارد نشان داده شده است. طیف FTIR محصول نهایی در ناحیه $1500-1000\text{ cm}^{-1}$ نمایشگر تولید بیودیزل است و نوار 1164 cm^{-1} در طیف تری گلیسرید متعلق به ارتعاش کششی گروه C-O متصل به CH_2 است. طیف متیل استر به نوار 1171 cm^{-1} ناشی از ارتعاش کششی گروه C-O متصل به CH_3 است [۱۴].

تغییر مدت زمان واکنش

در روش الکترولیز با افزایش مدت زمان واکنش از ۱ به ۴ ساعت راندمان واکنش افزایش یافت ولی با افزایش مدت زمان به دلیل بسته بودن سیستم تغییرات راندمان اندک و قابل چشم‌پوشی است. در مقایسه با روش الکترولیز، روش رفلکس با افزایش مدت زمان از ۱ تا ۶ ساعت راندمان به صورت صعودی افزایش یافته است ولی با افزایش زمان واکنش راندمان تغییرات چندانی نداشته است (شکل ۹).



شکل ۸: بازده تولید بیودیزل به دو روش الکترولیز و رفلکس در نسبت‌های مختلف الکل به روغن.



شکل ۹: بازده تولید بیودیزل به دو روش الکترولیز و رفلکس در مدت زمان‌های مختلف

بررسی طیف FTIR

در شکل ۱۰ طیف مربوط به FTIR بیودیزل تولید شده به روش رفلکس و شکل ۱۱ طیف مربوط به بیودیزل تولید شده به روش الکترولیز را نمایش داده است.

انجام آزمون‌های استاندارد سوخت

تعیین ویژگی‌های بیودیزل حاصل از واکنش ترانس-استریفیکاسیون با استفاده از آزمون‌های استاندارد سوخت انجام شد. آزمون‌های دانسیته، گرانروی، نقطه اشتعال، عدد ستان، نقطه ریزش و ابری شدن بر روی هر دو نمونه بیودیزل تولیدی انجام شد. نتایج به دست آمده با استانداردهای بیودیزل در آمریکا (ASTM D6751) و اروپا (EN14214) مقایسه شدند.

جدول ۲: نتایج به دست آمده از تست‌های استاندارد بیودیزل که به روش

الکترولیز و رفلاکس تهیه شده‌اند

نوع تست	الکترولیز	رفلاکس	ASTMD6751	EN14214
ویسکوزیته (mm ² /s)	۳/۸۴	۳	۱/۹-۶	۳/۵-۵
چگالی (Kg/m ³)	۸۶۰	۸۶۰	□	۸۶۰-۹۰۰
نقطه اشتعال (°C)	۱۹۰	۱۸۶	Max ۱۳۰	Min ۱۲۰
نقطه ابری شدن (°C)	۰	۴	-	-
نقطه ریزش (°C)	-۴	-۳	-	-
عدد ستان	۵۷	۵۷	Min ۴۷	Min ۵۱

مقایسه روش الکترولیز و رفلاکس

در روش الکترولیز با استفاده از الکتروگرافیت با اعمال جریان به الکتروده به دلیل ثبات حرارتی آن دمای الکتروده تغییر نمی‌کند و در تمام مراحل واکنش، الکتروده به محلول جریان اعمال می‌کند و این باعث کاهش زمان واکنش و عدم استفاده از هیتر در جهت حرارت‌دهی به محلول می‌شود که خود باعث صرفه‌جویی در زمان و انرژی خواهد شد [۱۵]. هم‌چنین در روش الکترولیز میزان جریان مورد نیاز برای انجام واکنش ۱۰ ولت است که از لحاظ مصرف انرژی و جنبه اقتصادی مقرون به صرفه است. حرکت یون‌ها بین کاتد و آند که به دلیل جریان الکتریکی است باعث کاهش تاثیر دور هم‌زن (۱۰۰ rpm) در این فرآیند می‌گردد. اما در روش رفلاکس برای انجام واکنش ترانس‌استریفیکاسیون نیاز به دمای ۶۰ °C است و برای ادامه واکنش نیز محلول باید با سرعت ۷۰۰-۶۰۰ rpm هم بخورد، لذا نیاز به استفاده از هیتر استایر است که خود باعث مصرف انرژی بیش‌تری خواهد شد.

در روش رفلاکس مقدار آب موجود در روغن سبب واکنش صابونی شدن و در نهایت کاهش راندمان واکنش می‌شود، اما در روش الکترولیز آب موجود در روغن برای واکنش هیچ مشکلی ایجاد نخواهد کرد. در روش الکترولیز به حدود ۱۰۰ آب (یک مرحله آب‌شویی) برای خنثی شدن محیط نیاز است در حالی که در روش رفلاکس به حدود ۶۰۰-۵۰۰ (۶-۵ مرحله آب‌شویی) احتیاج است.

بحث و نتیجه‌گیری

امروزه کاهش منابع انرژی فسیلی و افزایش آلودگی محیط زیستی باعث شده تا جوامع به دنبال سوخت‌های تمیز و تجدیدپذیر مانند بیواتانول و بیودیزل باشند. بیودیزل به دلیل سادگی نسبی فرآیند تولید در مقایسه با سایر سوخت‌ها، پتانسیل بیش‌تری برای تولید در مقیاس صنعتی دارد. کشورهای پیشرفته جهان در غالب پروژه‌های صنعتی، پژوهشی و دانشگاهی در تکاپوی راهکارهای مناسب برای دستیابی به تکنولوژی‌های بهینه و منابع مقرون به صرفه‌تری برای ورود فرآیندها هستند [۱۶]. در دنیا برای تولید بیودیزل روش‌های مختلفی وجود دارد که واکنش ترانس-استریفیکاسیون از طریق روش رفلاکس معمول و اقتصادی می‌باشد اما به دلیل نیاز به حرارت‌دهی برای انجام فرآیند و هم‌چنین حساسیت به وجود آب در روغن که باعث واکنش صابونی شدن می‌گردد، دانشمندان به دنبال روش جایگزین که ارزان‌تر و اقتصادی‌تر از سایر روش‌ها باشد، هستند. در این تحقیق روش رفلاکس با الکترولیز بررسی و نتایج نهایی با استانداردهای ASTM D6751 و EN14214 مقایسه شد.

با توجه به این که ۵۰ تا ۸۰ درصد قیمت تمام شده بیودیزل وابسته به قیمت ماده اولیه آن است، از این رو، قیمت بیودیزل حاصل تابع قیمت تمام شده روغن است، برای همین در این تحقیق از روغن پسماند آشپزی استفاده شد، هم‌چنین در تولید بیودیزل پس از بکارگیری روش رفلاکس در حضور کاتالیست هتروژن، در مرحله خالص‌سازی و خنثی‌سازی آن، تقریباً به ۵ تا ۶ مرحله آب‌شویی لازم بود اما در روش الکترولیز تقریباً به ۱ مرحله آب‌شویی برای خالص‌سازی بیودیزل نیاز است. راندمان بیودیزل تولید شده به روش الکترولیز برابر با ۸۷٪ و برای بیودیزل تولیدی به روش رفلاکس برابر با ۷۲٪ بود. همه ویژگی‌های دو نوع بیودیزل

[8] Xie, W., and Zhao, L., 2013, "Production of biodiesel by transesterification of soya bean oil using calcium supported tin oxides as heterogeneous catalysts.", *Eng. Manag.*, 76: 55-62.

[۹] زارع م، بررسی عملکرد و شناسایی نانو کاتالیست Ca/ZSM-5 در تولید بیودیزل، اولین همایش ملی کاتالیستهای صنعتی، شیراز، دانشگاه شیراز، ۱۳۹۱.

[10] Helmi, M., Fereidooni, L., Tahvildari, K., 2015, " Biodiesel produced from waste cooking oil in the presence of a heterogeneous catalyst based on zeolite. ", 1th International Conference on Chemistry and Chemical Engineering, Tehran, Iran.

[11] Kusuma, R. L., Hadinoto, J.P., Ayucitra, A., Soetaredjo, F. E., and Ismadji, S., 2013, "Natural zeolite from Pacitan Indonesia, as catalyst support for transesterification of palm oil.", *Appl. Clay. Sci.* 74: 121-126.

[12] Guan, G. and Kusakabe, K., 2009, "Synthesis of biodiesel fuel using an electrolysis method.", *Chem. Eng. J.*, 153.1: 159-163.

[13] Putra, R.S., Hartono, P., and Julianto, T.S., 2015, "Conversion of methyl ester from used cooking oil: the combined use of electrolysis process and chitosan.", *Energy Procedia*, 65: 309-316

[14] تحویل‌داری، ک، امانی، محمدعلی، تهیه بیودیزل از روغن گلرنگ و بررسی ویژگی‌های مخلوط ۲۰ درصد آن با سوخت دیزل، پژوهش‌های کاربردی در شیمی (پژوهش‌های شیمی کاربردی)، دوره ۴، شماره ۱۳، ۵۷-۶۴، ۱۳۸۹.

[15] عبداللهی اصل، م، بررسی شرایط عملیاتی واکنش ترانس-استریفیکاسیون برای تهیه بیودیزل با روش الکترولیز، رساله کارشناسی ارشد، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر ری، ۱۳۹۲.

[16] ضیائی، م، بررسی انواع کاتالیست‌های ناهمگن در تولید بیودیزل، اولین همایش ملی فناوری‌های نوین در شیمی و مهندسی شیمی، تهران، شرکت تعاونی علمی پژوهشی ویستا، ۱۳۹۲.

تولید شده با استانداردها مقایسه شد، که در محدوده مجاز بودند. از طرفی چون در روش الکترولیز برای پیشرفت واکنش نیاز به انتقال دما و حرارت نیست و واکنش ترانس-استریفیکاسیون بدون حرارت پیش می‌رود و نیز با اعمال جریان ۱۰ ولت فرآیند عملی است. شایان ذکر است که در این روش چون آب نیز به مخلوط واکنش اضافه می‌گردد و وجود آب در روغن، بر روی پیشرفت واکنش تاثیر ندارد. لذا این روش از لحاظ مصرف انرژی مقرون به صرفه تر و از لحاظ اقتصادی قابل سرمایه گذاری است.

منابع

- [1] Avhad, M. R., Marchetti, J. M., 2015, "A review on recent advancement in catalytic materials for biodiesel production." *Renew Sust Eng. Rev.* 50: 696-718..
- [2] Amani, H., Ahmad, Z., Hameed, B. H., 2014, "Highly active alumina-supported Cs-Zr mixed oxide catalysts for low-temperature transesterification of waste cooking oil." *Appl. Catal. A: Gen* 487: 16-25.
- [3] Bet-Moushoul, E., Farhadi, K., Mansourpanah, Y., 2016, "Application of CaO-based/Au nanoparticles as heterogeneous nanocatalysts in biodiesel production." *Fuel*, 164: 119-127.
- [4] Vasconcellos, A. de Paula, A. S., Luizon Filho, Roberto A., Farias, Lucas A., Eleni Gomes, Donato A.G, Aranda, and Nery Jose G., 2012, "Synergistic effect in the catalytic activity of lipase *Rhizomucor miehei* immobilized on zeolites for the production of biodiesel.", *Microp. and Mesop. Mat.*, 163: 343-355.
- [5] Wijaya, S., Winata, I., Indraswati, N. and Ismadji, S., 2013, "Waste capiz (*Amusium cristatum*) shell as a new heterogeneous catalyst for biodiesel production.", *Renew Eng.*, 50: 795-799.
- [6] Wei, L., Yin, P., Liu, X., 2013, "Microwave assisted esterification of free fatty acid over a heterogeneous catalyst for biodiesel production." *Eng. Manag.*, 76: 1009-1014
- [7] Basumatary, S., 2013, "Transesterification with heterogeneous catalyst in production of biodiesel: a review.", *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 5, No. 1: 1-7.