



Biodiesel Production from Capparis Spinosa Oil Using Recycled Ferromanganese Catalyst Loaded with Potassium

H. Mojahedi¹, K. Tahvildari², A. R. Hemmati^{3*}, F. Tadayon²

1- Ph. D. Student of Chemistry, Department of Chemistry, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Associate Professor of Chemistry, Department of Chemistry, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Associate Professor of Chemical Engineering, School of Chemical Petroleum and Gas Engineering Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran

Email: alireza_hemmati@iust.ac.ir

Abstract

Today the use of renewable and environmentally friendly fuels has attracted the attention of scientists more than ever, due to the emission of toxic and greenhouse gases resulting from the combustion of fossil fuels. In this research, capparispinosa (mountain watermelon) oil was used to produce biodiesel and recycled ferromanganese catalyst. ferromanganese catalyst with different concentrations of potassium loading and product production efficiency were calculated. The best efficiency (86.5%) was obtained in the condition of 5 M concentration of potassium in 3 grams of ferromanganese catalyst. The morphology and characterization of the prepared catalyst were determined by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM) analysis, X-ray energy diffraction spectroscopy (EDAX), and infrared spectroscopy (FTIR) analysis. Comparing the results of the structural investigations of the produced biodiesel with the standard sample shows a successful production with a high purity percentage.

Received: 4 March 2024

Accepted: 18 November 2024

Page Number: 8-18

Keywords:

Biodiesel,
Alkaline Heterogeneous
Catalyst,
Capparis Oil,
Ferromanganese

Please Cite this Article Using:

Mojahedi, H., Tahvildari, K., Hemmati, A. R., & Tadayon, F. (2025). Biodiesel Production from Capparis Spinosa Oil Using Recycled Ferromanganese Catalyst Loaded with Potassium. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 24(141), 8-18, [In Persian].



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0).



تهیه سوخت بایودیزل از روغن کاپاریس اسپینوزا با استفاده از کاتالیست بازیافتی فرومگنز بارگذاری شده با پتاس

هادی مجاهدی^۱، کامبیز تحویلدار^۲، علیرضا همتی^{۳*}، فریبا تدین^۲

۱- دانشجوی دکتری شیمی کاربردی، دانشکده شیمی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشیار شیمی، دانشکده شیمی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- دانشیار مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز،

دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

پیام‌نگار: alireza_hemmati@iust.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر، استفاده از سوخت‌های فسیلی سبب انتشار آلاینده‌های خطرناک به محیط زیست شده و آسیب‌های جبران‌ناپذیری به آن زده است. لذا، محققان به دنبال سوخت‌های پاک و جایگزین مانند بایودیزل هستند. اما هزینه بالای تولید بایودیزل، استفاده از آن را در مقیاس صنعتی دشوار کرده است. برای حل این مشکل، در این پژوهش از روغن کاپاریس اسپینوزا (هندوانه کوهی) به عنوان روغن اولیه غیر خوراکی برای تولید بایودیزل با استفاده از کاتالیست بازیافتی فرومگنز-که حاصل پسماند کارخانه‌های روی است- به عنوان پایه کاتالیست هتروژنی بازی استفاده شد. کاتالیست فرومگنز با غلظت‌های متفاوت از پتاسیم هیدروکسید (۱، ۲، ۳، ۵ مولار) بارگذاری و راندمان تولید محصول حساب شد. بهترین راندمان (۸۶٪/۵) در شرایط غلظت ۵ مولار از پتاس در ۳ گرم از کاتالیست فرومگنز به دست آمد. ریخت‌شناسی و مشخصه‌یابی کاتالیست تهیه شده با الگوی پراش X (XRD) و آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDAX)، آنالیز طیف‌سنجی فروسرخ (FTIR) مشخص شد. تمام نتایج آنالیز دستگاهی سنتز موفقیت‌آمیز کاتالیست را تأیید کردند. مقایسه نتایج بررسی‌های ساختاری بایودیزل تولید شده با نمونه استاندارد، نشان‌دهنده تولید موفقیت‌آمیز با درصد خلوص بالا است.

کلیدواژه‌ها:

بایودیزل،
کاتالیست هتروژن قلیایی،
روغن کاپاریس،
فرومگنز

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۸
شماره صفحات: ۸ تا ۱۸

* تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز

استناد به مقاله:

مجاهدی، هادی، تحویلدار، کامبیز، همتی، علیرضا، و تدین، فریبا. (۱۴۰۴). تهیه سوخت بایودیزل از روغن کاپاریس اسپینوزا با استفاده از کاتالیست بازیافتی فرومگنز بارگذاری شده با پتاس، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۴ (۱۴۱)، ۸-۱۸.

۱. مقدمه

امروزه، افزایش نیاز به مصرف انرژی در دو بخش صنعت و حمل و نقل روند صعودی دارد که در این میان، سوخت‌های فسیلی از جمله زغال سنگ، گازوئیل و بنزین منبع اصلی تأمین انرژی به‌شمار می‌رود [۱]. اما مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی، سبب افزایش قیمت جهانی آن شده و همچنین، منابع طبیعی آن‌ها روبه‌کاهش است. از طرفی نیز، احتراق سوخت‌های فسیلی سبب انتشار گازهای گلخانه‌ای شده است. انتشار این گازها باعث به‌وجود آمدن مشکلات محیط زیستی مانند باران‌های اسیدی، گرم شدن زمین و انتشار گازهای گلخانه‌ای شده است [۲].

بنابراین، محققان به دنبال سوخت‌های جایگزین سازگار با محیط زیست هستند. بیودیزل را می‌توان به عنوان یکی از سوخت‌های سبز نام برد که سازگاری بالایی با محیط زیست دارد؛ تجدیدپذیر و غیرسمی است و انتشار گازهای سمی و خطرناک را- مانند SO_x ، CO_2 و NO_2 که برای محیط زیست زیان‌آور هستند- کاهش می‌دهد [۳].

بیودیزل خواص فیزیکی و شیمیایی مشابه با سوخت دیزل دارد؛ اما عاری از هرگونه گوگرد و ترکیبات آروماتیک است [۴]. این سوخت به نسبت‌های مختلف با دیزل ترکیب می‌شود [۵] و در نتیجه، نیازی به تغییر خاص در موتور دیزلی نیست [۵]. بیودیزل در ساختار مولکولی خود دارای اتم‌های اکسیژن است که موجب احتراق بهتر سوخت و کاهش آلودگی می‌شود [۶-۷] همچنین، بیودیزل دارای روان‌کاری خوبی است و استفاده از آن باعث کاهش هیدروکربن‌های نسوخته به مقدار ۴۰ تا ۷۰ درصد می‌شود [۸-۹].

بهترین روش برای تولید بیودیزل، واکنش ترنس استری شدن (شکل ۱)) است که در آن روغن تری‌گلیسیرید با الکل واکنش می‌دهد و مولکول استر اسید چرب (FAME) و گلیسرول تولید می‌شود [۱۰]. از مهم‌ترین منابع روغن تری‌گلیسیرید، می‌توان به روغن‌های خوراکی و غیر خوراکی تازه گیاهی، چربی حیوانات و روغن ضایعاتی اشاره کرد [۱۱-۱۲].

در مقیاس آزمایشگاهی و تحقیقاتی، طیف گسترده‌ای از کاتالیست‌ها در واکنش تبادل استری استفاده می‌شوند، اما در صنایع تنها از کاتالیست‌های بازی یا اسیدی همگن به‌طور بسیار محدود استفاده می‌شود. سرعت واکنش با کاتالیست بازی حدود ۴۰۰۰ برابر سریع‌تر

از واکنش با کاتالیست اسیدی است [۱۳].

به دلیل سرعت بالای واکنش، مدت زمان کم و دمای پایین مورد نیاز و نسبت پایین متانول به روغن که سبب بازده بالای واکنش می‌شود، معمولاً در صنایع از کاتالیست هموزن برای تولید بیودیزل استفاده می‌شود. از کاستی‌های اصلی این نوع کاتالیست‌ها، فرایند جداسازی دشوار و نیاز به حجم زیاد آب برای آب‌شویی است. همچنین، نسبت به رطوبت و مقدار اسید چرب آزاد- که سبب واکنش صابونی می‌شود- حساس است [۱۴]. امروزه با استفاده از کاتالیست هتروژن قلیایی، این مشکلات کاهش یافته است؛ چراکه کاتالیست هتروژن به آسانی قابل بازیابی است و اثرات منفی فرایند را کاهش می‌دهد [۱۵]. قیمت بالای پایه کاتالیست‌های هتروژنی، مانند گرافن اکساید و MOFs استفاده از آن‌ها را در مقیاس آزمایشگاهی محدود کرده است. لذا، محققان به دنبال کاتالیست‌های بازیافتی هستند. در این میان، کاتالیست فرومگنز توجهات را به خود جلب کرده است. فرومگنز آلیاژ آهن و منگنز با سایر عناصر مانند کربن، سولفور و نیتروژن است. فرومگنز در صنعت کاربردهای فراوانی دارد؛ از جمله ماده اکتیو به استیل، باتری و پایه کاتالیست هتروژنی است. باید به این نکته توجه داشت که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی فرومگنز به ترکیب درصد عناصر تشکیل دهنده آن وابسته است. منگنز اکسید و اکسید آهن کاتالیست‌های سازگار با محیط زیست به حساب می‌آیند [۱۶].

در این تحقیق از روغن کاپاریس اسپینوزا یا همان هندوانه کوهی به عنوان روغن تری‌گلیسیرید اولیه برای تولید بیودیزل استفاده شده است. به دلیل کاستی‌های کاتالیست‌های هموزن از کاتالیست هتروژن فرومگنز- که بازیافتی است- نیز استفاده شده است. کاتالیست فرومگنز با پتاس ۵ و ۱۰ مولار بارگذاری شده است.

۲. مواد و روش‌ها

میوه کاپاریس از باغ‌های استان آذربایجان غربی جمع‌آوری شد. مواد شیمیایی مورد استفاده؛ متانول (خلوص ۹۹٪) و پتاسیم هیدروکسید (خلوص ۹۹٪) از شرکت مرک و پودر فرومگنز از کارخانه کرمان تهیه شد.

۱-۲ استخراج روغن

برای استخراج روغن‌های گیاهی معمولاً از دو روش مکانیکی و روش شیمیایی استفاده می‌شود [۱۷]. در روش مکانیکی، دانه‌های روغنی خشک و آسیاب می‌شود. سپس، با استفاده از دستگاه پرس فشرده می‌شود و روغن آن خارج می‌شود. در روش شیمیایی، دانه‌های روغنی ابتدا خشک و پس از آسیاب شدن در مجاورت حلال نرمال هگزان در دمای ۵۵-۶۰ درجه سلسیوس قرار می‌گیرد تا انتقال جرم از جامد به حلال انجام شود. در این تحقیق، از روش مکانیکی برای روغن‌گیری استفاده شده است.

۲-۲ تهیه کاتالیست

۱۰۰ mL محلول ۵ M پتاس تهیه و به ۵g پودر فرومگنز اضافه شد و به مدت یک ساعت و با دور همزن ۲۰۰ rpm کاملاً مخلوط شد. بدین ترتیب، پتاس روی فرومگنز بارگذاری می‌شود. رسوب حاصل، به وسیله صافی جدا و در آن با دمای ۹۰ درجه سلسیوس خشک می‌شود. این مراحل برای بارگذاری با پتاس ۱۰ M انجام می‌گیرد.

۳-۲ واکنش ترنس استری شدن

۵۰ g روغن با ۳۰ گرم متانول به همراه نسبت‌های مختلف کاتالیست (۵ و ۳ و ۲) گرم در دمای ۶۵ درجه سلسیوس به مدت ۶ ساعت رفلکس شد. این عمل در شرایط کاملاً یکسان برای غلظت‌های ۵ M و ۱۰ M تکرار شد. پس از پایان واکنش، محصول بیودیزل چهار مرتبه آب شویی می‌شود. بدین ترتیب گلیسرین، الکل و متانول باقی مانده از بیودیزل جدا می‌شود و عمل شست‌وشو آن قدر ادامه می‌یابد که محلول حاصل نیز به رنگ شفاف درآید. سپس، مخلوط به دکانتور منتقل و بیودیزل از آب جداسازی و با مقداری سولفات سدیم، به مدت ۱۰ دقیقه مخلوط می‌شود تا آب باقی مانده در بیودیزل گرفته شود. راندمان تولید بیودیزل با استفاده از معادله زیر اندازه‌گیری می‌شود [۷].

$$100 \times (\text{وزن روغن} / \text{وزن بیودیزل}) = (\%) \text{ بازده گران روی بیودیزل}$$

نیز اندازه‌گیری شد. شش مورد تست انجام شده به روش رفلکس همراه نمودار راندمان به شرح ذیل است (جدول (۱)).

۳. بحث و نتیجه‌گیری

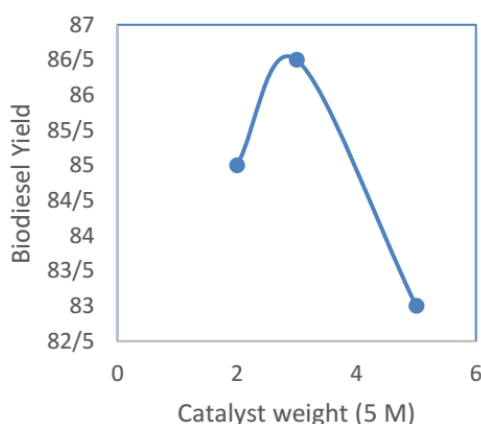
۱-۳ اثر غلظت KOH و درصد وزنی کاتالیست

با بررسی شکل‌های (۱) و (۲) نتیجه‌گیری می‌شود که بالاترین بازده مربوط به کاتالیست بارگذاری شده با پتاس ۵ مولار و مقدار ۳ g است. به دلیل این که در حضور مقادیر بالای فاز فعال بازی، واکنش جانبی صابونی شدن روی می‌دهد که راندمان واکنش را به شدت کم می‌کند.

جدول ۱. شرایط واکنش ترانس استریفیکاسیون.

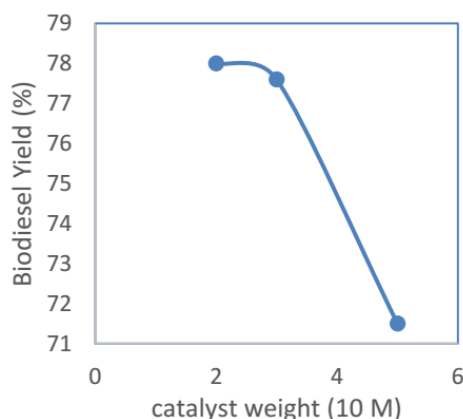
Table 1. Transesterification condition.

KOH concentration (M)	Catalyst Weight (wt%)	Biodiesel Yield (%)
5	3	86.5
5	5	83
5	2	85
10	3	77.6
10	5	71.5
10	2	78.2



شکل ۱. نمودار بازده کاتالیست بارگذاری شده با پتاس ۵ مولار.

Figure 2. Plot of efficiency of catalyst loaded with 5 M potassium.



شکل ۲. نمودار بازده کاتالیست بارگذاری شده با پتاس ۱۰ مولار.

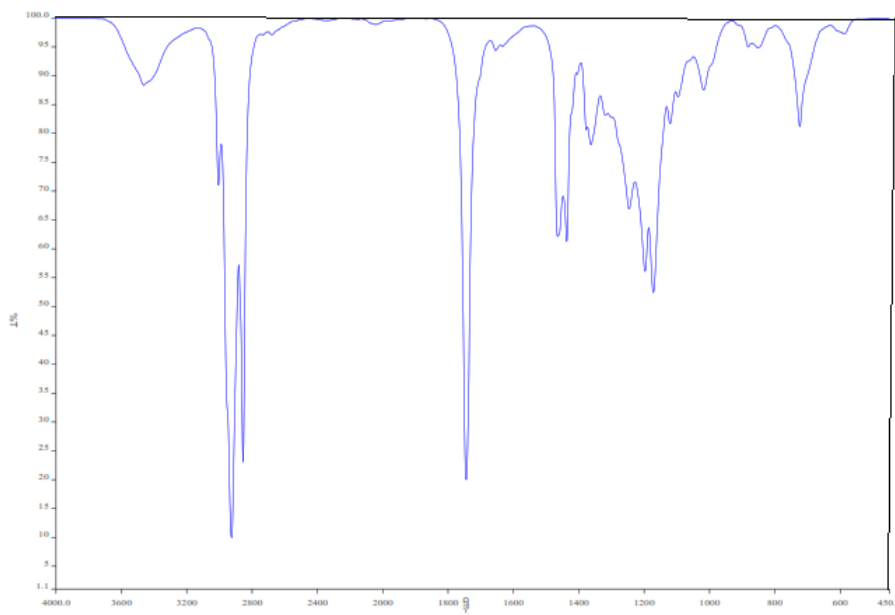
Figure 3. Plot of efficiency of catalyst loaded with 10 M potassium.

۲-۳ بررسی خواص بیودیزل

۱-۲-۳ آنالیز FTIR

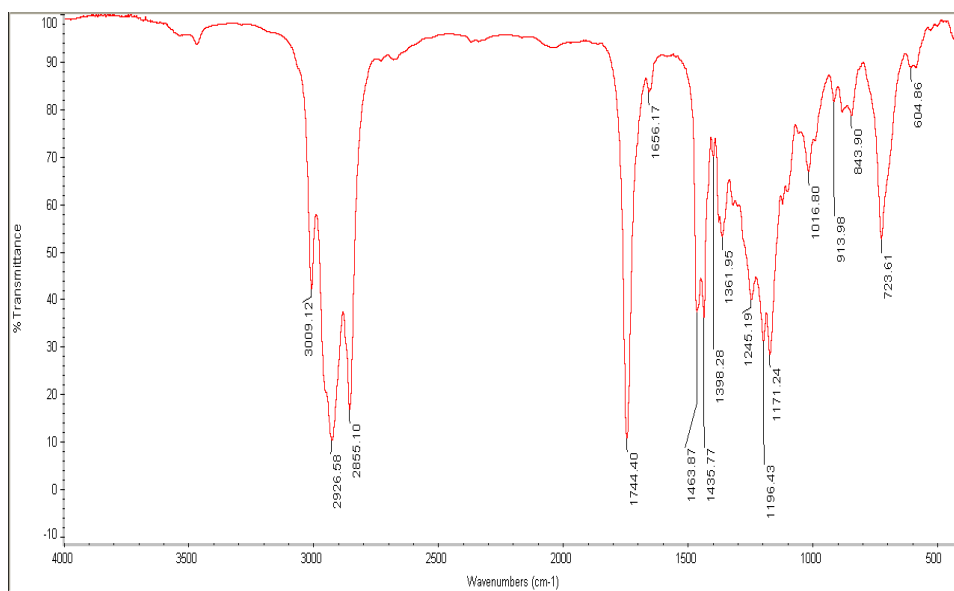
از بیودیزل تولیدشده، طیف FTIR گرفته (شکل (۳)) و با طیف FTIR نمونه استاندارد (شکل (۴)) مقایسه شد. پیک‌های 1436 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی نامتقارن گروه عاملی H-C

است. و 1195 cm^{-1} و 1170 cm^{-1} مربوط به ارتعاش خمشی گروه عاملی O-C است و نواحی 3200 تا 3500 cm^{-1} نیز وجود گروه عاملی OH- را نشان می‌دهد. از آنجایی که هر دو طیف دارای پیک‌های یکسانی هستند، بنابراین محصول به دست آمده، همان بیودیزل است [۷].



شکل ۳. طیف FTIR بیودیزل تولیدشده در شرایط بهینه.

Figure 3. FTIR spectrum for produced biodiesel.



شکل ۴. طیف FTIR استاندارد [۴].

Figure 4. FTIR spectrum for standard biodiesel.

۲-۲-۲ آنالیز طیفسنج جرمی

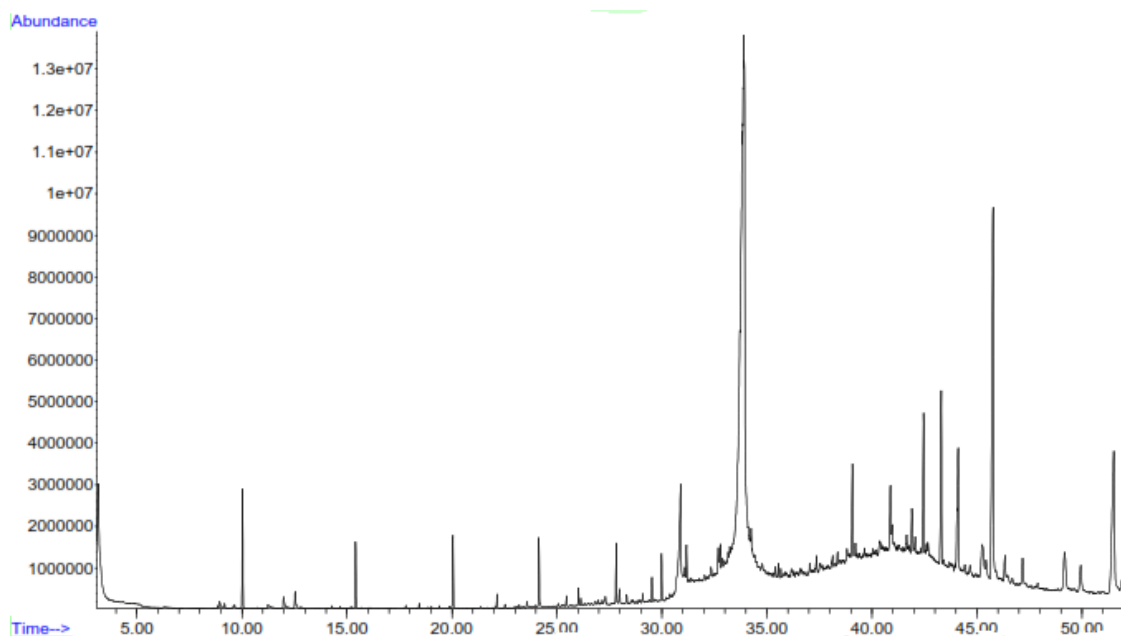
آنالیز طیفسنج جرمی به شناسایی و تعیین نوع و درصد اسیدهای چرب روغن کمک می‌کند. روغن کاپاریس دارای چهار نوع اسید چرب است؛ باید به این نکته اشاره کرد که نوع و مقدار اسیدهای چرب بر روی پایداری و خواص بیودیزل اثر دارد. بیش از ۸۰٪ از اسیدهای چرب روغن اولیه جزء اسیدهای چرب غیر اشباع^۱ است. داده‌های آنالیز طیفسنج جرمی مشخص کرد که لینولئیک اسید^۲ و اولئیک اسید^۳ بیشترین درصد اسیدهای چرب غیر اشباع را تشکیل می‌دهند. پالمیتیک اسید^۴ و استئاریک اسید^۵ جزء اسیدهای چرب غیر اشباع هستند. عدد اسیدی^۶ روغن کاپاریس با استفاده از روش تیتراسیون اندازه‌گیری شد و مقدار آن برابر با ۴/۰۴ mg KOH/g است که در محدوده استاندارد تعیین شده است. (شکل (۵))

۳-۳ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی کاتالیست

ابتدا، از کاتالیست پایه یعنی فرومگنژ خام طیف FTIR

گرفته می‌شود که در شکل (۶) پیدا است. با بررسی طیف کاتالیست پایه و مشاهده پیک تیز در ناحیه 3481 cm^{-1} که مربوط به OH است و با استناد به مقاله سبا و همکاران [۵]، که این پیک مربوط به آب جذب شده در کاتالیست است، سپس طیف FTIR مربوط به کاتالیست بارگذاری شده با پتاس ۵ M در شکل (۷)، مشاهده می‌شود و با مقایسه آن با طیف کاتالیست پایه که در ناحیه 3393 cm^{-1} سانتیمتر قابل مشاهده است، می‌توان نتیجه گرفت که پیک به نسبت پیک موجود در کاتالیست اولیه پهن تر شده، که بیانگر بارگذاری KOH و افزایش غلظت OH است.

بامقایسه شکل (۶) و (۷) که مربوط به بارگذاری پتاس ۵ M و ۱۰ M است و توجه به ناحیه جذبی OH علاوه بر این که استدلال می‌شود که بارگذاری پتاس ۱۰ M روی کاتالیست به صورت موفقیت آمیز انجام شده است، از آنجایی که پیک مربوط به ناحیه OH در 3340 cm^{-1} پهن تر از پیک مربوط به کاتالیست بارگذاری شده با پتاس ۵ M است.



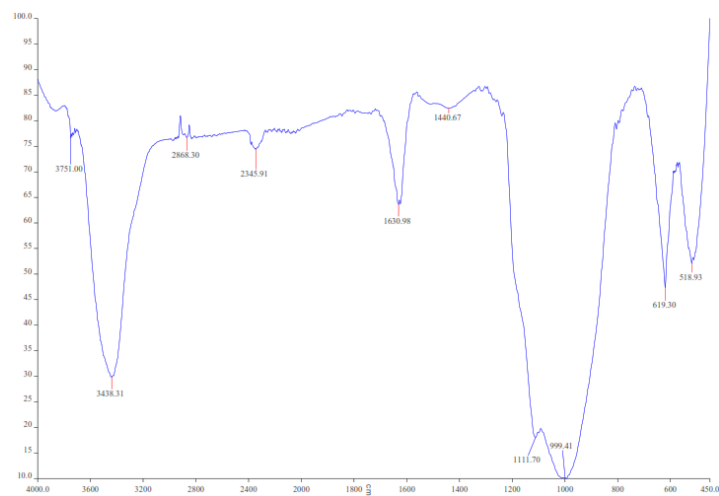
شکل ۵. آنالیز GC-MS

Figure 5. GC.MS analysis.

1. Unsaturated Fatty Acids
 4. Palmitic Acid

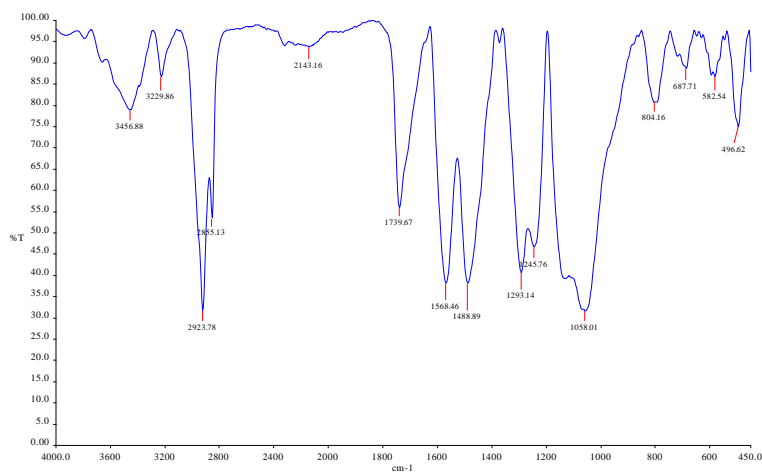
2. Linoleic Acid
 5. Stearic Acid

3. Oleic Acid
 6. Acid Value



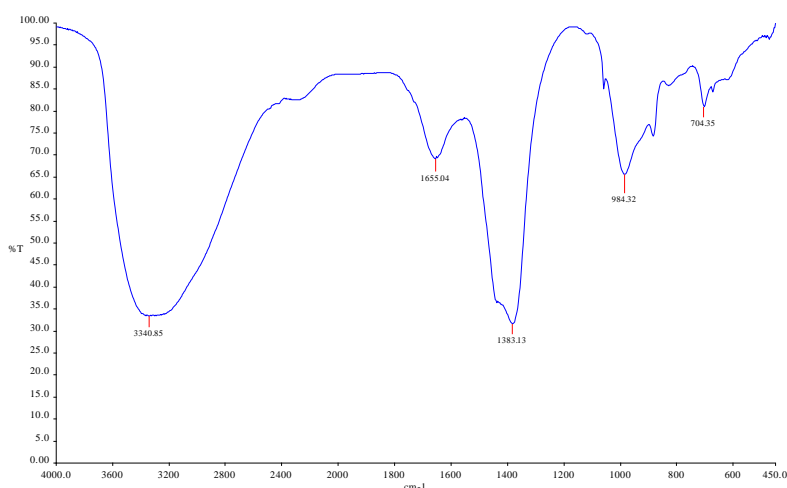
شکل ۶. طیف FTIR کاتالیست پایه.

Figure 6. FTIR spectrum for catalyst support.



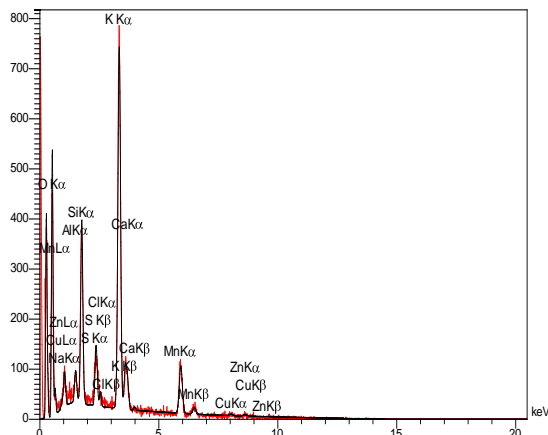
شکل ۷. طیف FTIR مربوطه بارگذاری پتاس ۵M.

Figure 7. FTIR spectrum for catalyst 5 M.



شکل ۸. طیف FTIR مربوطه بارگذاری پتاس ۱۰M.

Figure 8. FTIR spectrum for catalyst loaded with KOH 10 M.



شکل ۱۱. نمودار EDAX مربوطه کاتالیست بارگذاری شده با پتاس ۱۰ مولار.

Figure 11. EDX analysis for catalyst loaded with KOH 10 M.

جدول ۲. میانگین درصد وزنی عناصر موجود در کاتالیست‌ها.

Table 2. average weight percentage of elements in catalysts.

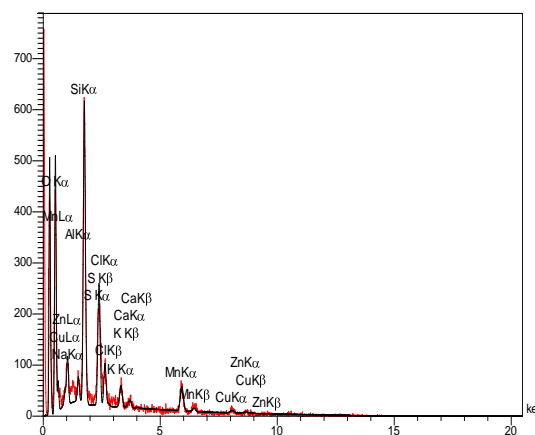
Elements	5 M		10 M		Catalyst support	
	W%	A%	W%	A%	W%	A%
C	38.90	52.78	31.53	45.63	46.78	59.11
O	35.65	36.31	37.07	40.28	34.20	32.45
Na	0.70	0.49	0.47	0.35	1.08	0.71
Al	0.72	0.43	0.70	0.45	0.52	0.29
Si	2.58	1.50	3.96	2.45	6.24	3.37
S	2.26	1.15	1.67	0.90	3.51	1.66
Cl	0.24	0.11	0.38	0.19	1.40	0.60
K	12.90	5.38	15.71	6.98	0.94	0.37
Ca	0.99	0.40	1.13	0.49	0.34	0.13
Mn	3.64	1.08	6.07	1.92	3.16	0.87
Cu	0.87	0.22	0.52	0.14	1.01	0.24
Zn	0.56	0.14	0.79	0.21	0.82	0.19

همان‌طور که از جدول (۲) برمی‌آید، عناصر C و O در پایه کاتالیست، درصد وزنی بالایی دارند؛ اما با بارگذاری KOH به‌نسب‌های متفاوت ۵ و ۱۰ مولار درصد، این عناصر کاهش یافته‌است. از طرفی، مشاهده می‌شود که مقدار پتاسیم موجود در کاتالیست‌ها به‌ترتیب از پایه به ۵ و ۱۰ مولار افزایش قابل توجهی داشته‌است که نشان‌دهنده بارگذاری پتاس بر روی کاتالیست است.

تصاویر SEM گرفته‌شده از سه کاتالیست در مقیاس ۲ میکرومتر، نشان‌دهنده کلوخه‌شدن کاتالیست در بارگذاری‌های ۵ مولار و ۱۰ مولار نسبت به حالت پایه است. این کلوخه‌شدن نشان‌دهنده

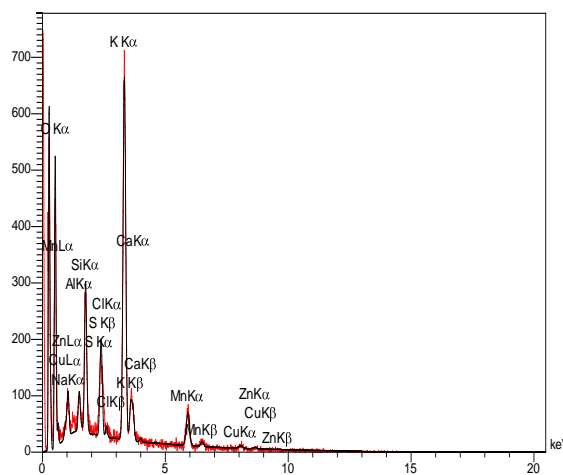
طیف EDAX درصد عناصر موجود در ماده را نشان می‌دهد. از کاتالیست فرومگنیز پایه و کاتالیست‌های بارگذاری‌شده با پتاس ۵ مولار و ۱۰ مولار تست EDAX گرفته‌شد. جدول میانگین درصد وزنی عناصر موجود در هر سه کاتالیست طبق جدول (۲) است.

همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود درصد عنصر K پتاسیم در حالت پایه ۰/۹۴ درصد وزنی بوده‌است و در کاتالیست‌های بارگذاری‌شده به ۱۲/۹۰ و ۱۵/۷۱ درصد وزنی افزایش پیدا کرده‌است که این مؤید بارگذاری پتاس بر روی کاتالیست است. هم‌چنین، سه نمودار از عناصر موجود در هر سه کاتالیست مطابق آزمون EDAX به این ترتیب است:



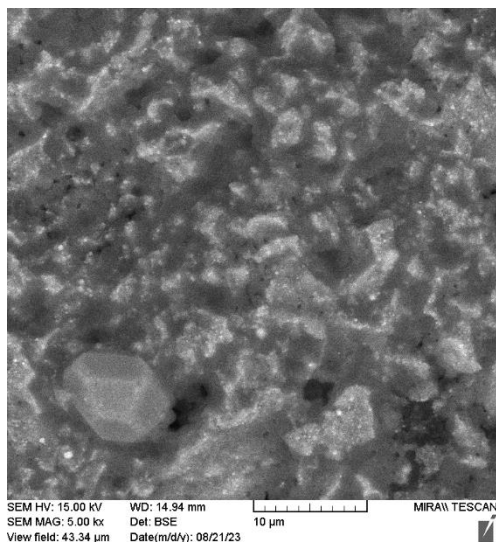
شکل ۹. نمودار EDAX مربوطه کاتالیست پایه خالص.

Figure 9. EDX analysis for catalyst support.



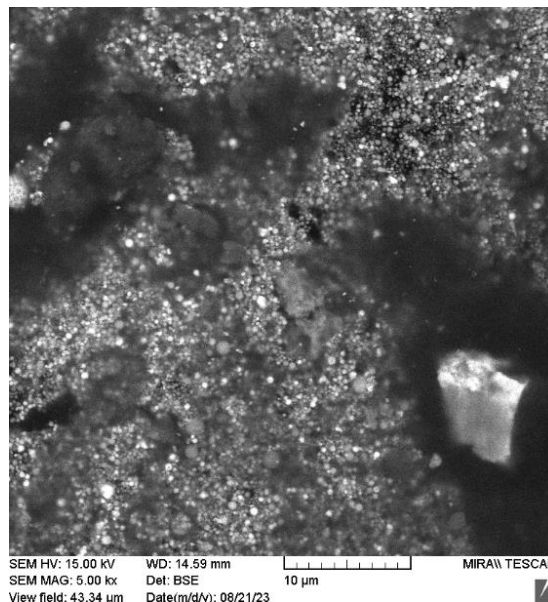
شکل ۱۰. نمودار EDAX مربوطه کاتالیست بارگذاری شده با پتاس ۵ مولار.

Figure 10. EDX analysis for catalyst loaded with KOH 10 M.



شکل ۱۴. SEM کاتالیست بارگذاری شده با پتاس ۱۰ مولار.
Figure 14. SEM image for catalyst loaded with KOH 10 M.

بارگذاری پتاس است؛ ولی بامقایسه عکس مربوط به کاتالیست ۵ مولار و ۱۰ مولار با یکدیگر می‌توان به این نکته پی برد که در کاتالیست بارگذاری شده با پتاس ۱۰ مولار سطح تماس به نسبت کاتالیست بارگذاری شده با پتاس ۵ مولار کمتر شده است؛ در نتیجه راندمان نیز کاهش یافته است.



شکل ۱۲. SEM کاتالیست پایه.
Figure 12. SEM images for catalyst support.

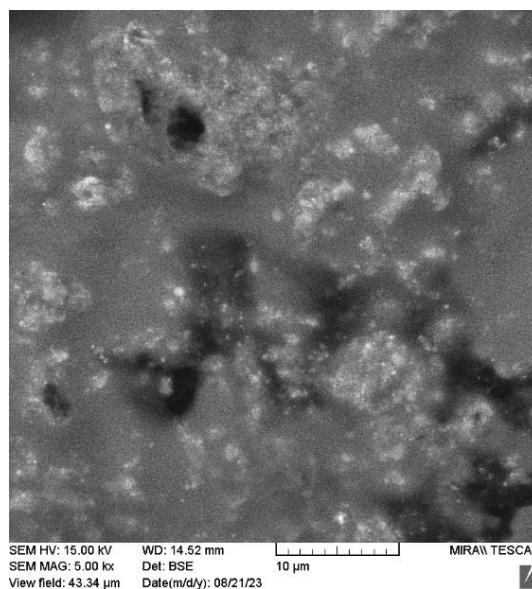
۳-۴ مقایسه مطالعه حاضر با سایر کارها

در مطالعه حاضر، با استفاده از ۳ گرم کاتالیست پتاس ۵ مولار فرومگنز، حداکثر تولید بیودیزل ۸۶/۵ درصد گزارش شد. این کاتالیست هتروژنی فرومگنز بارگذاری شده با پتاس، توانست بیودیزل را با راندمان بالایی تولید کند. هم‌چنین، این نوع کاتالیست ارزان قیمت است؛ زیرا نوعی پسماند به حساب می‌آید. در حالی که مواد متخلخل راندمان مشابهی برای تولید بیودیزل دارند، روش سنتز، مواد اولیه آن هزینه بر است.

جدول ۳. مقایسه مطالعه حاضر با سایر مطالعات.

Table 3. Compression of present work with other researches.

Catalyst name	Catalyst weight (wt%)	Biodiesel Yield (%)	Ref
KOH/ferromanganese	3	86.5	Recent work
KOH-NaX	2.3	90.33	(Helmi, Tahvildari, et al., 2021)
KOH-Al ₂ O ₃	1.6	94	(Helmi, Hemmati, & Tahvildari, 2021)
KOH-Clinoptilolite	10	79	(Helmi, Hemmati, & Tahvildari, 2022)



شکل ۱۳. SEM کاتالیست بارگذاری شده با پتاس ۵ M.
Figure 13. SEM images for catalyst loaded with KOH 5 M.

- [4] Bazooyar, B., Jomekian, A., & Shariati, A. (2017). Analysis of the formation and interaction of nitrogen oxides in a rapeseed methyl ester nonpremixed turbulent flame. *Energy & Fuels*, 31(8), 8708-8721.
- [5] Mohseni, F., & Zenooz, A. M. (2023). Study of Parameters Effective on Flocculation of Chlorella sp. Microalgae with Alum. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 22(127), 7-17, [In Persian].
- [6] Helmi, M., Hemmati, A., & Tahvildari, K. (2022). Production of biodiesel from salvia mirzayanii oil via electrolysis using KOH/Clinoptilolite as catalyst. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 20(1), 187-204.
- [7] Helmi, M., Tahvildari, K., & Hemmati, A. (2021). Parametric optimization of biodiesel synthesis from Capparis spinosa oil using NaOH/NaX as nanoheterogeneous catalyst by response surface methodology. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 38(1), 61-75. doi:10.1007/s43153-020-00074-2.
- [8] Helmi, M., & Hemmati, A. (2021). Synthesis of magnetically solid base catalyst of NaOH/Chitosan-Fe₃O₄ for biodiesel production from waste cooking oil: Optimization, kinetics and thermodynamic studies. *Energy Conversion and Management*, 248, 114807. doi:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114807.
- [9] Noiroj, K., Intarapong, P., Luengnaruemitchai, A., & Jai-In, S. (2009). A comparative study of KOH/Al₂O₃ and KOH/NaY catalysts for biodiesel production via transesterification from palm oil. *Renewable Energy*, 34(4), 1145-1150. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.06.015.
- [10] Helmi, M., Hemmati, A., & Tahvildari, K. (2021). Biodiesel production from Amygdalus scoparia using KOH/Al₂O₃ catalyst: optimization by response surface methodology. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 12(1), 34-44.
- [11] Soudagar, M. E. M., Shelare, S., Marghade, D., Belkhode, P., Nur-E-Alam, M., Kiong, T. S., ... Fattah, I. M. R. (2024). Optimizing IC engine efficiency: A comprehensive review on biodiesel, nanofluid, and the role of artificial intelligence and machine learning. *Energy Conversion and Management*, 307, 118337. doi:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118337.
- [12] Biodiesel implementation in Indonesia: Experiences and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113911. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113911.
- [13] Biodiesel production in India: Prospects, challenges, and sustainable directions. *Biotechnology and Bioengineering*, 121(3), 894-902. doi:https://doi.org/10.1002/bit.28643.

۴. نتیجه گیری

امروزه به دلیل کاهش سوخت‌های فسیلی و نیاز به سوخت‌های تجدیدپذیر، بیودیزل یکی از گزینه‌های باارزش و کم‌آلاینده است که محل توجه محققان قرار گرفته است. بنابراین، سنتز این سوخت تجدیدپذیر از روغن‌های گیاهی هر کشور متناسب با اقلیم آن، یکی از راه‌حل‌های موجود است. در کشور ما هندوانه کوهی دارای روغن زیادی است که برای بررسی در این تحقیق استفاده شد. از کاتالیست فرومگننگز به عنوان کاتالیست جامد و هتروژن استفاده شد تا جداسازی آسان‌تری از محصول داشته باشد. از این کاتالیست به صورت پایه و بارگذاری شده با پتاس ۵ و ۱۰ مولار استفاده شد که بهترین نتیجه، مربوط به کاتالیست بارگذاری شده با پتاس ۵ مولار و به مقدار ۳ گرم با راندمان ۸۶/۵ درصد است. طیف‌های FTIR از پایه کاتالیست و هر دو کاتالیست گرفته شد که نشان‌دهنده پهن شدن پیک OH است. این تغییر در وضعیت پیک مربوط به KOH بارگذاری شده بر روی کاتالیست‌ها است. تصاویر SEM نیز نشان‌دهنده بارگذاری پتاس و افزایش مقدار پتاسیم به صورت همگن در کاتالیست‌ها است. هم‌چنین، تست EDAX نیز نشان‌دهنده بارگذاری پتاسیم و افزایش درصد وزنی آن در کاتالیست‌های بارگذاری شده است؛ بنابراین، کاتالیست فرومگننگز که با دو نسبت متفاوت ۵ و ۱۰ مولار بارگذاری شده بود، توانست بیودیزل را با راندمان حدود ۸۶/۵٪ تولید کند.

مراجع

- [1] Helmi, M., & Tahvildar, K. (2017). Investigating different methods for loading KOH on the base of clinoptilolite catalyst in caparis oil transesterification reaction. *The Application of Chemistry in Enviroment*, 8(30), 27-35, [In Persian].
- [2] Helmi, M., Hemmati, A., Aberoomand Azar, P., Tahvildari, K., & Safekordi, A. (2021). Optimization of Biodiesel Production from Waste Cooking Oil in Present of Polyoxometalate as Catalyst Via Electrolysis Method Based on Response Surface Methodology (RSM). *Iranian Chemical Engineering Journal*, 20(114), 37-48, [In Persian].
- [3] Helmi, M., & Tahvildar, K. (2016). Preparation of green biodiesel fuel from waste cooking oil by two methods of electrolysis and reflux in the presence of clinoptilolite catalyst. *Application of Chemistry in Environmental*, 6(21), 1-8, [In Persian].

- [14] Oza, S., Kodgire, P., Kachhwaha, S. S., Lam, M. K., Yusup, S., Chai, Y. H., & Rokhum, S. L. (2024). A review on sustainable and scalable biodiesel production using ultra-sonication technology. *Renewable Energy*, 226, 120399. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120399.
- [15] Srikumar, K., Tan, Y. H., Kansedo, J., Tan, I. S., Mubarak, N. M., Ibrahim, M. L., ... Khalid, M. (2024). A review on the environmental life cycle assessment of biodiesel production: Selection of catalyst and oil feedstock. *Biomass and Bioenergy*, 185, 107239. doi:https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107239.
- [16] Melo, V. M. e., Ferreira, G. F., & Fregolente, L. V. (2024). Sustainable catalysts for biodiesel production: The potential of CaO supported on sugarcane bagasse biochar. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 114042. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114042
- [17] Helmi, M., Ghadiri, M., Tahvildari, K., & Hemmati, A. (2021). Biodiesel synthesis using clinoptilolite-Fe₃O₄-based phosphomolybdic acid as a novel magnetic green catalyst from salvia mirzayanii oil via electrolysis method: Optimization study by Taguchi method. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 105988, [In Persian]. doi:https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105988