

تولید بیودیزل از روغن مورینگا الیفا با استفاده از نانوکاتالیست ناهمگن $C/CuFe_4O_2/CaO$ و ترکیب آن با دیزل جهت بهبود خصوصیات سوخت

کامبیز صفتی^۱، حسین اسماعیلی^{۲*}، بیژن هنرور^۱ و نادیا اسفندیاری^۱

۱- گروه مهندسی شیمی، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

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

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۰۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۰۲

چکیده

منابع سوخت‌های فسیلی هر روز رو به کاهش بوده و اخیراً استفاده از سوخت‌های زیستی بیش‌تر مورد توجه واقع شده است. در میان سوخت‌های زیستی، بیودیزل بیش‌تر مورد توجه است زیرا از مزایای زیست‌محیطی بسیاری برخوردار است. از سوی دیگر، در سال‌های اخیر تکنولوژی نانوکاتالیست نقش بارزی را در حل ایرادات فرآیند استریفیکاسیون ایفا نموده است. در این بررسی، روغن از دانه مورینگا الیفا استخراج گردید و بیودیزل در حضور نانوکاتالیست ناهمگن $CaO/CuFe_4O_2/C$ طی فرآیند استریفیکاسیون تهیه شد. به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نانوکاتالیست ناهمگن $C/CuFe_4O_2/CaO$ از آنالیزهای مختلفی همچون SEM ، $FTIR$ ، XRD ، EDX ، TGA و TEM استفاده شد. فاکتورهای اثرگذار بر بازدهی بیودیزل بررسی گردید و با سوخت تجاری موجود در ایران ترکیب و سوخت‌هایی با ترکیب B_{00} ، B_{25} ، B_{50} ، B_{75} و B_{100} بیودیزل تولید شد و خواص فیزیکی آن‌ها مانند نقطه ریزش، نقطه ابری شدن، نقطه اشتعال، ویسکوزیته و دانسیته براساس استانداردهای $ASTM D 7467$ و $ASTM D 6751$ بررسی گردید. مقدار بهینه فاکتورهای مؤثر بر بازدهی تولید بیودیزل شامل نسبت مولی متانول/روغن، زمان واکنش، دما و مقدار کاتالیست به ترتیب $1:12$ ، $4 h$ ، $60^\circ C$ و 3% به دست آمد. به علاوه، بیش‌ترین بازدهی بیودیزل تولید شده از مورینگا الیفا در حضور نانوکاتالیست ناهمگن $CaO/CuFe_4O_2/C$ در شرایط مطلوب $98/69\%$ به دست آمد. مقایسه نتایج خواص فیزیکی بیودیزل با دیزل نشان داد که سایر خصوصیات در محدوده استاندارد قرار دارد و نقطه ریزش و ابری شدن برای هوای سرد مناسب است.

کلمات کلیدی: بیودیزل، مورینگا الیفا، استریفیکاسیون، نانوکاتالیست $C/CuFe_4O_2/CaO$ ، سوخت

*مسئول مکاتبات

آدرس الکترونیکی: esmaeili.hossein@gmail.com
شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2019.3728.2697)

مقدمه

ناهمگن متمرکز شده است. کاتالیزورهای ناهمگن در فرآیند استریفیکاسیون می‌توانند به راحتی از بین بروند و مجدداً بازسازی شوند که در این صورت امکان استفاده مجدد در فرآیند استریفیکاسیون را فراهم می‌کنند و به همین دلیل فرآیند سازگار با محیط زیست شناخته شده‌اند. از جمله کاتالیزورهای ناهمگن پایه برای تولید بیودیزل می‌توان به اکسیدها و یون‌های فلزی قلیایی خاکی اشاره کرد [۱۲]. در سال‌های اخیر، فناوری نانو نقش مهمی را در فرآیند استریفیکاسیون در تولید بیودیزل ایفا نموده و نانوکاتالیزور با دارا بودن منافذ، انتخابی بودن و افزایش فعالیت کاتالیزوری برخی از مشکلات را در فرآیند استریفیکاسیون در تولید بیودیزل حل کرده است [۱۳]. در مطالعه حاضر، از نانوکاتالیزور ناهمگن $C/CuFe_4O_2/CaO$ در تولید بیودیزل استخراج شده از مورینگالیفرا استفاده شده است. همچنین، فاکتورهای اثرگذار بر بازدهی بیودیزل استخراج شده از مورینگالیفرا با استفاده از نانوکاتالیزور ناهمگن $C/CuFe_4O_2/CaO$ مورد بررسی قرار گرفت. به علاوه، خواص فیزیکی بیودیزل خالص و بیودیزل مخلوط با دیزل در نسبت‌های مختلف مطالعه شده است.

روش‌ها

مواد

در این بررسی، بیودیزل از روغن دانه‌های مورینگالیفرا استان بوشهر واقع در جنوب غربی ایران تهیه شد. الکل مورد استفاده در این بررسی متانول با فرمول شیمیایی $CH_3(OH)$ و جرم مولکولی $32/04 \text{ g/mol}$ با خلوص $99/9\%$ از شرکت مرک آلمان است. همچنین، از کلرید آهن (III) با فرمول شیمیایی $FeCl_3$ و سولفات مس (II) با فرمول $CuSO_4$ خریداری شده از شرکت سیگما آلد ریچ به عنوان پیش‌ماده در سنتز $CuFe_2O_4$ استفاده شد. از پوسته تخم‌مرغ و برگ درخت کنار به ترتیب به عنوان پیش‌ماده‌های اکسید کلسیم و ماده کربنی در تهیه کاتالیزور $C/CuFe_4O_2/CaO$ استفاده شد.

نیاز به انرژی به علت صنعتی شدن و رشد شهری در حال افزایش است. منابع اصلی انرژی شامل نفت، زغال‌سنگ و گاز طبیعی هستند که به دلیل ماهیت تجدیدناپذیری، این منابع انرژی روز به روز در حال کاهش است [۱]. از این رو، یافتن یک سوخت ارزان قیمت و سازگار با محیط زیست، ضروری به شمار می‌رود. طی بیست و پنج سال گذشته استفاده از سوخت‌های جایگزین به دلیل کاهش منابع سوخت فسیلی، اهمیت به سلامت انسان و تغییرات آب و هوایی بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۲]. بنابراین، بیودیزل و مخلوط سوخت دیزل آن در سراسر جهان به عنوان یک سوخت جایگزین انتخاب شده است زیرا بیودیزل از مزایایی نظیر بهبود ویسکوزیته، نقطه اشتعال بالاتر، تجزیه پذیری بهتر در محیط زیست، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش سمیت بیش از دیزل معمولی برخوردار است. در مقایسه با سوخت‌های دیزلی سنتی، استفاده از بیودیزل می‌تواند 70% هیدروکربن‌ها و 50% ذرات را در انتشار گازهای خروجی کاهش دهد و به دلیل پایداری نسبی آن 78% کربن منتشر می‌شود [۳۶]. این خواص موجب شده است که بیودیزل در طبقه سوخت‌های زیستی قرار داده شود. برای تولید بیودیزل از روغن و چربی از فرآیند استریفیکاسیون استفاده می‌شود. در استریفیکاسیون یک تری گلیسیرید (چربی/روغن) با الکل (متانول / اتانول) در حضور کاتالیزور واکنش می‌دهد تا مخلوطی از استر اسید چرب و گلیسرول را تشکیل دهد [۳-۵]. در سال‌های اخیر برای تولید بیودیزل از دانه روغن *Ailanthus altissima* (درخت هوائن) [۶]، سویا [۷]، ضایعات روغن پخت و پز [۸ و ۹]، روغن *Sterculia foetida* [۱۰]، شاهدانه [۱۱] و غیره استفاده شده است.

در طول فرآیند استریفیکاسیون به منظور جلوگیری از تشکیل پدیده صابونی شدن و آلودگی محیط زیست، مطالعه محققان بر روی کاتالیزورهای

روش‌ها

استخراج روغن از مورینگا الیفرا

به منظور استخراج روغن، دانه‌های مورینگا الیفرا از غلاف جدا شده و جمع‌آوری گردید. سپس دانه‌های روغنی جهت زدودن گرد و خاک و ناخالصی با آب مقطر شستشو داده شد. آن‌گاه برای رطوبت‌گیری از بافت دانه‌های مورینگا الیفرا از دستگاه Foy drayer به مدت ۴ h با دمای °C ۸۵ استفاده گردید. دانه‌های خشک شده با استفاده از آسیاب خرد شد و جذب و جداسازی روغن آن‌ها توسط حلال هگزان و در یک دستگاه ساکسوله که شامل یک کندانسور رفلاکس و فلاسک بود، انجام گرفت. استخراج روغن از دانه‌های مورینگا الیفرا، در یک حمام آب با استفاده از حرارت و سیستم رفلاکس به مدت حدود ۵ الی ۶ h با ۶۰۰ cc هگزان اجرا شد. در مرحله بعد، حلال هگزان از محلول هگزان و روغن حاصله توسط دستگاه روتاری، حلال هگزان از روغن جدا گردید [۱۵ و ۱۴]. پس از استخراج روغن از دانه‌های مورینگا الیفرا، ترکیبات اسید چرب موجود در آن توسط دستگاه گاز کروماتوگرافی

(Varian cp-3800 GC-) مجهز به آشکارگر FID و ستون) مورد آنالیز قرار گرفت. ترکیبات به دست آمده از آنالیز در جدول ۱ گزارش شده است.

آماده‌سازی نانوکاتالیست ناهمگن $C/CuFe_2O_4/CaO$

جهت آماده‌سازی زغال کربنی، ابتدا برگ درخت کنار از باغ‌های محلی جمع‌آوری شد و چندین مرتبه با آب مقطر شستشو داده تا گرد و خاک و سایر ناخالصی‌های آن حذف گردد. سپس به مدت ۲۴ h در دمای °C ۹۰ درون آن قرار گرفت تا به‌طور کامل خشک شود. پس از خشک شدن، برگ درخت کنار به مدت ۲ h و در دمای °C ۴۰۰ درون کوره قرار قرار داده شد تا فرآیند کربنی شدن انجام شود. پس از انجام فرآیند کربنی شدن، برگ‌های کربنی شده با استفاده از آسیاب پودر شده و با استفاده از الک شماره ۲۵ (ASTM E11) دانه‌بندی گردیده و درون بطری‌های درب‌دار نگهداری شدند. به منظور تولید CaO ابتدا پوسته تخم‌مرغ از رستوران‌های محلی جمع‌آوری گردید و چندین مرتبه با استفاده از آب شستشو داده شد تا ناخالصی‌های آن زدوده شوند.

جدول ۱ ترکیبات روغن حاصل از مورینگا الیفرا با استفاده از دستگاه گاز کروماتوگرافی (GC)

مقدار (%)	نام اجزا	رابطه مولکولی
۱۳/۸	پالمیتیک اسید	C16:0
۱/۲۳	پالمیتولئیک اسید	C16:1
۰/۱۱	مارگاریک اسید	C17:0
-	اسید cis-heptadecenoic	C17:1
۴	اسید استریک	C18:0
۷۲	اسید اولئیک	C18:1-cis
۶/۲۱	اسید لینولئیک	C18:2-cis-cis
۱/۷۴	اسید لینولئیک-C	C18:3-gamma
۲	اسید آراچیدونیک	C20:0
۲/۸	اسید بنیک	C22:0
۰/۲	اسید اروشیک	C22:1
۰/۱	لیگنوسریک اسید	C24:0
۰/۴۴	-	دیگر

تنظیم گردد و به مدت ۱ h هم‌زده شد. پس از زمان مذکور، سوسپانسیون در دمای $100-98^{\circ}\text{C}$ و به مدت ۲ h حرارت داده می‌شود. قابل ذکر است که این مرحله تحت کندانسور انجام می‌گردد. پس از واکنش و سرد شدن، نانوکاتالیست مغناطیسی با استفاده از یک میدان مغناطیسی از محلول آبی جدا شده و چندین مرتبه با استفاده از آب مقطر شستشو داده شد تا خنثی شود ($\text{pH} = 7-6$). پس از خنثی‌سازی به مدت ۲۴ h و در دمای 105°C درون آن قرار داده شد تا به‌طور کامل خشک شود [۱۸]. به منظور کپسوله‌سازی نانوکاتالیست حاصله با کمی تغییرات بدین صورت عمل می‌شود، کلسیم کلرید (۷ mmol) درون ۲۵ mL آب مقطر حل می‌شود. پس از حل شدن کلسیم کلرید، ۱ mmol از نانوکاتالیست درون محلول ذکر شده با استفاده از دستگاه تراسونیک پخش می‌گردد. پس از پخش شدن، ۱۵ mmol سدیم هیدروکسید در ۱۰ mL آب مقطر حل شده و به‌صورت قطره قطره و در دمای محیط به مخلوط فوق اضافه می‌شود و به مدت ۳۰ min مخلوط می‌شود. پس از اتمام زمان ذکر شده، سوسپانسیون به مدت ۱۸ h و در دمای 65°C قرار گرفته و پس از آن فیلتر و با استفاده از محلول کلسیم هیدروکسید شسته شده و به مدت ۱۲ h و در دمای 80°C خشک می‌شود. پس از خشک شدن، نانوکاتالیست حاصل شده به مدت ۳ h و در دمای 700°C درون کوره قرار می‌گیرد تا فرآیند کلسینه شدن انجام شود [۱۹].

طراحی روش تجربی

به منظور بهینه‌سازی فاکتورهای مختلف در فرآیند تولید بیودیزل از روغن دانه مورینگا الیفا با استفاده از نانوکاتالیست $\text{C}/\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{CaO}$ ، استفاده شد. برای طراحی آزمایشات از روش تاگوچی با استفاده از آرایه افقی ۱۶ L با استفاده از نرم‌افزار Mini Tab مورد استفاده قرار گرفت. در جدول ۲ نتایج طراحی تجربی را برای تعیین شرایط مناسب تولید بیودیزل نشان داده شده است.

پوسته‌های تخم‌مرغ شستشو داده شده به مدت ۲۴ h و در دمای 105°C به مدت ۲۴ h در داخل آن قرار داده شد تا به‌طور کامل خشک شوند. پس از خشک شدن، پوسته‌های تخم‌مرغ به مدت ۴ h و در دمای 800°C در داخل کوره قرار داده شدند تا فرآیند کلسینه شدن انجام شود [۱۶]. پس از کلسینه شدن، پوسته‌های تخم‌مرغ پودر گردید و درون بسته‌های پلاستیکی دور از رطوبت و در دمای محیط نگهداری شدند. پس از تولید CaO ، ذرات CuFe_2O_4 به‌روش رسوبی بر روی ذرات CaO بارگذاری شدند. بدین منظور، ابتدا یک محلول حاوی یون‌های فلزی مس (II) و آهن (III) با نسبت مولی ۲:۱ (۰/۱ به ۰/۲ مولار) تهیه شد. سپس یک گرم CaO به آن اضافه شد و به مدت ۳۰ min هم‌زده شد تا یون‌های فلزی آهن و مس بر سطح و درون لایه‌های ذرات CaO قرار گیرند. پس از اتمام زمان مذکور، محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۵ مولار به‌صورت قطره قطره به مخلوط بالا اضافه شد و pH مخلوط در مقدار ۱۰ تنظیم شد و به مدت ۳۰ min هم‌زده شد و سپس هم‌زدن متوقف شد. مخلوط تهیه شده به مدت ۳ h و در دمای 95°C تا 100°C قرار گرفت تا فرآیند پیرسازی انجام شود [۱۷]. پس از اتمام زمان فرآیند پیرسازی، کاتالیست $\text{CaO}/\text{CuFe}_2\text{O}_4$ تشکیل شده جدا شد و به مدت ۲۴ h در دمای 105°C قرار داده شد تا به‌طور کامل خشک گردد. پس از خشک شدن، کاتالیست پودر شد و به مدت ۳ h و در دمای 500°C قرار داده شد تا فرآیند کلسینه شدن انجام شود. به منظور آماده‌سازی نانوکاتالیست $\text{C}/\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{CaO}$ ابتدا ۲ گرم از زغال تولید شده به ۲۰۰ mL محلول که شامل مس کلراید (۰/۱ مولار) و آهن کلراید (۰/۲ مولار) اضافه شده و در دمای محیط به مدت ۲۰ min با استفاده از هم‌زن مغناطیسی هم‌زده شد. پس از اتمام زمان مذکور، ۵۰ mL محلول سدیم هیدروکسید با غلظت ۵ M به‌صورت قطره قطره اضافه شده تا pH مخلوط ذکر شده در ۱۰

جدول ۲ طراحی آزمایش صورت گرفته با استفاده از نرم افزار Mini Tab و روش تاگوچی ۱۶ L شامل ۴ فاکتور و ۴ سطح (C/CuFe₂O₄/CaO)

مراحل آزمایش	متانول / نفت	دما (°C)	اجزا کاتالیست (%)	زمان تماس (h)
۱	۱:۶	۴۰	۴	۱
۲	۱:۶	۵۰	۳	۲
۳	۱:۶	۶۰	۲	۳
۴	۱:۶	۷۰	۱	۴
۵	۱:۹	۴۰	۳	۳
۶	۱:۹	۵۰	۴	۴
۷	۱:۹	۶۰	۱	۱
۸	۱:۹	۷۰	۲	۲
۹	۱:۱۲	۴۰	۲	۴
۱۰	۱:۱۲	۵۰	۱	۳
۱۱	۱:۱۲	۶۰	۴	۲
۱۲	۱:۱۲	۷۰	۳	۱
۱۳	۱:۱۵	۴۰	۱	۲
۱۴	۱:۱۵	۵۰	۲	۱
۱۵	۱:۱۵	۶۰	۳	۴
۱۶	۱:۱۵	۷۰	۴	۳

فرآیند استریفیکاسیون

در این مطالعه، فرآیند استریفیکاسیون برای تهیه بیودیزل از روغن دانه‌های مورینگا الیفرا در حضور نانوکاتالیست C/CuFe₂O₄/CaO بکار گرفته شد. جهت جلوگیری از تبخیر متانول و کنترل بهتر درجه حرارت از یک مبرد استفاده شد. پس از تهیه سیستم رفلاکس، ۳۰ g روغن استخراج شده از دانه‌های مورینگا الیفرا به یک فلاسک سه دهانه ۲۵۰ mL منتقل شد و برای رسیدن به دمای مشخص شده بر روی گرمکن گذاشته شد. مخلوط متانول و کاتالیزور را سپس در یک بشر ریخته و با یک همزن مغناطیسی مخلوط شد. پس از مخلوط کردن محلول متانول و کاتالیزور، مخلوط به روغن اضافه شد و درجه حرارت آن هر ۱۰ min توسط یک دماسنج بررسی شد. پس از اتمام زمان واکنش، مخلوط حاصل به یک قیف جداسازی ریخته شد و پس از ۲۴ h سه فاز تشکیل گردید. پایین‌ترین

و بالاترین بخش قیف، به ترتیب، کاتالیزور و فاز بیودیزل است و گلیسرول بین آن‌ها قرار گرفت. سپس به منظور محاسبه بازدهی بیودیزل از رابطه ۱ استفاده شد:

(۱) (شده تولید بیودیزل وزن)/(نفت وزن)=بیودیزل تولید بازده

مخلوط بیودیزل/دیزل

بیودیزل تولید شده از روغن مورینگا الیفرا در نسبت‌های مختلف با دیزل ترکیب شد و سوخت‌هایی نظیر B ۰۰، B ۲۵، B ۵۰، B ۷۵ و B ۱۰۰ به دست آمد. سپس، ویژگی‌های فیزیکی سوخت نظیر چگالی، ویسکوزیته، نقطه ریزش، نقطه اشتعال، نقطه ابری شدن با توجه به استانداردهای بین‌المللی ASTM D ۶۷۵۱ و ASTM D ۱۴۲۱۴ تعیین شد. این مخلوط‌ها به صورت BX نشان داده می‌شوند که X نشان‌دهنده درصد بیودیزل در مخلوط سوخت بیودیزل/دیزل است.

به نمونه کامپوزیت $C/CaO/CuFe_2O_4$ سنتز شده نشان داده شده است. با توجه به شکل (ج) مشاهده می‌شود که در کامپوزیت تهیه شده لوله‌هایی به شکل استوانه با اندازه‌های مختلف تشکیل شده‌اند که نشان‌دهنده داشتن ساختاری بلوری-فلزی منظم و مشخص است. اندازه ذرات کامپوزیت کمتر از ۵۰ نانومتر تخمین زده می‌شود که می‌توان این کامپوزیت را نانو کامپوزیت نامید. نحوه قرارگیری ذرات کاتالیست بر روی بافت زمینه به صورت نامنظم بوده و از قاعده مشخصی پیروی نکرده است. همچنین، توزیع ذرات به صورت پراکندگی‌های غیر یکنواخت بوده که این پراکندگی بستگی به غلظت ذرات، مدت زمان تماس، سرعت اختلاط و بافت زمینه جهت تشکیل نانو کامپوزیت دارد [۲۱].

آنالیز FTIR

در شکل ۲ گروه‌های عاملی برای نانو کاتالیست‌های C/CaO ، $CuFe_2O_4$ و $C/CaO/CuFe_2O_4$ به صورت مقایسه‌ای نشان داده شده است. در طیف FTIR نانو کاتالیست C/CaO ، نوار جذبی موجود در ناحیه ۵۱۵ تا 711 cm^{-1} مربوط به گروه عاملی $Ca-O$ ، نوار جذبی موجود در نواحی ۸۷۵، ۱۰۶۰، ۱۴۴۵ و 1513 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات پیوند $C-O$ و همچنین، ارتعاشات پیوند $C=C$ در ترکیبات آروماتیکی (واحد‌های کربناته و بقایای ترکیبات آلی موجود در گیاه) است.

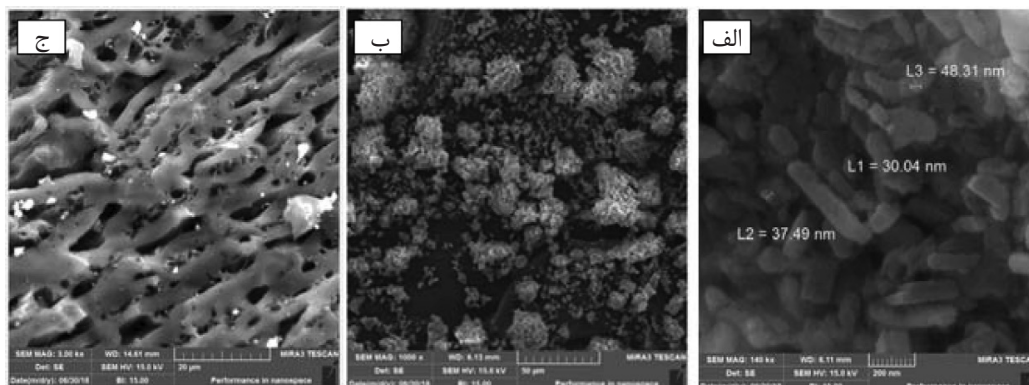
به‌طور مثال، B00 نشان‌دهنده ۱۰۰٪ دیزل و ۰٪ بیودیزل است. برای تعیین چگالی سوخت از دستگاه DA600، KEM ساخت ژاپن، جهت تعیین ویسکوزیته از دستگاه Petrotest، مدل DP و ساخت آلمان، جهت تعیین نقطه ریزش و ابری شدن از دستگاه HS/1400، SDM ساخت ایتالیا و برای تعیین نقطه اشتعال از دستگاه Abl8a، TANAKA ساخت ژاپن استفاده شد. همچنین، چگالی و ویسکوزیته سوخت‌ها به ترتیب در دماهای ۱۵ و $40\text{ }^\circ\text{C}$ اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، برای اندازه‌گیری نقطه اشتعال از روش بسته استفاده شد.

نتایج و بحث

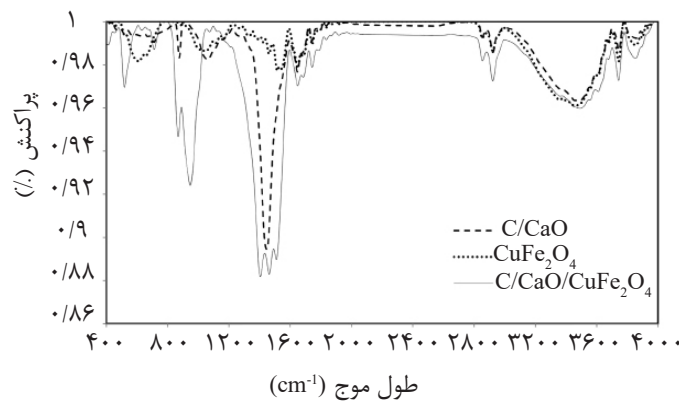
خصوصیات نانو کاتالیست ناهمگن CaO_4O_2CuFe/C

آنالیز SEM

با توجه به شکل ۱ (الف) مشاهده می‌شود که کاتالیست سنتز شده دارای خلل و فرج‌های فراوان بوده و نحوه چینش این حفرات به صورت منظم است. اندازه این حفرات بسیار مشابه هم بوده که حاکی از توزیع یکنواخت نیروهای تشکیل‌دهنده بین مولکولی در حین سنتز کاتالیست است. همگن بودن ذرات تشکیل‌دهنده کاتالیست نیز از ویژگی بارز دیگر کاتالیست سنتز شده است. شکل ذرات و حتی نوع حفرات بین ذرات مایل به کروی شکل است. همچنین، حجم حفرات در تمام کاتالیست یکنواخت است [۲۰ و ۲۱]. در شکل ۱ (ب) تصاویر SEM مربوط



شکل ۱ آنالیزهای SEM از نمونه‌های الف) C/CaO ، ب) کاتالیست $C/CaO/CuFe_2O_4$ و ج) کامپوزیت تهیه شده



شکل ۲ آنالیز FTIR مقایسه‌ای بافت زمینه C/CaO، کاتالیست CuFe_2O_4 و کامپوزیت $\text{C/CaO/CuFe}_2\text{O}_4$

CuFe_2O_4 است. در نتیجه با توجه به مقایسه اعداد طیفی دو نمونه Ca-O و CuFe_2O_4 مشاهده می‌شود که در محدوده کمتر از 1000 cm^{-1} برای هر دو نمونه از مشابهت بالایی برخوردار است. این امر حاکی از حفظ بافت زمینه C/CaO در نمونه کامپوزیت است. بنابراین، با در نظر گرفتن این مشابهت‌ها برای بافت زمینه و ناحیه گروه عاملی برای کاتالیست، کاتالیست با موفقیت سنتز شده است.

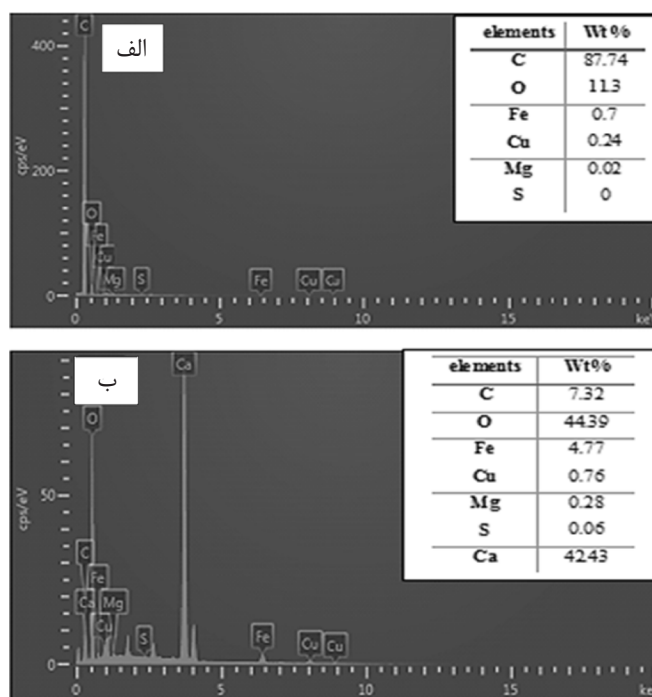
آنالیز EDX

در شکل ۳ آنالیز عنصری EDX مربوط به نمونه‌های CuFe_2O_4 و $\text{CaO/CuFe}_2\text{O}_4/\text{C}$ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که قبل از تهیه کامپوزیت در شکل (الف) عناصر کربن (۷/۳۲٪)، اکسیژن (۱۱/۳٪)، آهن (۰/۱۷٪)، مس (۰/۲۴٪)، منگنز (۰/۰۲٪) و گوگرد به مقدار ناچیزی وجود دارد. حضور عناصر آهن و مس ناشی از تشکیل نانوذرات CuFe_2O_4 در ساختار نمونه است که پس از تهیه کامپوزیت $\text{CaO/CuFe}_2\text{O}_4/\text{C}$ در شکل (ب) عنصر Ca به میزان ۴۲/۴۳٪ بود که حضور CaO را در ساختار کامپوزیت تأیید می‌کند. همچنین، حضور عناصر S و C نیز به مقدار مشخصی در نمونه دیده می‌شود که ناشی از حضور ترکیبات آلی است.

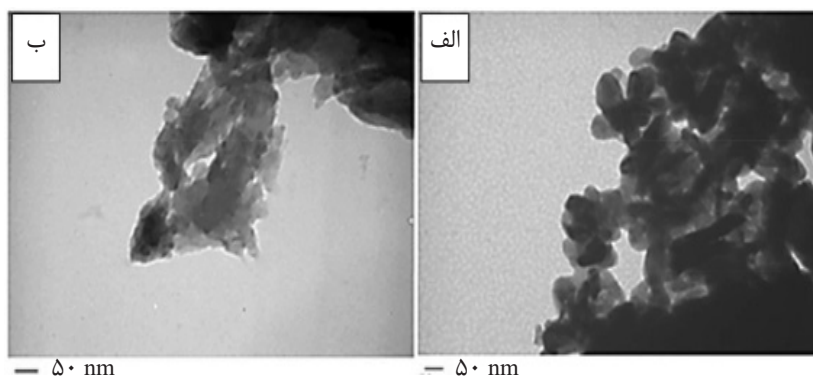
آنالیز TEM

تصویربرداری میکروسکوپی عبوری TEM برای نمونه بافت زمینه C/CaO و کاتالیست $\text{CaO/CuFe}_2\text{O}_4/\text{C}$ در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

نوار جذبی موجود در نواحی ۱۶۴۶، ۱۷۴۲، ۲۸۵۳ و 2922 cm^{-1} نیز مربوط به ارتعاشات پیوند گروه‌های عاملی آمینی R-NH_2 و آمیدی $\text{R-C=O-NH-R}'$ موجود در بقایای گیاه مورد استفاده است و نوار جذبی پهن موجود در ناحیه 3479 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات پیوند گروه‌های هیدروکسیل به شکل رطوبت و یا هیدروکسیل‌های جذب شده در ساختار Ca-O است [۲۱ و ۲۲]. طیف FTIR کاتالیست CuFe_2O_4 نشان می‌دهد که نوارهای جذبی موجود در نواحی 426 cm^{-1} تا 666 cm^{-1} ناشی از پیوندهای Cu-Fe-Cu و یا Cu-Fe ، Fe-Fe موجود در نواحی 612 cm^{-1} تا 1026 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات فلز (چهار وجهی) - اکسیژن (M-O) است که اتم M می‌تواند مس و یا آهن باشد [۲۳]. همچنین، این محدوده مربوط به پیک جذبی برای ساختار اسپینل فریت می‌باشد. نوار جذبی پهن موجود در محدوده 3359 cm^{-1} تا 3743 cm^{-1} مربوط به گروه هیدروکسیل OH به شکل رطوبت جذب شده در ذرات کاتالیست سنتز شده است [۲۴]. همچنین، طیف FTIR کامپوزیت کاتالیست $\text{C/CaO/CuFe}_2\text{O}_4$ نوارهای جذبی موجود در نواحی 517 cm^{-1} تا 631 ، 1073 ، 1462 ، 1509 و 1841 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات پیوندهای ذکر شده موجود در نمونه C/CaO است که به خوبی ترکیب زمینه این کامپوزیت با نمونه C/CaO مشابهت دارد و حاکی از حفظ ساختار است. نوارهای جذبی موجود در نواحی 612 cm^{-1} تا 1026 cm^{-1} مشابه با کاتالیست



شکل ۳ آنالیز EDX الف) کاتالیست CuFe_2O_4 و ب) نانوکاتالیست $\text{CaO}/\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{C}$



شکل ۴ آنالیز TEM از نمونه‌های الف) CaO و ب) کاتالیست $\text{CaO}/\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{C}$

بسیار ریز بر روی بستر توده‌ای چند وجهی شکل CaO پخش و پراکنده شده و کامپوزیت را تشکیل داده‌اند. پراکندگی ذرات کاتالیست $\text{CaO}/\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{C}$ به صورت ناهمگن و نامتقارن بوده که سبب شده است که برخی توده‌ها به علت تجمع بیشتر ذرات کاتالیست $\text{CaO}/\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{C}$ به صورت تیره رنگ‌تر دیده شوند که دلیل این امر متفاوت بودن اندازه ذرات کاتالیست تشکیل شده است. همچنین شکل ذرات کاتالیست چند وجهی نامنظم بوده و با نشاندن بر روی بستر CaO نظم ساختار چندوجهی آن را حفظ کرده است.

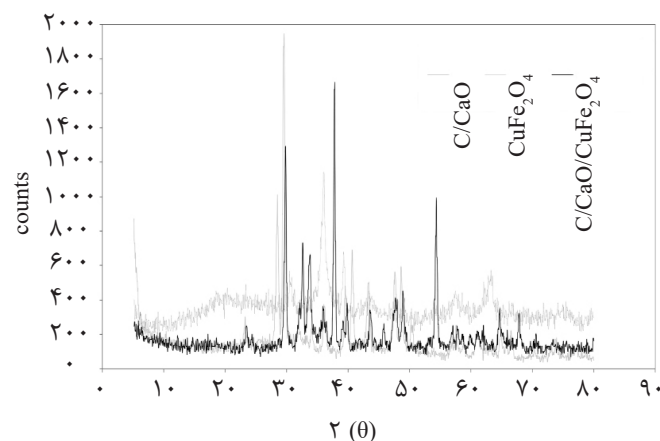
در شکل ۴ (الف) ذرات تشکیل‌دهنده CaO/C به صورت ذرات چند وجهی نامنظم و توده‌ای هستند. اندازه ذرات چند وجهی تشکیل‌دهنده میله متغیر بوده و در محدوده کمتر از $1 \mu\text{m}$ تخمین زده می‌شوند. به دلیل خصوصیات تشکیل توده‌ای ذرات CaO/C ، آن‌ها می‌توانند با هم تجمع پیدا کنند و توده‌های بزرگ تری را به وجود آورند و وجود تخلخل و فواصل بین این توده‌ها می‌تواند سایت‌هایی را برای قرارگیری مواد به وجود آورد. ذرات تشکیل‌دهنده کاتالیست $\text{CaO}/\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{C}$ در شکل ۴ (ب) به صورت ذرات

می‌کند [۲۷]. در الگوی نمونه کامپوزیت $C/CuFe_2O_4$ ، CaO قله‌های پیک در زوایای $2/41^\circ$ ، $3/37^\circ$ ، $2/30^\circ$ ، $9/48^\circ$ ، $2/64^\circ$ ، $9/20^\circ$ ، $2/30^\circ$ ، $2/31^\circ$ ، $9/34^\circ$ ، $1/36^\circ$ ، $5/37^\circ$ ، $3/42^\circ$ ، $9/43^\circ$ ، $4/55^\circ$ ، $9/55^\circ$ ، $3/62^\circ$ ، $0/59^\circ$ ، $3/58^\circ$ ، $5/74^\circ$ ، $6/72^\circ$ و $4/76^\circ$ که به ترتیب به صفحات کریستالی (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۱۱)، (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۱۰۱)، (۱۱۲)، (۲۰۰)، (۱۰۳)، (۲۱۱)، (۲۰۲)، (۰۰۴)، (۲۲۰)، (۳۱۲)، (۱۰۵)، (۳۰۳)، (۳۲۱)، (۳۲۴)، (۴۰۰)، (۴۲۰)، (۴۱۳) و (۴۲۲) مربوط می‌شود، مطابقت می‌کند. برای نمونه کاتالیست هم‌خوانی کامل الگوی پراش اشعه X مطابق با کارتهای استاندارد (JCPDS.No.82-1690 و JCPDS.No.34-0425) حضور دو فاز CaO و $CuFe_2O_4$ را جداگانه و به ترتیب برای این نمونه تأیید می‌نماید [۲۶] و در مقایسه الگوی پراش کامپوزیت تهیه شده $C/CuFe_2O_4/CaO$ نسبت به مواد اولیه مورد استفاده C/CaO و $CuFe_2O_4$ مشاهده می‌شود که الگوی پراش کامپوزیت تهیه شده در برخی از زوایای پراش مانند زوایای $2/30^\circ$ ، $2/31^\circ$ ، $9/34^\circ$ ، $1/36^\circ$ ، $5/37^\circ$ ، $9/20^\circ$ ، $2/30^\circ$ ، $2/31^\circ$ ، $9/34^\circ$ ، $4/55^\circ$ ، $9/55^\circ$ ، $3/62^\circ$ ، $0/59^\circ$ ، $3/58^\circ$ ، $4/63^\circ$ ، $6/72^\circ$ و $4/76^\circ$ مشابه الگوی طیفی ماده زمینه C/CaO بوده و در برخی زوایا مانند، $2/30^\circ$ ، $2/31^\circ$ ، $9/34^\circ$ ، $1/36^\circ$ ، $5/37^\circ$ ، $9/20^\circ$ ، $2/30^\circ$ ، $2/31^\circ$ ، $9/34^\circ$ ، $4/55^\circ$ ، $9/55^\circ$ ، $3/62^\circ$ ، $0/59^\circ$ ، $3/58^\circ$ ، $4/63^\circ$ ، $6/72^\circ$ و $4/76^\circ$ مشابه الگوی طیفی کاتالیست $CuFe_2O_4$ است که این مطابقت الگوی طیفی حاکی از وجود هر دو ماده در ساختار کاتالیست تهیه شده $C/CuFe_2O_4/CaO$ با حفظ ساختار است.

تخمین زده می‌شود که اندازه ذرات کاتالیست کمتر از اندازه ذرات CaO و در محدوده کمتر از ۵۰ nm باشد [۲۶].

آنالیز XRD

شکل ۵ الگوی پراش XRD نمونه‌های C/CaO ، $CuFe_2O_4$ و $C/CuFe_2O_4/CaO$ را نشان می‌دهد. برجسته‌ترین قله‌های پیک برای C/CaO در زوایای پراش $2/41^\circ$ ، $3/37^\circ$ ، $2/30^\circ$ ، $9/48^\circ$ و $2/64^\circ$ که به ترتیب به صفحات کریستالی (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۱۱)، (۲۲۰) و (۳۱۱) مربوط می‌شود، مطابقت می‌کند. نمونه CaO با ساختار مکعبی شکل دارای هم‌خوانی کامل با الگوی پراش اشعه X مطابق با کارت استاندارد کلسیم اکسید (JCPDS.No.82-1691) و (JCPDS.No.82-1690) بوده، بنابراین حضور کلسیم اکسید تأیید می‌شود [۲۶]. در الگوی نمونه کاتالیست $CuFe_2O_4$ ، قله‌های پیک در زوایای $43/9^\circ$ ، $20/9^\circ$ ، $30/3^\circ$ ، $2/31^\circ$ ، $9/34^\circ$ ، $1/36^\circ$ ، $5/37^\circ$ ، $2/42^\circ$ ، $43/9^\circ$ ، $55/4^\circ$ ، $55/9^\circ$ ، $3/58^\circ$ ، $0/59^\circ$ ، $3/62^\circ$ ، $4/63^\circ$ ، $6/72^\circ$ ، $5/74^\circ$ و $4/76^\circ$ که به ترتیب به صفحات کریستالی (۱۰۱)، (۱۱۲)، (۲۰۰)، (۱۰۳)، (۲۱۱)، (۲۰۲)، (۰۰۴)، (۲۲۰)، (۳۱۲)، (۱۰۵)، (۳۰۳)، (۳۲۱)، (۳۲۴)، (۴۰۰)، (۴۲۰)، (۴۱۳) و (۴۲۲) مربوط می‌شوند، مطابقت می‌کند. همچنین، برای نمونه کاتالیست هم‌خوانی کامل الگوی پراش اشعه X مطابق با کارت استاندارد (JCPDS.No.34-0425) حضور فاز $CuFe_2O_4$ را تأیید

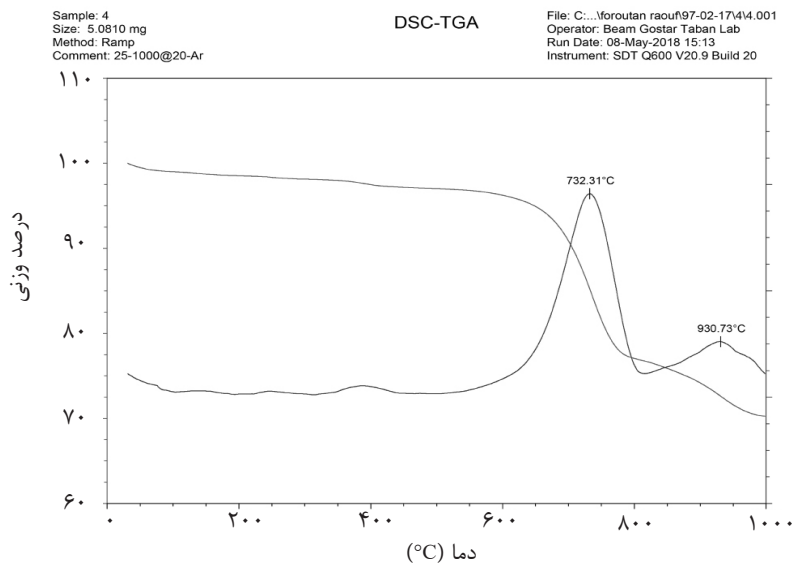
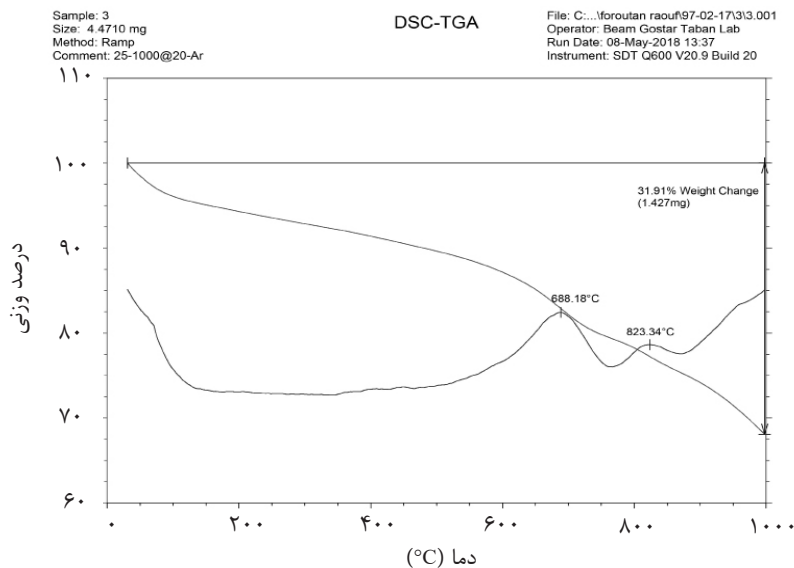


شکل ۵ آنالیز XRD مقایسه C/CaO ، کاتالیست $CuFe_2O_4$ و کامپوزیت $C/CuFe_2O_4/CaO$

آنالیز TGA

توجه ۲۲٪ کاهش وزن مشاهده شده است. این کاهش وزن به خاطر حذف ترکیبات آلی آمینی و آمیدی و اندکی هم به خاطر تخریب ساختار کربناته (کربنات کلسیم) و همچنین بافت آلی باقی مانده در نمونه گیاه و خارج شدن دی اکسید کربن موجود در کربنات کلسیم و تبدیل آن به CaO اتفاق می افتد. در محدوده دمایی بالاتر از 800°C مقدار ۷٪ کاهش وزن مشاهده شده است که این کاهش وزن به خاطر خارج شدن کامل دی اکسید کربن باقی مانده در CaCO_3 و تولید خالص ترین حالت ممکن CaO است. در مجموع مقدار ۴۲٪ کاهش وزن برای نمونه مشاهده شد.

با توجه به شکل ۶، آنالیز TGA (الف) نمونه CaO و (ب) نمونه CuFe_2O_4 مشاهده می شود که در دماهای کمتر از 650°C ، نمونه C/CaO حدود ۱۳٪ وزن خود را از دست داده است. این میزان کاهش وزن به دلیل حذف آب است که بر روی سطح C/CaO جذب شده و همچنین خروج گازهایی مانند SO_x و NO_x های موجود در بافت آلی باقی مانده در نمونه است. البته آب های جذب شده بر روی سطح در دمای کمتر از 200°C حذف شده و در دماهای بیش تر آب به دام افتاده در درون ساختار کاتالیست حذف می شود. در محدوده دمایی بین 650°C تا 790°C مقدار قابل



شکل ۶ آنالیز TGA (الف) نمونه $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{C}$ و (ب) نمونه $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{CaO}$

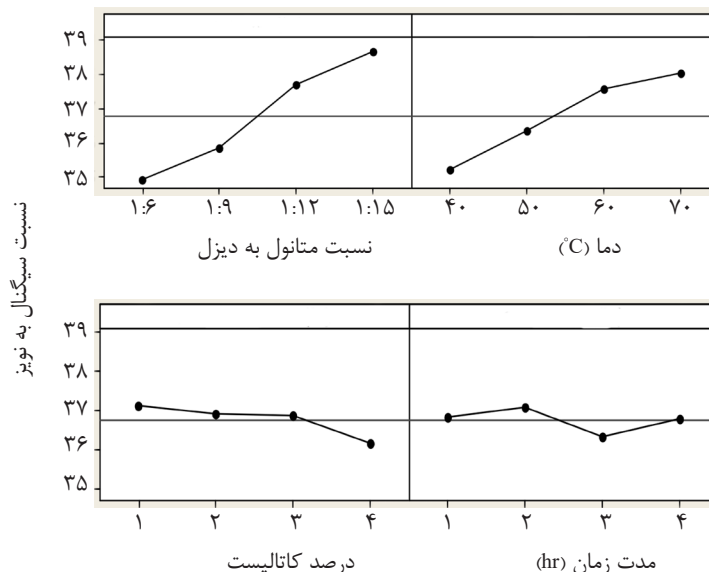
نظیر دما، زمان تماس، نسبت روغن به متانول و درصد کاتالیست است. به منظور بهینه‌سازی فاکتورهای مختلف در تولید بیودیزل، از نرم‌افزار MINITAB استفاده شد. روش تاگوچی با استفاده از مدل آرایه افقی ۱۶ L برای طراحی آزمایش‌ها و کاهش تعداد آزمایش‌ها به کار گرفته شد. نتایج طراحی تجربی براساس جدول ۳ گزارش شده است. به کمک نسبت سیگنال به نویز (S/N)، امکان تعیین سطوح بهینه و میزان تأثیرگذاری هر فاکتور فراهم می‌شود. در نمودار تحلیل سیگنال به نویز (S/N)، سطح دارای بالاترین مقدار متوسط سیگنال به نویز معادل بهترین سطح برای فاکتور مربوطه است.

در این مطالعه تأثیر فاکتورهای مختلف مانند نسبت متانول/روغن، مقدار کاتالیست، زمان واکنش و دما بر روی تولید بیودیزل از روغن استخراجی از دانه‌های مورینگا الیفر با استفاده از نانوکاتالیست $CuFe_2O_4/CaO$ بررسی شده است. با توجه به نتایج گزارش شده در جدول ۳، شرایط بهینه برای تولید بیودیزل از روغن مورینگا الیفر در حضور نانوکاتالیست $CuFe_2O_4/CaO$ ، به ترتیب دمای واکنش $60^\circ C$ ، زمان واکنش ۴ h، نسبت مولی متانول/روغن ۱:۱۲ و غلظت کاتالیزور ۳٪ است. در شرایط بهینه، تولید بیودیزل ۹۸/۶۹٪ بود که مقدار قابل توجهی بود.

در شکل ۷ (ب) در محدوده دمایی کم‌تر از $55^\circ C$ مقدار ۱۴٪ کاهش وزن مشاهده شده است. این میزان کاهش وزن به خاطر حذف آب جذب شده (به شکل فیزیکی) و همچنین خروج گازهای فرار احتمالی بر روی سطح کاتالیست است. علاوه بر این، در محدوده دمایی بین $55^\circ C$ تا $75^\circ C$ مقدار ۱۶٪ کاهش وزن مشاهده شده است. این کاهش وزن به دلیل خروج مواد معدنی باقی‌مانده از جمله کلریدهای باقی‌مانده در اطراف کاتالیست و خروج به شکل گاز است. در این دما بالاترین خلوص کاتالیست قابل حصول است [۲۷]. در محدوده دمایی $75^\circ C$ تا $87.5^\circ C$ ، حدود ۹٪ از وزن نمونه کاهش پیدا کرده است. این کاهش وزن به دلیل خارج شدن باقی‌مانده یون‌های مزاحم و باقی‌مانده از مواد اولیه مورد استفاده در بافت نمونه کاتالیست سنتز شده است. در دماهای بالاتر از $87.5^\circ C$ وزن نمونه به میزان ۱۵٪ کاهش پیدا کرده است که این کاهش وزن جهت حصول به خالص‌ترین ساختار کاتالیست بدون هر گونه ناخالصی احتمالی ناشی از اتمسفر و مواد اولیه باقی‌مانده است. در مجموع نمونه حدود ۵۴٪ کاهش وزنی داشته است.

بهینه‌سازی فاکتورهای اثرگذار بر بازدهی بیودیزل

فرآیند تولید بیودیزل تحت تأثیر پارامترهای مختلفی



شکل ۷ نسبت S/N برای بهینه‌سازی پارامترها با استفاده از روش تاگوچی

جدول ۳ بازدهی بیودیزل و نسبت S/N (سیگنال به نویز) در فاکتورهای مختلف

۵۱/۲۴	۳۴/۱۹۲۲	۱
۵۸/۶۷	۳۵/۳۶۸۳	۲
۶۲/۲۵	۳۵/۸۸۲۸	۳
۶۳/۸۲	۳۶/۰۹۹۱	۴
۵۵/۳۱	۳۴/۸۵۶۱	۵
۶۴/۲۶	۳۶/۱۵۸۸	۶
۶۳/۷۱	۳۶/۰۸۴۲	۷
۷۷/۱۸	۳۷/۷۵۰۱	۸
۶۵/۵۸	۳۶/۳۳۵۴	۹
۶۸/۷۲	۳۶/۷۴۱۷	۱۰
۹۴/۱۷	۳۹/۴۷۸۳	۱۱
۹۵/۹۶	۳۹/۵۸۷۳	۱۲
۶۹/۲۴	۳۶/۸۰۷۱	۱۳
۸۷/۳۵	۳۸/۸۲۵۳	۱۴
۹۸/۶۹	۳۹/۸۸۵۵	۱۵
۹۷/۲۳	۳۹/۷۵۶۰	۱۶

افزایش زمان تماس، بازدهی تولید بیودیزل از روغن استخراجی از دانه‌های مورینگا لیفرا در حضور نانوکاتالیست $C/CuFe_2O_4/CaO$ افزایش یافت در نتیجه حداکثر بازدهی تولید بیودیزل در زمان تماس ۴ h رخ داد. با افزایش زمان تماس پدیده صابون سازی رخ می‌دهد که منجر به کاهش بازدهی تولید بیودیزل می‌شود [۲۸]. بازدهی تولید بیودیزل به دمای واکنش نیز بستگی دارد [۲۹]. در این مطالعه، $60^\circ C$ دمای مناسبی بود زیرا دماهای بالاتر از $60^\circ C$ باعث افزایش واکنش صابونی شدن تری گلیسرید شده که منجر به کاهش تولید راندمان می‌شود. همچنین، در دمای بالا، حلالیت متانول در فازهای دیگر کاهش یافته که منجر به افزایش راندمان تولید بیودیزل می‌شود [۲۸]. بازدهی تولید بیودیزل با افزایش غلظت کاتالیست افزایش یافته است و مشاهده می‌شود که غلظت کم کاتالیست برای کامل نمودن واکنش مناسب نیست. اما از سوی دیگر، افزایش بیش تر غلظت کاتالیست باعث کاهش بازدهی تولید بیودیزل از روغن استخراجی

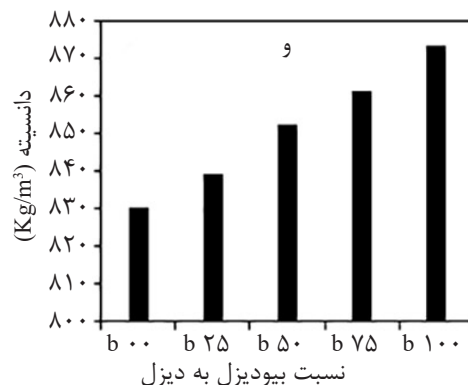
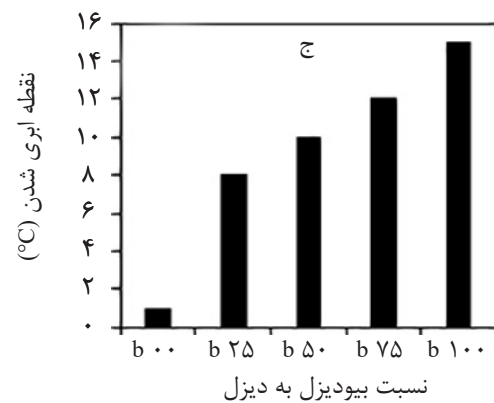
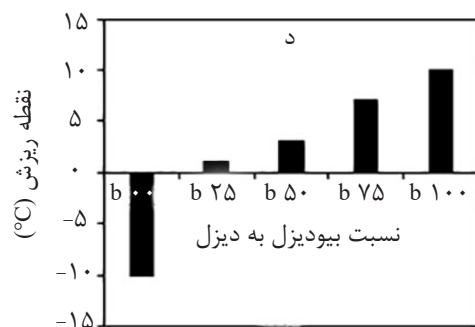
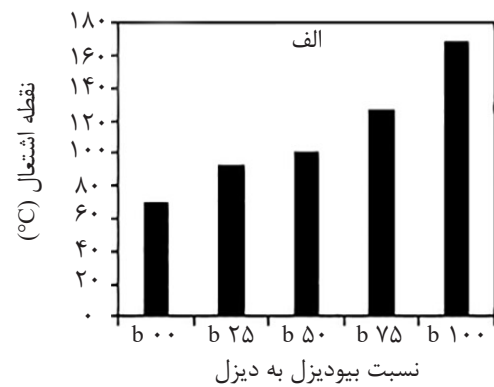
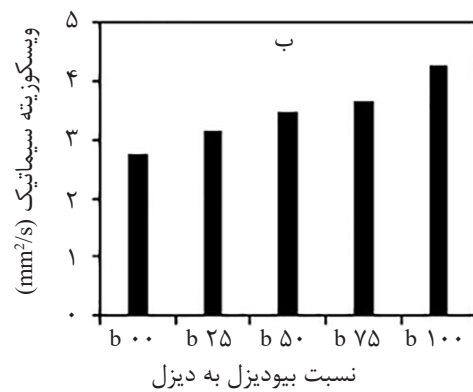
همچنین، نسبت S/N (سیگنال به نویز) برای بهینه‌سازی فاکتورها با استفاده از روش تاگوچی در شکل ۷ نشان داده شده است. یکی از فاکتورهای مهم بر روی تولید بیودیزل نسبت مولی متانول/روغن است. متانول نقش اساسی در تولید بیودیزل بازی می‌کند. اگر این ویژگی به درستی انتخاب نشده باشد، واکنش بین اسیدهای چرب آزاد و کاتالیزور منجر به تشکیل صابون می‌شود. در این مطالعه، اثر نسبت مولی متانول/روغن در محدوده ۱:۶ تا ۱:۱۵ بر میزان تولید بیودیزل مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده شده است که تولید سوخت بیودیزل با افزایش نسبت مولی افزایش یافته است. از آن جایی که روغن بسیار چسبناک است، نیاز به متانول بیش تری دارد تا حلالیت روغن را در متانول افزایش دهد. براساس نتایج نشان داده شده در جدول ۳، نسبت مولی متانول به روغن در سطح ۱:۱۲ تأثیر قابل توجهی بر روی تولید بیودیزل دارد [۶]. آزمایش‌ها برای مدت زمان‌های ۱ تا ۴ h انجام شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با

در نسبت‌های B_{00} ، B_{25} ، B_{50} ، B_{75} و B_{100} به‌دست آمد. خصوصیات فیزیکی بیودیزل خالص و مخلوط بیودیزل/دیزل شامل (الف) نقطه اشتعال، (ب) ویسکوزیته سینماتیک، (ج) نقطه ابری شدن، (د) نقطه ریزش و (و) چگالی در شکل ۸ نشان داده شده است. در جدول ۴ نیز نتایج به‌دست آمده گزارش شده است. ویسکوزیته یکی از ویژگی‌های مهم سوخت بوده که نشان‌دهنده توانایی سوخت برای جاری شدن است. همچنین، ویسکوزیته روی کیفیت متمیزه شدن سوخت تأثیرگذار است [۲۸].

از دانه‌های مورینگا الی‌فرا در حضور نانوکاتالیست $C/CuFe_2O_4/CaO$ شده است. این حالت ناشی از غلظت بالای کاتالیست است که واکنش صابونی شدن را تشکیل داده که در حضور اسیدهای چرب باعث ایجاد امولسیون بین صابون و مولکول‌های آب می‌شود [۳۰]. نسبت S/N برای تمام عوامل در محدوده ۳۵ تا ۳۹ بوده و نسبت سیگنال به نویز در شرایط مطلوب حداکثر است.

خواص فیزیکی بیودیزل خالص و بیودیزل مخلوط با دیزل

در این مطالعه خصوصیات فیزیکی بیودیزل/دیزل



شکل ۸ الف) نقطه اشتعال، ب) ویسکوزیته سینماتیک، ج) نقطه ابری شدن، د) نقطه ریزش و و) چگالی

جدول ۴ خصوصیات بیودیزل تولید شده از مورینگا الیفرا با استفاده از نانوکاتالیست $\text{CaO/CuFe}_2\text{O}_4/\text{C}$ و ترکیب آن‌ها با دیزل در نسبت‌های مختلف

B100	B75	B50	B25	B00	EN14214	ASTM D6751	خواص
					محدوده	محدوده	
۱۶۸	۱۲۶	۱۰۱	۹۲	۷۰	۹۰۰-۸۶۰	--	نقطه فلش ($^{\circ}\text{C}$)
۴/۱	۳/۶	۳/۳	۳/۱	۲/۸	--	۶-۱/۹	ویسکوزیته سینماتیک (mm^2/s)
۱۲	۹	۷	۶	۱	>۱۲۰	>۱۳۰	نقطه ابری ($^{\circ}\text{C}$)
۸	۶	۲	-۱	-۱۰	--	--	نقطه جاری شدن ($^{\circ}\text{C}$)
۸۷۰	۸۵۸	۸۵۰	۸۳۹	۸۳۱	--	--	چگالی (Kg/m^3)

که سوخت آتش می‌گیرد اگر سوخت در معرض شعله یا جرقه قرار گیرد. هر چه دمای اشتعال سوخت بالاتر باشد از لحاظ ایمنی سوخت بهتر است [۲۸]. با توجه به نتایج به‌دست آمده، نقطه اشتعال با استاندارد بین‌المللی مطابقت داشته و در مقایسه با سوخت دیزل به‌طور قابل توجهی بالا است. پس می‌توان بیان کرد که ایمنی و ذخیره‌سازی بیودیزل تولیدی از روغن دانه‌های مورینگا الیفرا در حضور نانوکاتالیست $\text{C/CuFe}_2\text{O}_4/\text{CaO}$ در مقایسه با دیزل خیلی بیش‌تر است.

مقایسه نتایج با کارهای دیگران

راندمان بیودیزل به‌دست آمده از روغن دانه‌های مورینگا الیفرا با استفاده از کاتالیست تولید شده در این تحقیق با کاتالیست‌های دیگر توسط محققین پیشین مقایسه شد و نتایج در جدول ۵ گزارش شده است. همان‌طور که از جدول پیداست، بازدهی بیودیزل تولید شده با استفاده از نانوکاتالیست $\text{C/CuFe}_2\text{O}_4/\text{CaO}$ برابر با ۹۸/۶۹٪ حاصل شد که بیشتر از بازدهی تولید شده توسط کارهای قبلی است.

مقدار ویسکوزیته سینماتیک بیودیزل و همچنین، نسبت‌های مولی مختلف بیودیزل و دیزل در محدوده استاندارد ASTM D6751 قرار دارد. همچنین، دانسیته از ویژگی‌های مهم سوخت در سیستم‌های سوخت بسته است که می‌تواند بر روی راندمان تمیزه شدن سوخت مؤثر باشد [۲۸]. با توجه به نتایج به‌دست آمده، چگالی در نسبت‌های مختلف در محدوده استاندارد قرار گرفته و مخلوط بیودیزل/ دیزل می‌تواند در وسایل نقلیه مورد استفاده قرار گیرد. علاوه‌براین، نقطه ابری شدن به‌عنوان دمایی تعریف می‌شود که اولین کریستال در سوخت تشکیل می‌شود. نقطه ریزش نیز کمترین دمایی است که سوخت می‌تواند جاری شود. هر دو ویژگی نقطه ابری شدن و نقطه ریزش برای تعیین کاربرد سوخت در دماهای سرد مورد استفاده قرار می‌گیرند. هرچه این دو ویژگی کوچک‌تر باشند سوخت بهتر می‌تواند در مناطق سرد استفاده شود [۲۸]. با توجه به نتایج موجود در جدول ۴، بیودیزل خالص تولید شده در این کار نمی‌تواند در مناطق سردسیر مورد استفاده قرار گیرد زیرا دارای مقدار بالایی است. نقطه اشتعال سوخت نیز دمایی است

جدول ۵ مقایسه کار حاضر با کارهای دیگران در تولید بیودیزل از روغن دانه مورینگا الیفر با استفاده از کاتالیست‌های مختلف

مرجع	بازدهی بیودیزل (%)	شرایط واکنش			دما (°C)	نانوکاتالیست
		زمان واکنش (min)	درصد کاتالیست (%)	نسبت مولی الکل به روغن		
[۳۱]	۹۷/۰۶	۱۳۰	۸/۰۲	۱: ۸/۶۶	-	پوسته صدف حلزونی (CSs)
[۳۲]	۹۴/۰۲	۶۰	۱	۶:۴	۵۰	پتاسیم فلوراید بارگذاری شده بر روی پوسته تخم‌مرغ
[۳۳]	۸۴	۱۵۰	۳	۱۹/۵: ۱	۱۵۰	اکسید قلع سولفات شده با SiO_2 ($\text{SO}_4^{2-} / \text{SnO}_2\text{-SiO}_2$)
[۳۴]	۸۲	۶۰	۱	۳۰ (%wt)	۶۰	کاتالیست قلیایی
[۳۵]	۶۰	۹۰	۰/۵	۱۲: ۱	۶۰-۷۰	منیزیم اکسید (MgO)
مطالعه حاضر	۹۸/۶۹	۲۴۰	۳	۱: ۱۲	۶۰	C/CuFe ₂ O ₄ /CaO

نتیجه‌گیری

با استفاده از نانوکاتالیست ناهمگن C/CuFe₂O₄/CaO، از روش تاگوچی ۱۶ L به کمک نرم‌افزار MINITAB استفاده گردید. نتایج تجربی به دست آمده شرایط بهینه را به ترتیب در نسبت مولی متانول/روغن ۱:۱۲، زمان واکنش ۴ h، دمای ۶۰ °C و درصد کاتالیزور ۳ نشان داد. پس از بهینه‌سازی بیودیزل تولید شده از مورینگا الیفر با همراه نانوکاتالیست ناهمگن C/CuFe₂O₄/CaO به منظور بهبود خصوصیات فیزیکی بیودیزل تولید شده، بیودیزل را با دیزل در نسبت‌های مختلف (B ۷۵، B ۵۰، B ۲۵، B ۰۰) و ۱۰۰ B) مخلوط کرده و خواص آن‌ها نظیر نقطه اشتعال، ویسکوزیته سینماتیک، نقطه ابری شدن، نقطه ریزش و چگالی تعیین شد. نتایج مشخص شده خصوصیات فیزیکی مذکور با استانداردهای بین‌المللی EN14214 و ASTM D6751 مقایسه گردید. نتایج بیان کرد که بیودیزل نمی‌تواند در هوای سرد مورد استفاده قرار گیرد. دیگر خواص بیودیزل در نسبت‌های مختلف با دیزل در محدوده استاندارد قرار داشت.

در این مطالعه، به منظور استخراج روغن از دانه‌های مورینگا الیفر از C/CuFe₂O₄/CaO استفاده گردید. از سوی دیگر، جهت تولید زغال از برگ درخت کنار استفاده شد. همچنین، برای سنتز CaO از پوسته تخم‌مرغ استفاده گردید. به علاوه، به منظور تولید نانوکاتالیست، ذرات CuFe₂O₄ به روش ترسیب شیمیایی بر روی ذرات CaO قرار داده شد و به عنوان نانوکاتالیست ناهمگن C/CuFe₂O₄/CaO مورد استفاده قرار گرفت. جهت تعیین خصوصیات نانوکاتالیست ناهمگن C/CaO/CuFe₂O₄ از آنالیزهای SEM، FTIR، XRD، EDX، TGA و TEM استفاده شد. به منظور تولید بیودیزل از روغن مورینگا الیفر با همراه نانوکاتالیست ناهمگن C/CuFe₂O₄/CaO فرآیند استریفیکاسیون مورد استفاده قرار گرفت. در مطالعه حاضر، فاکتورهایی شامل نسبت مولی متانول/روغن، زمان واکنش، دما و مقدار کاتالیست بهینه‌سازی شد. جهت بهینه‌سازی فاکتورهای مؤثر بر روی بیودیزل تولید شده از روغن مورینگا الیفر

مراجع

- [1]. Sadaf, S., Iqbal, J., Ullah, I., Bhatti, H. N., Nouren, S., Nisar, J. and Iqbal, M. "Biodiesel production from waste cooking oil: An efficient technique to convert waste into biodiesel," Sustainable Cities and Society, Vol. 41, pp. 220-226, 2018.

- [2]. Gardy J., Osatiashtiani A., Céspedes O., Hassanpour A., Lai X., Lee A. F. and Rehan M., "A magnetically separable $SO_4/Fe-Al-TiO_2$ solid acid catalyst for biodiesel production from waste cooking oil," *Applied Catalysis B: Environmental*, Vol. 234, pp. 268-278, 2018.
- [3]. Kakati J., Gogoi T. K. and Pakshirajan K., "Production of biodiesel from Amari (*Amoora Wallichii* King) tree seeds using optimum process parameters and its characterization," *Energy Conversion and Management*, Vol. 135, pp. 281-290, 2017.
- [4]. Yatish K. V., Lalithamba H. S., Suresh R. and Hebbar H. H., "Optimization of *bauhinia variegata* biodiesel production and its performance, combustion and emission study on diesel engine," *Renewable Energy*, Vol. 122, pp. 561-575, 2018.
- [5]. Zhang H., Li H., Pan H., Wang A., Souzanchi S., Xu C. C. and Yang, S. "Magnetically recyclable acidic polymeric ionic liquids decorated with hydrophobic regulators as highly efficient and stable catalysts for biodiesel production," *Applied Energy*, Vol. 223, pp. 416-429, 2018.
- [6]. Hoseini S. S., Najafi G., Ghobadian B., Mamat R., Ebadi M. T. and Yusaf T., "*Ailanthus altissima* (tree of heaven) seed oil: Characterisation and optimisation of ultrasonication-assisted biodiesel production," *Fuel*, Vol. 220, pp. 621-630, 2018.
- [7]. Joshi S., Gogate P. R., Moreira Jr, P. F. and Giudici R., "Intensification of biodiesel production from soybean oil and waste cooking oil in the presence of heterogeneous catalyst using high speed homogenizer," *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol. 39, pp. 645-653, 2017.
- [8]. Mohod A. V., Gogate P. R., Viel G., Firmino P. and Giudici R., "Intensification of biodiesel production using hydrodynamic cavitation based on high speed homogenizer," *Chemical Engineering Journal*, Vol. 316, pp. 751-757, 2017.
- [9]. Milano J., Ong H. C., Masjuki H. H., Silitonga A. S., Chen W. H., Kusumo F., Dharma S. and Sebayang A. H., "Optimization of biodiesel production by microwave irradiation-assisted transesterification for waste cooking oil-*Calophyllum inophyllum* oil via response surface methodology," *Energy Conversion and Management*, Vol. 158, pp. 400-415, 2018.
- [10]. Kusumo F., Silitonga A. S., Ong H. C., Masjuki H. H. and Mahlia T. M. I., "A comparative study of ultrasound and infrared transesterification of *Sterculia foetida* oil for biodiesel production," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 39, No. 13, pp. 1339-1346, 2017.
- [11]. Gupta A. R., Jalan A. P. and Rathod V. K., "Solar energy as a process intensification tool for the biodiesel production from hempseed oil," *Energy Conversion and Management*, Vol. 171, pp. 126-132, 2018.
- [12]. Baskar G., Selvakumari I. A. E. and Aiswarya R., "Biodiesel production from castor oil using heterogeneous Ni doped ZnO nanocatalyst," *Bioresource Technology*, Vol. 250, pp. 793-798, 2018.
- [13]. Baskar G. and Soumiya S., "Production of biodiesel from castor oil using iron (II) doped zinc oxide nanocatalyst," *Renewable Energy*, Vol. 98, pp. 101-107, 2016.
- [14]. Anwar F. and Rashid U., "Physico-chemical characteristics of *Moringa oleifera* seeds and seed oil from a wild provenance of Pakistan," *Pak. J. Bot.*, Vol. 39, Issue 5, pp. 1443-1453, 2007.

- [15]. Abdulkarim S. M., Long K., Lai O. M., Muhammad S. K. S. and Ghazali H. M., "Some physico-chemical properties of *Moringa oleifera* seed oil extracted using solvent and aqueous enzymatic methods," Vol. 93, Issue 2, pp. 253-263, November 2005.
- [16]. Viriya-Empikul N., Krasae P., Puttasawat B., Yoosuk B., Chollacoop N. and Faungnawakij K., "Waste shells of mollusk and egg as biodiesel production catalysts," *Bioresource Technology*, Vol. 101, Issue 10, pp. 3765-3767, 2010.
- [17]. Hashemian S., "Kinetic and thermodynamic of adsorption of methylene blue (MB) by $CuFe_2O_4$ /rice bran composite," *International Journal of Physical Sciences*, Vol. 6, Issue 27, pp. 6257-6267, 2011.
- [18]. Zhang G., Qu J., Liu H., Cooper A. T. and Wu R., " $CuFe_2O_4$ /activated carbon composite: a novel magnetic adsorbent for the removal of acid orange II and catalytic regeneration," *Chemosphere*, Vol. 68, Issue 6, pp. 1058-1066, 2007.
- [19]. Liu Y., Zhang P., Fan M. and Jiang P., "Biodiesel production from soybean oil catalyzed by magnetic nanoparticle $MgFe_2O_4@CaO$," *Fuel*, Vol. 164, pp. 314-321, 2016.
- [20]. Nabyouni G., Ghanbari D. A. V. O. O. D., Yousofnejad A. S. I. E. H., Seraj M. I. N. O. O. and Mirdamadian Z. A. H. R. A., "Microwave-Assisted Synthesis of $CuFe_2O_4$ Nanoparticles and Starch-Based Magnetic Nanocomposites," *Journal of Nanostructures*, Vol. 3, Issue 2, pp. 155-160, 2013.
- [21]. Agouriane E., Rabi B., Essoumhi A., Razouk A., Sahlaoui M., Costa B. F. O. and Sajieddine M., "Structural and magnetic properties of $CuFe_2O_4$ ferrite nanoparticles synthesized by co-precipitation," *J. Mater. Environ. Sci.*, Vol. 7, Issue 11, pp. 4116-4120, 2016.
- [22]. Roy A. and Bhattacharya J., "Microwave-assisted synthesis and characterization of CaO nanoparticles," *International Journal of Nanoscience*, Vol. 10, Issue 03, pp. 413-418, 2011.
- [23]. Margaretha Y. Y., Prastyo H. S., Ayucitra A. and Ismadji S., "Calcium oxide from *Pomacea* sp. shell as a catalyst for biodiesel production," *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, Vol. 3, Issue 1, p. 33, 2012.
- [24]. Altincekic T. G., Boz I., Baykal A., Kazan S., Topkaya R. and Toprak M. S., "Synthesis and characterization of $CuFe_2O_4$ nanorods synthesized by polyol route," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 493, Issue 1-2, pp. 493-498, 2010.
- [25]. Azizkhani V., Montazeri F., Molashahi E. and Ramazani A., "Magnetically Recyclable $CuFe_2O_4$ Nanoparticles as an Efficient and Reusable Catalyst for the Green Synthesis of 2, 4, 6, 8, 10, 12-Hexabenzyl-2, 4, 6, 8, 10, 12-hexaazaisowurtzitane as CL-20 Explosive Precursor," *Journal of Energetic Materials*, Vol. 35, Issue 3, pp. 314-320, 2017.
- [26]. Xu Z. X., X, G. S., F, X. Q. and Wang Q., "The mechanism of nano-CuO and $CuFe_2O_4$ catalyzed thermal decomposition of ammonium nitrate," *Nanomaterials and Nanotechnology*, Vol. 6, pp. 1-10, 2016.
- [27]. Altincekic, T. G., Boz, I., Baykal, A., Kazan, S., Topkaya, R. and Toprak, M. S. "Synthesis and characterization of $CuFe_2O_4$ nanorods synthesized by polyol route," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 493, Issue 1-2, pp. 493-498, 2010.

- [28]. Seffati K., Honarvar B., Esmaeili H. and Esfandiari N., "Enhanced biodiesel production from chicken fat using $\text{CaO/CuFe}_2\text{O}_4$ nanocatalyst and its combination with diesel to improve fuel properties," Fuel, Vol. 235, pp. 1238-1244 1 January 2019.
- [29]. Keihani M., Esmaeili H. and Rouhi P., "Biodiesel production from chicken fat using Nano-calcium Oxide catalyst and improving the fuel properties via blending with diesel," Physical Chemistry Research, Vol. 6, Issue 3, pp. 521-529, 2018.
- [30]. Keera S. T., El Sabagh S. M. and Taman A. R., "Castor oil biodiesel production and optimization," Egyptian journal of Petroleum, Vol. 27, Issue 4, pp. 979-984, 2018.
- [31]. Niju S., Anushya C. and Balajii M., "Process optimization for biodiesel production from *Moringa oleifera* oil using conch shells as heterogeneous catalyst," Environmental Progress & Sustainable Energy, Vol. 38, Issue 3, e13015, 2018.
- [32]. Aziz M. A. A., Triwahyono S., Jalil A. A., Rapai H. A. A. and Atabani A. E., "Transesterification of *moringa oleifera* oil to biodiesel using potassium fluoride loaded eggshell as catalyst," Malaysian Journal of Catalysis, Vol. 1, Issue 1, pp. 22-26, 2016.
- [33]. Kafuku G., Lam M. K., Kansedo J., Lee K. T. and Mbarawa M., "Heterogeneous catalyzed biodiesel production from *Moringa oleifera* oil". Fuel Processing Technology, Vol. 91, Issue 11, pp. 1525-1529, 2010.
- [34]. Kafuku G. and Mbarawa M., "Alkaline catalyzed biodiesel production from *moringa oleifera* oil with optimized production parameters," Applied Energy, Vol. 87, Issue 8, pp. 2561-2565, 2010.
- [35]. Nawi A. B., "Biodiesel production from *moringa oleifera* seeds oil by using MgO as a catalyst," (Doctoral Dissertation, UMP), 2015.



Biodiesel production from Moringa Oleifera Oil Using $\text{CaO}/\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{C}$ Heterogeneous Nanocatalyst and Combining Them with Diesel for Improvement of Fuel Properties

Kambiz Sefati¹, Hossein Esmaeili^{2*}, Bizhan Honarvar¹ and Nadia Esfandiari¹

1. Department of Chemical Engineering, Marvdasht Branch, Marvdasht, Islamic Azad University, Iran

2. Department of Chemical Engineering, Bushehr Branch, Bushehr, Islamic Azad University, Iran

esmaeili.hossein@gmail.com

DOI: 10.22078/pr.2019.3728.2697

Received: March/22/2019

Accepted: May/26/2019

Introduction

The need for energy is increasing due to industrialization and urban growth. The main sources of energy include oil, coal and natural gas, which are declining day by day due to the nature of non-renewable energy [1]. Therefore, finding a cheap and environmentally friendly fuel is essential [2]. Therefore, biodiesel and its diesel fuel mixture have been selected as an alternative fuel worldwide. Because biodiesel has advantages such as improved viscosity, higher ignition point, better biodegradability in the environment, reduced emissions and more toxicity than conventional diesel [3-5].

In recent years, nanotechnology has played an important role in the sterilization process in biodiesel production. Nanocatalyst, with its pores, selectivity and increased catalytic activity, has solved some of the problems in the sterilization process in biodiesel production [6].

In the present study, heterogeneous nanocatalysts $\text{C}/\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{CaO}$ were used in the production of biodiesel extracted from Moringa oil. Also, the factors affecting the yield of biodiesel extracted from Moringa oil

were investigated using heterogeneous nanocatalysts $\text{C}/\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{CaO}$. In addition, the physical properties of pure biodiesel and biodiesel mixed with diesel have been studied in different ratios.

Experimental Procedure

In order to extract the oil, the seeds of Moringa oleifera were separated from the pods and washed with distilled water. The foy dryer was used for 4 hours at temperature 85 °C to absorb the moisture of the Moringa grains. The dried seeds were ground. Their oil was separated by a hexane solvent in a Soxhlet machine.

To prepare the carbon charcoal, the Ziziphus tree leaves were first washed several times with distilled water. It was then dried in an oven at 90 °C for 24 hours. The carbonized sheets were granulated using a powder mill and sieve. In order to produce CaO , the eggshell was first collected from local restaurants. Rinsed with water and was placed inside the oven for 24 hours at 105 °C. After drying, the eggshells were placed in an oven at 800 °C for 4 hours to complete the

calcination process [7]. After calcination, the eggshells were pulverized and stored in plastic bags away from moisture and at room temperature. After production CaO , the CuFe_2O_4 particles were loaded onto the CaO particles by sedimentary method.

Statistical design was performed using $\text{C/CuFe}_2\text{O}_4/\text{CaO}$ nanocatalysts to optimize various factors in the biodiesel production process of Moringa oleifera seed oil. In this study, the esterification process to produce biodiesel from Moringa oleifera oil was used in the presence of $\text{C/CuFe}_2\text{O}_4/\text{CaO}$ nanocatalysts.

Results and Discussion

$\text{C/CuFe}_2\text{O}_4/\text{CaO}$ heterogeneous nanocatalysts properties

According to Figure 1a, it is observed that the synthesized catalyst has many pores, and the order of these cavities is regular. Figure 1b and c show the electron microscopy images of the $\text{C/CuFe}_2\text{O}_4/\text{CaO}$ synthesized composite sample.

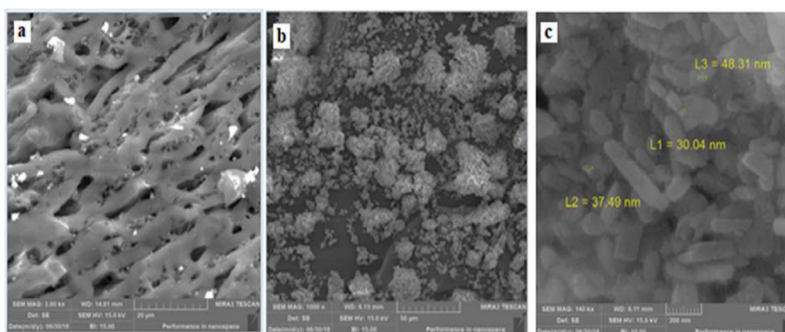


Fig 1: SEM Images of a) C/CaO , b) c) $\text{C/CaO/CuFe}_2\text{O}_4$ nanocomposite.

FTIR analysis of C/CaO nano-composite, CuFe_2O_4 catalyst and $\text{C/CuFe}_2\text{O}_4/\text{CaO}$ composite catalyst was performed to evaluate the functional groups. Figure 2 shows the XRD analysis of C/CaO , CuFe_2O_4 , and $\text{C/CuFe}_2\text{O}_4/\text{CaO}$ samples.

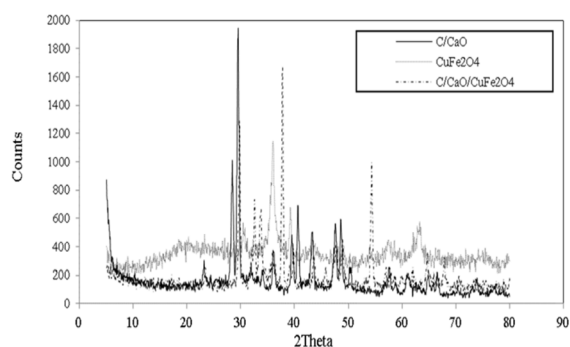


Fig 2: XRD analysis of C/CaO , CuFe_2O_4 , and $\text{C/CuFe}_2\text{O}_4/\text{CaO}$ samples.

Optimizing factors affecting biodiesel efficiency

The production process of biodiesel is affected by various parameters such as temperature, contact time, oil to methanol ratio and catalyst percentage. In this study, the effect of various factors such as methanol/oil ratio, catalyst value, reaction time and temperature on biodiesel

production of oil extracted from Moringa oleifera seeds using $\text{C/CuFe}_2\text{O}_4/\text{CaO}$ nanocatalyst was investigated. One of the most important factors in biodiesel

production is the molecular ratio of methanol/oil.

Methanol plays a key role in biodiesel production. If this feature is not chosen correctly, the reaction between free fatty acids and the catalyst will lead to the formation of soap. Biodiesel fuel production has increased with an increase in molecular weight of methanol/oil. With the increase in contact time, the yield of biodiesel production from oil extracted from Moringa oleifera seeds increased in the presence of $\text{C/CuFe}_2\text{O}_4/\text{CaO}$ nanocatalysts. By increasing contact time, the phenomenon of soap making occurs, which leads to a decrease in the production efficiency of biodiesel [8]. The efficiency of biodiesel production also depends on the reaction temperature [9]. In this study, 60°C was the suitable temperature. The efficiency of biodiesel production has increased with an increase in catalyst concentration.

It is observed that low catalyst concentrations are not suitable for completing the reaction. On the other hand, further increases in catalyst concentrations have reduced the yield of biodiesel production from oil extracted from Moringa oleifera seeds in the presence of $\text{C/CuFe}_2\text{O}_4/\text{CaO}$ nanocatalysts [10].

The physical properties of pure biodiesel and biodiesel mixed with diesel

In this study, the physical properties of biodiesel / diesel were obtained in B00, B25, B75 and B100 ratios. The physical properties of pure biodiesel and blended biodiesel / diesel including a flash point, the kinematic viscosity, the cloud point, pour point and the density results obtained are reported in the Table 1.

Table 1: Properties of biodiesel produced from *Moringa oleifera* using $C/CuFe_2O_4/CaO$ nanocatalysts and combine them with diesel in various ratios.

B100	B75	B50	B25	B00	EN14214	ASTM D6751	Property
					Limits	Limits	
168	126	101	92	70	860-900	---	Flash point (°C)
4.1	3.6	3.3	3.1	2.8	---	1.9-6	Kinematic viscosity (mm ² /s)
12	9	7	6	1	120 <	130 <	Cloud point (°C)
8	6	2	-1	-10	---	---	Pour point (°C)
870	858	850	839	831	---	---	Density (Kg/m ³)

Conclusions

In this study, in order to extract oil from *Moringa oleifera* seeds, *Ziziphus* tree leaves were used to produce charcoal to synthesize CaO from eggshells. In order to produce nanocatalysts, the $CuFe_2O_4$ particles were chemically deposited on the CaO particles. The $C/CuFe_2O_4/CaO$ was used as a heterogeneous nanocatalyst. The experimental results showed the optimal conditions in the molecular ratio of methanol/oil 1:12, reaction time 4 h, temperature 60 °C and catalyst 3% respectively. After optimizing the biodiesel produced by *Moringa oleifera*, the $C/CuFe_2O_4/CaO$ heterogeneous nanocatalyst was developed to improve the physical properties of the biodiesel, Finally, biodiesel was mixed with diesel in different ratios, and their properties such as ignition point, kinematic viscosity, clouding point, drop point and density were determined.

References

- Sadaf S, Iqbal J, Ullah I, Bhatti H N, Nouren S, Nisar J, Iqbal M (2018) Biodiesel production from waste cooking oil: An efficient technique to convert waste into biodiesel, *Sustainable Cities and Society*, . 41: 220-226.
- Gardy J, Osatiashtiani A, Céspedes O, Hassanpour A, Lai X, Lee A F, Wilson K, Rehan M (2018) A magnetically separable $SO_4/Fe-Al-TiO_2$ solid acid catalyst for biodiesel production from waste cooking oil, *Applied Catalysis B: Environmental*, 234: 268-278.
- Kakati J, Gogoi T K, Pakshirajan K (2017) Production of biodiesel from Amari (*Amoora Wallichii* King) tree seeds using optimum process parameters and its characterization, *Energy Conversion and Management*, 135: 281-290.
- Yatish K V, Lalithamba H S, Suresh R, Hebbar H H (2018) Optimization of *bauhinia variegata* biodiesel production and its performance, combustion and emission study on diesel engine, *Renewable Energy*, 122: 561-575.
- Zhang H, Li H, Pan H, Wang A, Souzanchi S, Xu C. C., Yang S (2018) "Magnetically recyclable acidic polymeric ionic liquids decorated with hydrophobic regulators as highly efficient and stable catalysts for biodiesel production," *Applied Energy*, 223: 416-429.
- Baskar G, Soumiya S (2016) Production of biodiesel from castor oil using iron (II) doped zinc oxide nanocatalyst, *Renewable Energy*, 98, 101-107.
- Viriya-Empikul N, Krasae P, Puttasawat B, Yoosuk B, Chollacoop N, Faungnawakij K (2010) Waste shells of mollusk and egg as biodiesel production catalysts, *Bioresource Technology*, 101(10): 3765-3767.
- Seffati K, Honarvar B, Esmaeili H, Esfandiari N (2019) Enhanced biodiesel production from chicken fat using $CaO/CuFe_2O_4$ nanocatalyst and its combination with diesel to improve fuel properties, *Fuel*, 235: 1238-1244.
- Keihani M, Esmaeili H, Rouhi P (2018) Biodiesel production from chicken fat using nano-calcium oxide catalyst and improving the fuel properties via blending with diesel, *Physical Chemistry Research*, 6(3): 521-529.
- Keera S T, El Sabagh S M, Taman A R (2018) "Castor oil biodiesel production and optimization," *Egyptian journal of petroleum*, 27(4): 979-984.