

بررسی و ارزیابی خواص دی‌الکتریک بیودیزل کرچک با استفاده از امواج مایکروویو

محمد زارعین^۱، محمدهادی خوش تقاضا^{۲*}، برات قبادیان^۳ و حسین عامری مهابادی^۴

^۱ - دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، m.zarein@modares.ac.ir

^۲ - استاد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، khoshtag@modares.ac.ir

^۳ - استاد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ghobadib@modares.ac.ir

^۴ - استاد، مهندسی برق، مرکز تحقیقات مخابرات ایران، تهران، ameri@ieee.org

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۹، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۷/۴/۹، پذیرش: ۹۷/۶/۱۰)

چکیده: گرایش به تحقیق پیرامون تولید و کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر، از جمله بیودیزل، به‌منظور کاهش گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی، یکی از مهم‌ترین مواردی است که در سیاست‌های جهانی به آن پرداخته شده است. خواص دی‌الکتریک (ϵ' ، ثابت دی‌الکتریک و ϵ'' ، فاکتور اتلاف دی‌الکتریک) مواد نقش عمده‌ای در طراحی سامانه مایکروویو و فرایند تولید و فرآوری بیودیزل دارند. هدف از این پژوهش بررسی و ارزیابی خواص دی‌الکتریک بیودیزل کرچک در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از فناوری پیشرفته مایکروویو و بررسی ارتباط بین پارامترهای مختلف موثر آن است. در این تحقیق، اثرات زمان واکنش (۱، ۳ و ۹ دقیقه)، غلظت کاتالیزور (۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزن روغن) و تغییرات دما (۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه سلسیوس) مورد مطالعه قرار گرفت. از سامانه بازتابش پروب در فرکانس ۲۴۵۰ MHz برای اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریک استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش زمان واکنش و کاهش دما، مقادیر ثابت دی‌الکتریک افزایش و با کاهش غلظت کاتالیزور، دما و زمان واکنش، فاکتور اتلاف دی‌الکتریک کاهش می‌یابد.

کلیدواژگان: بیودیزل کرچک، فرایند تولید، خواص دی‌الکتریک، فرکانس، کاتالیزور

مقدمه

با توجه به کاهش منابع نفتی در ایران، و مسائل زیست‌محیطی (به‌ویژه در شهرهای بزرگ) و به‌منظور تامین انرژی پایدار، حرکت به سمت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و نسبتاً پاک ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. سوخت‌های گیاهی یکی از منابع تولید سوخت‌های تجدیدپذیر بوده و می‌توانند جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی باشند. احتراق سوخت‌های برپایه گیاهی درواقع استفاده غیرمستقیم از انرژی خورشید است. سوخت‌های گیاهی به‌طور عمده آلودگی‌های کمتری نسبت به سوخت‌های فسیلی دارند و به‌راحتی می‌توانند از بقایای مواد گیاهی تولید شوند [۱]. ازجمله سوخت‌های زیستی می‌توان به بیودیزل اشاره کرد. بیودیزل، اتیل استر یا متیل استری است که از روغن‌های گیاهی یا چربی‌های حیوانی تولید شده و به‌عنوان سوخت در موتورهای دیزل یا سامانه‌های حرارتی استفاده می‌شود [۲]. بیودیزل را، علاوه بر روغن‌های نباتی تازه، می‌توان از روغن‌های پسماند نیز تولید کرد [۳]. میزان گرانش و حلالیت در الکل روغن کرچک از اکثر روغن‌های گیاهی بالاتر است. محتوای روغن دانه‌های کرچک در حدود ۴۰-۶۰ درصد است. به دلیل بالابودن روغن دانه‌های کرچک، این دانه به‌عنوان منبع تولید بیودیزل مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. رایج‌ترین روش تولید بیودیزل واکنش ترانس‌استریفیکاسیون روغن گیاهی و

چربی‌های حیوانی است [۵]. مطالعات متعددی بر روی انواع کاتالیزورهای به‌کاررفته در تولید بیودیزل، شامل کاتالیزورهای همگن بازی همچون هیدروکسید سدیم و یا هیدروکسید پتاسیم [۶-۷]، کاتالیزورهای همگن اسیدی مانند اسید سولفوریک و اسید کلریدریک [۸-۹]، کاتالیزورهای ناهمگن اسیدی مانند دی‌اکسید زیرکونیوم [۱۰] و دی‌اکسید تیتانیوم [۸]، ژئولیت‌ها [۱۱-۱۲]، گروه کربنی [۱۳] و رزین‌های تبادل یونی [۱۴]، کاتالیزورهای ناهمگن بازی شامل اکسیدهای فلزی همچون اکسید کلسیم [۱۵]، اکسید منیزیم [۱۶] و اکسید استرانسیم [۱۷-۱۸]، اکسیدهای فلزات واسطه مانند اکسید روی، اکسید تیتانیوم و اکسید زیرکونیوم [۱۹]، ترکیب اکسیدهای فلزی همچون دولومیت [۲۰] و کلیسیلیت [۲۱] و همچنین مواد آهکی ارزان مثل پوست تخم مرغ، حلزون و صدف [۲۲-۲۳] انجام گرفته است. همچنین، کاتالیز دیگر به‌کاررفته در تولید بیودیزل آنزیم‌ها همچون لیپاز [۲۴] و نوازیم [۲۵] هستند.

مطالعاتی بر روی خواص دی‌الکتریک متانول و اتانول به‌عنوان ترکیبات اصلی و پایه‌ای بیودیزل در حالت‌های مختلف با/بدون کاتالیزور در فرکانس و دماهای مختلف برای طراحی و ارزیابی سامانه تولید بیودیزل براساس خواص به‌دست‌آمده انجام شده است. نتایج نشان دادند که مقادیر خواص دی‌الکتریک متانول و اتانول با تغییرات فرکانس و دما تغییرات اساسی را نشان می‌دهند [۲۶]. نمونه‌های مختلف بیودیزل از ۲۱ نوع روغن مختلف برای تجزیه و تحلیل برخی ویژگی‌های بیودیزل از قبیل چگالی، گرانیروی سینماتیکی، متانول و محتوای آب با رویکرد شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از طیف‌سنجی مادون قرمز نزدیک انتخاب شد [۲۷]. همچنین، از حسگر دی‌الکتریک به روش حفره تشدید برای اندازه‌گیری مخلوط‌های اتانول و بنزین استفاده شد. این حسگر یک خروجی فرکانسی ۵۸/۵ تا ۶۰/۲۳ هرتز برای بیودیزل و ۵۱/۸۴ تا ۵۲/۶۲ هرتز برای دیزل به‌دست می‌دهد. اختلاف فرکانس ۷/۱۴ هرتز برای تعیین مخلوط بیودیزل و دیزل مناسب بود [۲۸]. از طرفی تحقیقی بر روی تاثیر پرتوهای مایکروویو بر روی بعضی از ویژگی‌های روغن سویا مانند ساختار، گرانیروی و ویژگی‌های حرارتی آن صورت گرفت [۲۹]. امواج مایکروویو بخشی از طیف امواج الکترومغناطیسی است که محدوده فرکانسی بین ۳۰۰ مگاهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز و متناظر با آن طول موجی بین ۱ متر تا ۱ میلی‌متر را شامل می‌شود [۳۰]. خواص دی‌الکتریک در فرکانس‌های پایین با افزایش دما افزایش می‌یابد، اما در فرکانس‌های بالا کاهش پیدا می‌کند [۳۱]. آزمایش‌ها نشان می‌دهند که خواص دی‌الکتریک به‌شدت متأثر از میزان رطوبت، فرکانس و چگالی حجمی ماده است [۳۲]. روش استفاده از امواج مایکروویو مزایای فراوانی مانند اندازه‌گیری و تفسیر سریع، دقت بالا، نفوذ به درون موادی که از نظر اپتیکی کدرند، هزینه تقریبی مناسب، نداشتن خطر تشعشع، و میسر بودن امکان اندازه‌گیری برخط را داراست [۳۳].

صنایع تولیدی سوخت و فرآوری اصلی آن نیاز به اندازه‌گیری پیوسته ویژگی‌های کیفی سوخت به‌ویژه مقدار درصد تبدیل (درصد تبدیل روغن به بیودیزل) و رطوبت دارند. با اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریک (ϵ' ، ثابت دی‌الکتریک و ϵ'' ، فاکتور اتلاف دی‌الکتریک)، می‌توان ویژگی‌های کیفی سوخت را بررسی کرد [۲۷]. کاربردهای متعدد روغن کرچک، به‌دلیل خصوصیات فیزیکوشیمیایی منحصر به فرد آن در صنایع دارویی، شیمیایی، بهداشتی، آرایشی و تولید سوخت بیودیزل، باعث شده است تا پژوهش‌های زیادی روی آن انجام بگیرد. با اندازه‌گیری و به‌دست‌آوردن خواص دی‌الکتریک بیودیزل کرچک می‌توان ویژگی‌های کیفی سوخت را پیش‌بینی کرد که تاکنون این کار انجام نشده است. لذا، هدف از این پژوهش بررسی خواص دی‌الکتریک بیودیزل کرچک در دما، زمان واکنش و درصد کاتالیزورهای مختلف در فرکانس ۲۴۵۰ MHz طبق استاندارد (ISM) است.

مواد و روش‌ها

تهیه نمونه بیودیزل از روغن کرچک

روغن کرچک با خلوص ۹۹ درصد از شرکت دارویی و بهداشتی فارابی تهران خریداری شد. سپس، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن مطابق جدول ۱ اندازه‌گیری شد.

از سامانه فراصوت، به دلیل سرعت بالای واکنش با توان نامی ۴۰۰ وات و فرکانس ۲۴ کیلوهرتز (Hielscher, Germany)، برای انجام واکنش ترانس استریفیکاسیون بازی در این پژوهش استفاده شد. همچنین، از یک پروب میله‌ای به قطر ۱۴ میلی‌متر و رآکتور شیشه‌ای دوجداره به قطر ۶۳ میلی‌متر و ارتفاع ۱۱۰ میلی‌متر برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد. طول موثر پروب برای انجام آزمایش در داخل محلول سوخت ۵۵ میلی‌متر بود. دمای واکنش به کمک آبی که بین دو جداره رآکتور در گردش بود بر روی 45 ± 1 درجه سلسیوس تنظیم شد و تمامی آزمایش‌ها در فشار اتمسفر انجام گرفت [۳۴]. کلیه مراحل استخراج، استریفیکاسیون و تجزیه در پژوهشکده انرژی‌های تجدیدپذیر دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. در نهایت، بیودیزل روغن کرچک، با درصد خلوص متیل استر ۳۷/۵ تا ۸۷/۷ در سه سطح زمان واکنش (۱، ۳ و ۹ دقیقه) با کاتالیزور پتاسیم هیدروکسید (KOH)، با غلظت ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزنی روغن به دست آمد. نمونه‌ای از نمودار حاصل از دستگاه کروماتوگراف گازی در زمان واکنش ۹ دقیقه، دمای 60°C و در حضور کاتالیزور با غلظت ۲ درصد وزنی در شکل ۱ آورده شده است.

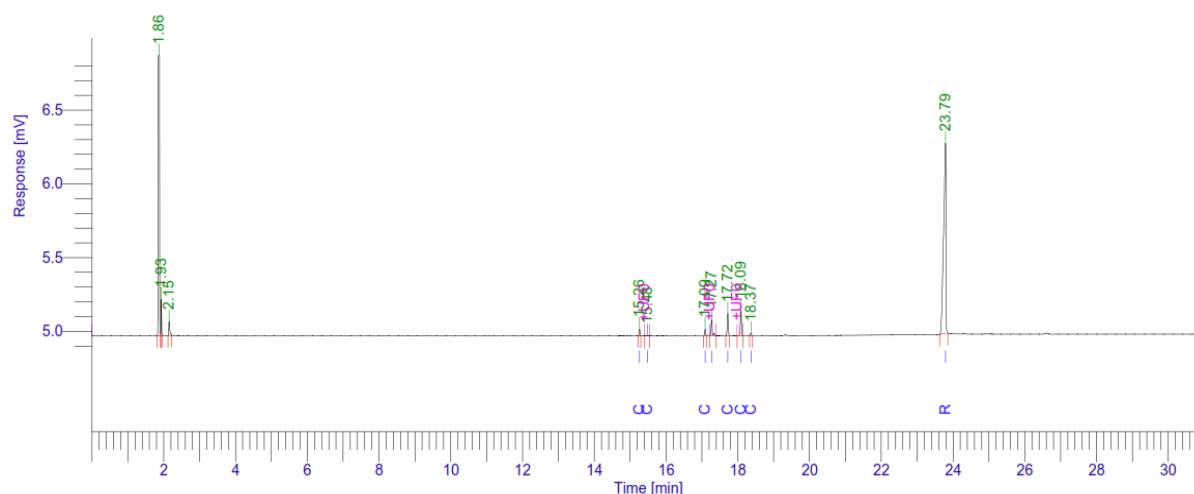


Figure 1- Biodiesel GC graph at 60 °C, 63 min and 2% catalyst

شکل ۱- نمودار آنالیز GC نمونه بیودیزل در دمای 60°C ، زمان واکنش ۹ دقیقه و غلظت کاتالیزور ۲٪ وزنی

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی روغن کرچک مورد استفاده

Table 1- Physical and chemical properties of the used castor oil

Properties	Unit	Test Method	Measured Value
Acid Value	mg KOH/ g oil	ASTM D664	0.83 ± 0.02
Density (15 °C)	g/cm^3	ASTM D1298	0.952 ± 0.001
Kinematic Viscosity (40 °C)	mm^2/s	ASTM D445	252.35 ± 3.11
Flash Point	$^\circ\text{C}$	ASTM D93	293 ± 1
Free Fatty Acid	%	ASTM D664	7.46 ± 0.01
Color	-	-	pale yellow
Mean Molecular Weight	g/mol	-	932

اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریک بیودیزل با استفاده از امواج مایکروویو

سامانه‌های بازتابش خطی شیاردار، خط انتقال هم محور اتصال کوتاه، انتقال فضای آزاد، تشدید حفره پر شده و سامانه بازتابش خط هم‌محور، جهت اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریک مواد مختلف به کار برده می‌شوند [۳۵]. از آنجایی که تلفات دی‌الکتریک

برای مواد بیولوژیک خیلی بالاست ($\tan \delta \gg 0.1$)، در نتیجه برای افزایش دقت اندازه‌گیری سه سامانه هم‌محور اتصال کوتاه، انتقال فضای آزاد و بازتابش پروب برای اندازه‌گیری استفاده می‌شوند [۳۰]. با توجه به ماهیت نمونه‌های آزمایشی (سوخت مایع)، استفاده از باند فرکانسی بالا، پایش و کنترل دما و دقت بالای اندازه‌گیری از سامانه بازتابش پروب برای اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریک (ϵ' ، ثابت دی‌الکتریک و ϵ'' ، فاکتور اتلاف) استفاده شد.

در شکل ۲، اجزای اصلی سامانه بازتابش پروب برای اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریک شامل تحلیلگر شبکه، دهانه تحلیلگر شبکه، کابل هم‌محور و پروب بازتابش نشان داده شده است. برای آزمون‌های خواص دی‌الکتریک از دستگاه تحلیلگر شبکه مدل (Agilent ENA series E5071C, USA) در محدوده فرکانسی بین ۱۰ kHz تا ۴/۵ GHz با دقت اندازه‌گیری ± 0.2 dB استفاده شد. در این تحقیق، از فرکانس ۲۴۵۰ MHz و دمای (۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه سلسیوس) برای اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریک بیودیزل استفاده شد. برای کالیبراسیون دستگاه تحلیلگر شبکه در فرکانس‌های میکروویو از سه استاندارد اتصال کوتاه، اتصال باز و بار مرجع استفاده شد [۳۶]. برای انجام این کار از قطعات استاندارد، که توسط کارخانه سازنده تهیه و در قالب کیت‌های کالیبراسیون ارائه می‌شود، استفاده شد. کالیبراسیون دستگاه اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریک به‌صورت دستی توسط کیت‌های استاندارد میکروویو انجام شد که به‌صورت تطبیق مقادیر اندازه‌گیری شده مایع مرجع (آب، اتانول) با مقادیر استاندارد است. خروجی تحلیلگر شبکه به‌صورت دامنه و فاز است که مقادیر دامنه و فاز خروجی اندازه‌گیری شده با بهره‌گیری از الگوریتم‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در نرم‌افزار CST Studio Suite به مقادیر دی‌الکتریک متناظر تبدیل شدند. آزمون خواص دی‌الکتریک نمونه‌های سوخت با امواج میکروویو در آزمایشگاه آنتن و امواج رادیویی مرکز تحقیقات مخابرات ایران انجام شد.

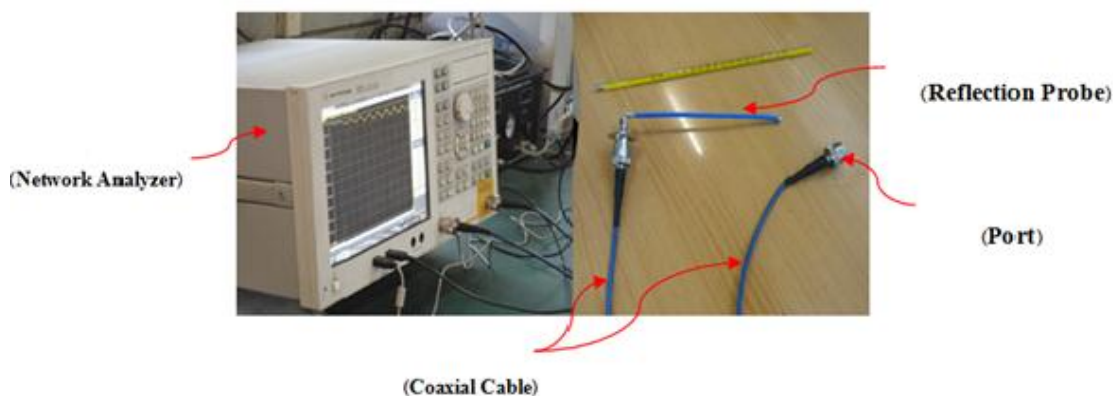


Figure 2- Probe reflection system for measuring the permittivity properties of castor biodiesel
شکل ۲- سامانه بازتابش پروب برای اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریک بیودیزل کرچک

محاسبات آماری

تحلیل آماری داده‌ها و رسم نمودارها توسط نرم‌افزارهای SPSS 24 و Excel انجام شد. در این تحقیق، برای بررسی اثر متغیرهای آزمایش بر روی خواص دی‌الکتریک، از آزمون فاکتوریل برپایه طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. در نهایت، از روش آزمون چنددامنه‌ای دانکن برای مقایسه میانگین داده‌ها استفاده شد.

نتایج و بحث

پس از تولید بیودیزل کرچک با استفاده از سامانه فراصوت، نمونه‌های آزمایشی سوخت تحت شرایط مختلف تولید برای اندازه‌گیری خواص دی‌الکتریک آماده شدند.

ثابت دی الکتریک

نتایج تجزیه واریانس برای مقادیر مختلف ثابت دی الکتریک در جدول ۲ آورده شده است. در این جدول، تمامی اثرات اصلی (زمان واکنش (R)، غلظت کاتالیزور (C) و دما (T)) و اثر متقابل $T \times R$ در سطح احتمال ۱ درصد بر روی مقادیر مختلف ثابت دی الکتریک از لحاظ آماری معنی دار بودند. همچنین، مشاهده شد که اثرات متقابل $C \times R$ ، $T \times C$ و $T \times C \times R$ معنی دار نیستند. طبق مقادیر F، همان طور که مشاهده می شود، تاثیر زمان واکنش بر میزان ثابت دی الکتریک بیشتر از دما و تاثیر دما بیشتر از غلظت کاتالیزور است، به طوری که تاثیر زمان واکنش، دما و غلظت کاتالیزور بر میزان ثابت دی الکتریک به ترتیب حدود ۸۸٪، ۹٪ و ۳٪ به دست آمد. شکل ۳ مقایسه میانگین داده های ثابت دی الکتریک برای اثر غلظت کاتالیزور است. همان طور که مشاهده می شود، میانگین مقادیر ثابت دی الکتریک بیودیزل کرچک در غلظت های مختلف کاتالیزور نسبت به یکدیگر اختلاف معنی داری دارند. در غلظت کاتالیزور ۱ درصد، بیشترین مقدار ثابت دی الکتریک به میزان ۳/۱۶ و در غلظت کاتالیزور ۲ درصد، کمترین آن به میزان ۳/۰۳ به دست آمد. با افزایش مقدار غلظت کاتالیزور حین فرایند تولید در مخلوط سوخت، قابلیت گزردگی امواج مایکروویو به خاطر افزایش خاصیت یونی به وجود آمده بهبود یافته و در نتیجه میزان عایقی (دی- الکتریک) سوخت کاهش می یابد [۲۷].

جدول ۲- تجزیه واریانس مقادیر مختلف ثابت دی الکتریک بیودیزل کرچک

Table 2- Analysis of Variance of dielectric constant of castor biodiesel

S.V	df	S.S	M.S	F
R	2	8.123	4.062	40615.45**
C	2	0.220	0.11	1102.11**
T	2	0.540	0.27	2700.11**
$R \times C$	4	0.001	0.0001	2.11 ^{ns}
$R \times T$	4	0.008	0.002	19.11**
$C \times T$	4	0.0001	0.0001	0.778 ^{ns}
$R \times C \times T$	8	0.0001	0.0001	0.528 ^{ns}
Error	54	0.005	0.0001	
Total	81	784.335		
C.V	11%			

**: Significant at probability of 1% .
^{ns}: Non significant.
 R, C and T are as Reaction time, Catalyst concentration and Temperature, respectively.
 S.S and M.S are as Sum of Square and Mean of Square, respectively.
 S.S and M.S are as Sum of Square and Mean of Square, respectively.

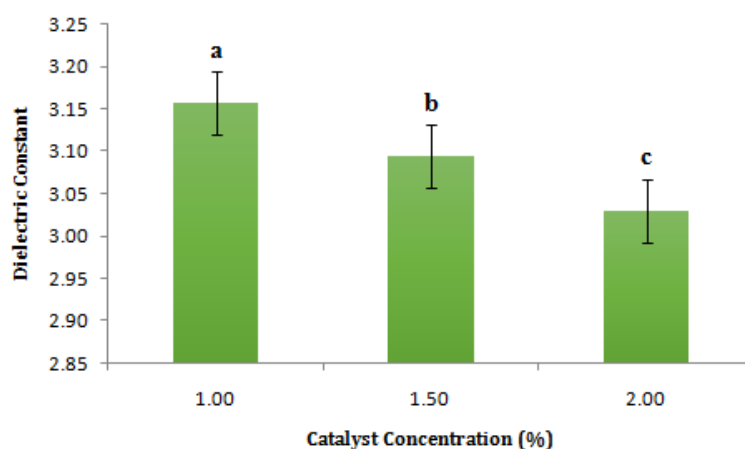


Figure 3- Mean comparison of the catalyst concentration effect on the dielectric constant

شکل ۳- مقایسه میانگین اثر غلظت کاتالیزور بر ثابت دی الکتریک

جدول ۳ مقایسه میانگین داده‌های ثابت دی‌الکتریک، برای اثر متقابل زمان واکنش و دماست. با توجه به جدول ۳، همه ترکیب‌های زمان واکنش و دما نسبت به یکدیگر اختلاف معنی‌داری دارند. بیشترین مقدار ثابت دی‌الکتریک در زمان واکنش ۹ دقیقه و دمای 30°C و کمترین آن در زمان واکنش ۱ دقیقه و دمای 60°C به ترتیب به میزان $3/54$ و $2/56$ به دست آمد. با افزایش زمان واکنش، ضریب تبدیل روغن به بیودیزل (متیل استر) افزایش می‌یابد. با افزایش ضریب تبدیل، به دلیل وجود گلیسرین آزاد و مولکول‌های با طول زنجیره‌های بلند کربن در ساختمان بیودیزل، هدایت الکتریکی سوخت کاهش می‌یابد. در نتیجه خاصیت دی‌الکتریک آن افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش دما، انرژی منتقل شده به مولکول‌های سوخت افزایش یافته و در نتیجه هدایت الکتریکی آن تسهیل می‌شود. این امر منجر به کاهش مقدار ثابت دی‌الکتریک می‌شود [۲۶].

جدول ۳- اثر متقابل زمان واکنش و دما بر ثابت دی‌الکتریک

Table 3- Interaction effect of reaction time and temperature on dielectric constant

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Reaction time (min)		
	1	3	9
30	$2.793 \pm 0.06^{\text{a}}$	$3.253 \pm 0.05^{\text{d}}$	$3.537 \pm 0.04^{\text{a}}$
45	$2.677 \pm 0.05^{\text{h}}$	$3.160 \pm 0.04^{\text{e}}$	$3.443 \pm 0.05^{\text{b}}$
60	$2.560 \pm 0.07^{\text{i}}$	$3.073 \pm 0.06^{\text{f}}$	$3.350 \pm 0.07^{\text{c}}$
The mean values with common letter do not have significant difference			

مدل‌های پیش‌بینی ثابت دی‌الکتریک بیودیزل کرچک

شکل ۴ تأثیر فاکتور غلظت کاتالیزور بر میزان ثابت دی‌الکتریک بیودیزل کرچک را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، با افزایش غلظت کاتالیزور تا ۲ درصد، مقدار ثابت دی‌الکتریک تا $4/11$ درصد کاهش می‌یابد. در جدول ۴، مدل‌های رگرسیونی ثابت دی‌الکتریک بیودیزل کرچک برحسب زمان واکنش در سطوح مختلف دما آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش دما شیب تغییرات ثابت دی‌الکتریک نسبت به زمان واکنش افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، با افزایش دما، مقادیر ثابت دی‌الکتریک با سرعت بیشتری نسبت به زمان واکنش تغییر می‌کنند. از آنجا که همزمان با افزایش انرژی جنبشی و تکانه زاویه‌ای مولکول‌های بیودیزل ضریب تبدیل روغن کرچک به متیل استر نیز افزایش می‌یابد، مقادیر ثابت دی‌الکتریک تغییرات قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهند [۳۱].

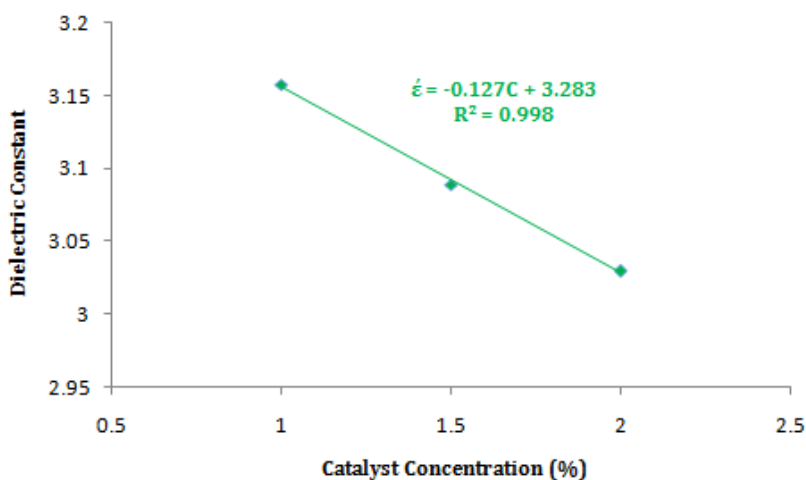


Figure 4- Changes in dielectric constant values at various catalyst concentrations

شکل ۴- تغییرات مقادیر ثابت دی‌الکتریک در غلظت‌های مختلف کاتالیزور

جدول ۴- مدل‌های رگرسیونی ثابت دی‌الکتریک برحسب زمان واکنش در سطوح مختلف دما

Table 4- Regression models of dielectric constant based on reaction time at different temperature levels

Temperature (°C)	Regression Models	R ²
30	$\epsilon = 0.338 \ln(R) + 2.822$	0.981
45	$\epsilon = 0.348 \ln(R) + 2.71$	0.977
60	$\epsilon = 0.359 \ln(R) + 2.599$	0.971

فاکتور اتلاف دی‌الکتریک

نتایج تجزیه واریانس برای مقادیر مختلف فاکتور اتلاف دی‌الکتریک در جدول ۵ آورده شده است. در این جدول، تمامی اثرات اصلی و اثر متقابل $C \times R$ در سطح احتمال ۱٪ بر روی مقادیر مختلف فاکتور اتلاف دی‌الکتریک معنی‌دار بود. همچنین، مشاهده شد که اثرات متقابل $T \times R$ و $T \times C$ در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار است و اثر سه‌گانه $T \times C \times R$ معنی‌دار نیست. برطبق مقدار F جدول، همان‌طور که مشاهده می‌شود، تاثیر زمان واکنش بر میزان فاکتور اتلاف دی‌الکتریک بیشتر از غلظت کاتالیزور و تأثیر غلظت کاتالیزور بیشتر از دماست، به‌طوری که تاثیر زمان واکنش، غلظت کاتالیزور و دما بر میزان فاکتور اتلاف دی‌الکتریک به‌ترتیب حدود ۵۸٪، ۲۸٪ و ۱۴٪ به‌دست آمد.

جدول‌های ۶ تا ۸ مقایسه میانگین اثر متقابل متغیرها (زمان واکنش، غلظت کاتالیزور و دما) بر فاکتور اتلاف دی‌الکتریک بیودیزل کرچک را نشان می‌دهد.

جدول ۵- تجزیه واریانس مقادیر فاکتور اتلاف دی‌الکتریک بیودیزل کرچک

Table 5- Analysis of Variance of loss factor of castor biodiesel

S.V	df	S.S	M.S	F
R	2	0.980	0.490	4898.78**
C	2	0.448	0.224	2241.44**
T	2	0.206	0.103	1030.11**
$R \times C$	4	0.004	0.001	10.78**
$R \times T$	4	0.001	0.0001	3.44*
$C \times T$	4	0.001	0.0001	3.11*
$R \times C \times T$	8	0.001	0.0001	0.694 ^{ns}
Error	54	0.005	0.0001	
Total	81	35.792		
C.V	22%			

**,*, Significant at probability of 1 and 5%, respectively.
^{ns}: Non significant.
R, C and T are as Reaction time, Catalyst concentration and Temperature, respectively.
S.S and M.S are as Sum of Square and Mean of Square, respectively.

جدول ۶- اثر متقابل زمان واکنش و غلظت کاتالیزور بر فاکتور اتلاف دی‌الکتریک

Table 6- Interaction effect of reaction time and catalyst concentration on loss factor

Catalyst concentration (%)	Reaction time (min)		
	1	3	9
1	0.400±0.05 ^h	0.600±0.07 ^f	0.673±0.04 ^e
1.5	0.493±0.06 ^g	0.697±0.06 ^d	0.760±0.05 ^c
2	0.600±0.05 ^f	0.787±0.04 ^b	0.833±0.06 ^a

The mean values with common letter do not have significant difference.

با توجه به جدول ۶، همه ترکیب‌های زمان واکنش و غلظت کاتالیزور، به‌جز تیمارهای زمان واکنش ۳ دقیقه-غلظت کاتالیزور ۱٪ و زمان واکنش ۱ دقیقه-غلظت کاتالیزور ۲٪، نسبت به یکدیگر اختلاف معنی‌داری دارند. بیشترین مقدار فاکتور اتلاف دی‌الکتریک در زمان واکنش ۹ دقیقه و غلظت کاتالیزور ۲٪ و کمترین آن در زمان واکنش ۱ دقیقه و غلظت کاتالیزور

۱٪ به ترتیب به میزان ۰/۸۳۳ و ۰/۴ به دست آمد. با افزایش زمان واکنش، ضریب تبدیل روغن به بیودیزل (متیل استر) افزایش می یابد و در نتیجه خاصیت دی الکتریک آن افزایش می یابد. همچنین، افزایش غلظت کاتالیزور نیز به تبدیل بیشتر روغن به زنجیره های بلند کربنی متیل استر کمک می کند که موجب افزایش مقدار فاکتور اتلاف دی الکتریک می شود [۲۶].

جدول ۷- اثر متقابل زمان واکنش و دما بر فاکتور اتلاف دی الکتریک

Table 7- Interaction effect of reaction time and temperature on loss factor

Temperature (°C)	Reaction time (min)		
	1	3	9
30	0.437±0.06 ^g	0.623±0.05 ^d	0.697±0.06 ^c
45	0.503±0.05 ^f	0.700±0.07 ^c	0.757±0.05 ^b
60	0.553±0.07 ^e	0.760±0.05 ^b	0.813±0.06 ^a
The mean values with common letter do not have significant difference.			

همان طور که مشاهده می شود، طبق جدول ۷، همه ترکیب های زمان واکنش و دما، به جز تیمارهای زمان واکنش ۹ دقیقه-دمای ۴۵ °C و زمان واکنش ۳ دقیقه و دمای ۶۰ °C و زمان واکنش ۹ دقیقه-دمای ۳۰ °C و زمان واکنش ۳ دقیقه و دمای ۴۵ °C نسبت، به یکدیگر اختلاف معنی داری دارند. بیشترین مقدار فاکتور اتلاف دی الکتریک در زمان واکنش ۹ دقیقه و دمای ۶۰ °C و کمترین آن در زمان واکنش ۱ دقیقه و دمای ۳۰ °C به ترتیب به میزان ۰/۸۱۳ و ۰/۴۳۷ به دست آمد. با افزایش زمان واکنش، ضریب تبدیل روغن به بیودیزل (متیل استر) افزایش می یابد و در نتیجه خاصیت دی الکتریک آن افزایش می یابد. همچنین، با افزایش دما، تعداد برخوردهای مولکول های سوخت در حجم مشخص افزایش می یابد که انرژی امواج عبوری را جذب کرده و موجب کاهش دامنه آن می شود. در نتیجه این امر، مقدار فاکتور اتلاف دی الکتریک افزایش می یابد [۲۶]. طبق جدول ۸، همه ترکیب های غلظت کاتالیزور و دما نسبت به یکدیگر اختلاف معنی داری دارند. بیشترین مقدار فاکتور اتلاف دی الکتریک در غلظت کاتالیزور ۲٪ و دمای ۶۰ °C و کمترین آن در غلظت کاتالیزور ۱٪ و دمای ۳۰ °C به ترتیب به میزان ۰/۷۹۳ و ۰/۴۹۳ به دست آمد. با افزایش غلظت کاتالیزور، میزان تبدیل روغن به بیودیزل افزایش یافته و در نتیجه مقدار فاکتور اتلاف دی الکتریک افزایش می یابد. همچنین، با افزایش دما، جذب انرژی امواج عبوری بیشتر شده و در نتیجه مقدار فاکتور اتلاف دی الکتریک افزایش می یابد [۲۶].

جدول ۸- اثر متقابل زمان واکنش و دما بر فاکتور اتلاف دی الکتریک

Table 8- Interaction of catalyst concentration and temperature on loss factor

Temperature (°C)	Catalyst concentration (%)		
	1	1.5	2
30	0.493±0.05 ⁱ	0.583±0.06 ^g	0.680±0.05 ^d
45	0.557±0.06 ^h	0.657±0.06 ^e	0.747±0.06 ^b
60	0.623±0.05 ^f	0.710±0.06 ^c	0.793±0.05 ^a
The mean values with common letter do not have significant difference.			

مدل های پیش بینی فاکتور اتلاف دی الکتریک بیودیزل کرچک

شکل های ۵ تا ۷ تأثیر متغیرهای مختلف بر میزان فاکتور اتلاف دی الکتریک را نشان می دهد. با توجه به این شکل ها، بیشترین میزان فاکتور اتلاف دی الکتریک در غلظت کاتالیزور ۲٪ و زمان واکنش ۹ دقیقه برای دمای ۶۰ °C و کمترین آن در غلظت کاتالیزور ۱٪ و زمان واکنش ۱ دقیقه برای دمای ۳۰ °C به ترتیب ۰/۸۸ و ۰/۳۴ به دست آمد. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش زمان واکنش و بیشتر شدن مقدار تبدیل روغن کرچک به بیودیزل آن، مقدار فاکتور اتلاف دی الکتریک افزایش می یابد. همچنین، با افزایش دما، این مقدار روند افزایشی را نشان می دهد.

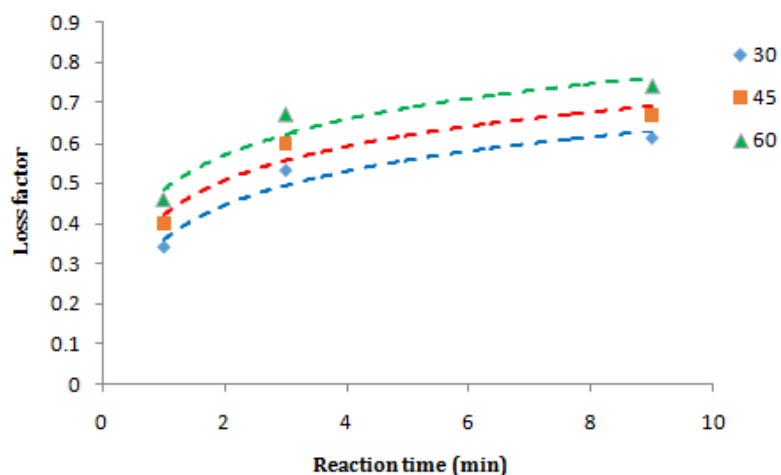


Figure 5- Changes in dielectric loss factor with 1% catalyst concentration at different reaction times and temperatures
 شکل ۵- تغییرات مقادیر فاکتور اتلاف دی الکتریک با غلظت کاتالیزور ۱٪ در زمان واکنش و دماهای مختلف

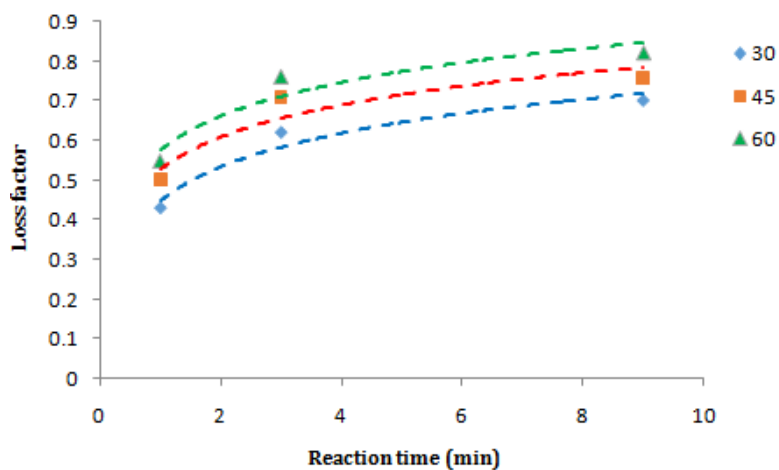


Figure 6- Changes in dielectric loss factor with 1.5% catalyst concentration at different reaction times and temperatures
 شکل ۶- تغییرات مقادیر فاکتور اتلاف دی الکتریک با غلظت کاتالیزور ۱/۵٪ در زمان واکنش و دماهای مختلف

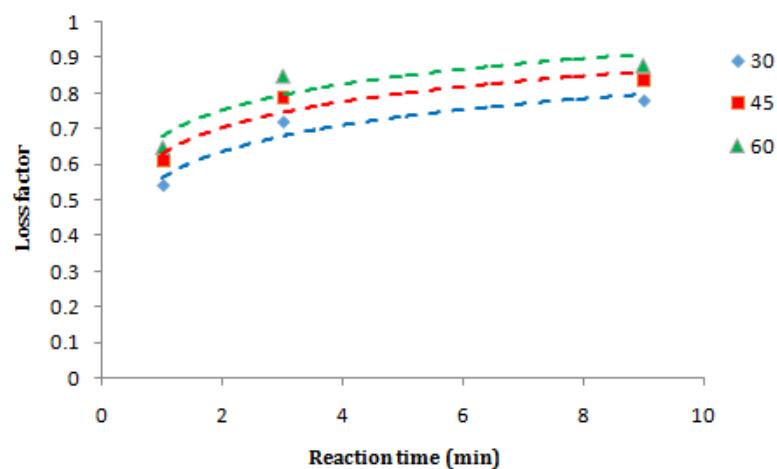


Figure 7- Changes in dielectric loss factor with 2% catalyst concentration at different reaction times and temperatures
 شکل ۷- تغییرات مقادیر فاکتور اتلاف دی الکتریک با غلظت کاتالیزور ۲٪ در زمان واکنش و دماهای مختلف

در جدول ۹، مدل‌های رگرسیونی میزان فاکتور اتلاف دی‌الکتریک بیودیزل کرچک برحسب زمان واکنش در سطوح مختلف غلظت کاتالیزور و دما آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در غلظت کاتالیزور ۱٪، با افزایش دما، شیب تغییرات فاکتور اتلاف دی‌الکتریک نسبت به زمان واکنش افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، با افزایش دما، مقادیر فاکتور اتلاف دی‌الکتریک با سرعت بیشتری نسبت به زمان واکنش تغییر می‌کنند، ولی در غلظت کاتالیزور ۲٪ این روند به صورت کاهشی است. از آنجا که همزمان با افزایش انرژی جنبشی مولکول‌های بیودیزل ضریب تبدیل روغن کرچک به متیل استر نیز افزایش می‌یابد، با افزایش غلظت کاتالیزور، خاصیت یونی مخلوط سوخت افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه سرعت تغییرات مقادیر فاکتور اتلاف دی‌الکتریک کاهش پیدا می‌کند [۳۲].

جدول ۹- مدل‌های رگرسیونی فاکتور اتلاف برحسب زمان واکنش در سطوح مختلف غلظت کاتالیزور و دما

Table 9- Regression models of loss factor based on reaction time at different catalyst concentration and temperature levels

Catalyst concentration (%)	Temperature (°C)	Regression Models	R ²
1	30	$\epsilon'' = 0.122 \ln(R) + 0.358$	0.947
	45	$\epsilon'' = 0.122 \ln(R) + 0.421$	0.928
	60	$\epsilon'' = 0.127 \ln(R) + 0.483$	0.923
1.5	30	$\epsilon'' = 0.122 \ln(R) + 0.448$	0.947
	45	$\epsilon'' = 0.118 \ln(R) + 0.526$	0.887
	60	$\epsilon'' = 0.122 \ln(R) + 0.575$	0.906
2	30	$\epsilon'' = 0.109 \ln(R) + 0.56$	0.923
	45	$\epsilon'' = 0.104 \ln(R) + 0.631$	0.903
	60	$\epsilon'' = 0.104 \ln(R) + 0.678$	0.845

نتیجه‌گیری

نتایج حاکی از آن است که تمام پارامترهای مستقل (زمان واکنش، غلظت کاتالیزور و دما) و اثر متقابل زمان واکنش و دما اثر معنی‌داری ($p < 0.01$) بر روی مقادیر مختلف ثابت دی‌الکتریک دارند و تأثیر زمان واکنش بر میزان ثابت دی‌الکتریک بیشتر از دما و تأثیر دما بیشتر از غلظت کاتالیزور به دست آمد. همچنین، نتایج داده‌های مقادیر ثابت دی‌الکتریک نشان داد که با افزایش دما، ثابت دی‌الکتریک کاهش و با افزایش زمان واکنش، ثابت دی‌الکتریک افزایش پیدا می‌کند. همچنین، همه اثرات اصلی و متقابل دوگانه برای فاکتور اتلاف دی‌الکتریک معنی‌دار شد، به طوری که تأثیر زمان واکنش بر میزان فاکتور اتلاف دی‌الکتریک بیشتر از غلظت کاتالیزور و تأثیر غلظت کاتالیزور بیشتر از دما به دست آمد. نتایج داده‌های مقادیر فاکتور اتلاف دی‌الکتریک نشان داد که با افزایش غلظت کاتالیزور، دما و زمان واکنش، فاکتور اتلاف دی‌الکتریک افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده از این تحقیق می‌تواند جهت پیش‌بینی ویژگی‌های کیفی بیودیزل در شرایط مختلف تولید مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

1. B. Ghobadian, "A Comprehensive Review of the Biodiesel Production and Purification Technologies in Iran," *Second International Congress on Biodiesel: The Science and Technologies*, Munich, Germany, November 2009.
2. B. Ghobadian and H. Rahimi, "Biofuels: Past, Present and Future Perspective," *Fourth International Iran and Russia Conference*, Shahrekord, Iran, September 2004.
3. H. Fukuda, A. Kondo and H. Noda, "Biodiesel Fuel Production by Transesterification of Oils," *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 92, 2001, pp. 405-416.
4. M. Ijaz, Kh.H. Bahtti, Z. Anwar, U. F. Dogar and M. Irshad, "Production, Optimization and Quality Assessment of Biodiesel from Ricinus Communis l. Oil," *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 9, 2016, pp. 180-184.
5. M. Balat and H. Balat, "A Critical Review of Bio-Diesel as a Vehicular Fuel," *Energy Conversion and Management*, 49, 2008, pp. 2727-2741.
6. Hu. Shengyang, Y. Guan, Y. Wang and H. Han, "Nanomagnetic catalyst KF/CaO-Fe₃O₄ for biodiesel production," *Applied Energy*, 88, 2011, pp. 2685-2690.

7. G. Karavalakis, G. Anastopoulos and S. Stournas, "Tetramethylguanidine as an efficient catalyst for transesterification of waste frying oils," *Applied Energy*, 88, 2011, pp. 3645-3650.
8. M. Kee Lam, K. Teong Lee and A. R. Mohamed, "Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: A review," *Biotechnology Advances*, 28, 2010, pp. 500-518.
9. L. Pboey, G. Pragas Maniama and S. Abd Hamid, "Performance of calcium oxide as a heterogeneous catalyst in biodiesel production: A review," *Chemical Engineering Journal*, 168, 2011, pp. 15-22.
10. D. Zuo, J. Lane, D. Culy, M. Schultz, A. Pullar and M. Waxman, "Sulfonic acid functionalized mesoporous SBA-15 catalysts for biodiesel production," *Applied Catalysis B: Environmental*, 129, 2013, pp. 342-350.
11. K. Hee Kay and S. Md Yasir, "Biodiesel Production from Low Quality Crude Jatropha Oil using Heterogeneous Catalyst," *APCBEE Procedia*, 3, 2014, pp. 23-27.
12. W. Haitang, J. Zhang, Q. Wei, J. Zheng and J. Zhang, "Transesterification of soybean oil to biodiesel using zeolite supported CaO as strong base catalysts," *Fuel Processing Technology*, 109, 2013, pp. 13-18.
13. G. Chen and B. Fang, "Preparation of solid acid catalyst from glucose-starch mixture for biodiesel production," *Bioresource Tech.*, 102, 2011, pp. 2635-2640.
14. M. Kouzua, A. Nakagaito and J. Hidaka, "Preesterification of FFA in plant oil transesterified into biodiesel with the help of solid acid catalysis of sulfonated cation-exchange resin," *Applied Catalysis A: General*, 405, 2011, pp. 36-44.
15. M. E. Borges and L. Diaz, "Recent developments on heterogeneous catalysts for biodiesel production by oil esterification and transesterification reactions: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2012, pp. 2839-2849.
16. Y. Wang, F. Zhang, S. Xu, L. Yang, L. Dianqing, D. G. Evans and D. Xue, "Preparation of macrospherical magnesia-rich magnesium aluminate spinel catalysts for methanolysis of soybean oil," *Chem. Eng. Science*, 63, 2008, pp. 4306-4312.
17. E. Viola, A. Blasi, V. Valerio, I. Guidi, F. Zimbardi, G. Braccio and G. Giordano, "Biodiesel from fried vegetable oils via transesterification by heterogeneous catalysis," *Catalysis Today*, 179, 2012, pp. 185-190.
18. P. A. Soares Dias, J. Bernardo, P. Felizardo and J. M. Neiva Correia, "Biodiesel production by soybean oil methanolysis over SrO/MgO catalysts The relevance of the catalyst granulometry," *Fuel Processing Tech.*, 102, 2012, pp. 146-155.
19. Qiu. Fengxian, Li. Yihuai, D. Yang, Li. Xiaohua and S. Ping, "Heterogeneous solid base nanocatalyst: Preparation, characterization and application in biodiesel production," *Bioresource Technology*, 102, 2011, 4150-4156.
20. M. E. Borges and L. Diaz, "Recent developments on heterogeneous catalysts for biodiesel production by oil esterification and transesterification reactions: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2012, pp. 2839-2849.
21. A. P. Singh Chouhan and A. K. Sarma, "Modern heterogeneous catalysts for biodiesel production: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2011, pp. 4378-4399.
22. N. Viriya-empikul, P. Krasae, W. Nualpaeng, B. Yoosuk and K. Faungnawakij, "Biodiesel production over Cabased solid catalysts derived from industrial wastes," *Fuel*, 92, 2012, pp. 239-244.
23. P. Nair, B. Singh, S. N. Upadhyay and Y. C. Sharma, "Synthesis of biodiesel from low FFA waste frying oil using calcium oxide derived from Meretrix meretrix as a heterogeneous catalyst," *Journal of Cleaner Production*, 29, 2012, pp. 82-90.
24. P. C. Lew, K. Hemanathan and P. Z. Vasudeo, "Enzymatic biodiesel: Challenges and opportunities," *Applied Energy*, 119, 2014, pp. 497-520.
25. M. Hajar, S. Shokrollahzadeh, F. Vahabzadeh and A. Monazzami, "Solvent-free methanolysis of canola oil in a packed-bed reactor with use of Novozym 435 plus loofa," *Enzyme and Microbial Tech.*, 45, 2009, pp. 188-194.
26. D. P. Muley and D. Boldor, "Investigation of Microwave Dielectric Properties of Biodiesel Components," *Bioresource Technology*, 127, 2013, pp. 165-174.
27. R. M. Balabin, E. I. Lomakina and R. Z. Safieva, "Artificial Neural Network (ANN) Approach to Biodiesel Analysis: Analysis of Biodiesel Density, Kinematic Viscosity, Methanol and Water Contents using Near Infrared (NIR) Spectroscopy," *Fuel*, 90, 2011, pp. 2007-2015.
28. M. E. Tat and J. H. Van Gerpen, "Biodiesel Blend Detection with a Fuel Composition Sensor," *Applied Engineering Agriculture*, 19, 2003, pp. 125-131.
29. A. Biswas, A. Adhvaryu, D. G. Stevenson, B. K. Sharma, J. L. Willet and S. Z. Erhan, "Microwave Irradiation Effects on the Structure, Viscosity, Thermal Properties and Lubricity of Soybean oil," *Industrial Crops and Products*, 25, 2007, pp. 1-7.
30. M. Zarein, *Dielectric Constant Measuring of Potato using Microwave*, MSc Thesis, Mechanical & Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, 2012. (In Persian)
31. S. O. Nelson, "Dielectric Spectroscopy in Agriculture," *Journal of Non-Crystalline Solids*, 351, 2005, pp. 2940-2944.
32. S. O. Nelson, W. Guo and S. Trabelsi, "Investigation of Dielectric Sensing for Fruit Quality Determination," *IEEE Sensors Applications Symposium*, Atlanta, USA, 2008.
33. J. Cheeke and N. Davis, *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*, Second Edition, Florida, CRC Press, 2002.
34. E. Fayyazi, *Biodiesel Fuel Production using Ultrasonic System*, MSc Thesis, Mechanical & Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, 2012. (In Persian)
35. M. S. Venkatesh and G. S. V. Raghavan, "An Overview of Dielectric Properties Measuring Techniques," *Canadian Biosystem Engineering*, 47, 2005, pp. 15-30.
36. D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Fourth Edition, Wiley, Massachusetts, 2005.

English Abstract

Study and Evaluation Dielectric Properties of Castor-based Biodiesel Using Microwave

Mohammad Zarein¹, Mohammad Hadi Khoshtaghaza^{2*}, Barat Ghobadian³ and Hossein Ameri Mahabadi⁴

1- Mechanical & Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
m.zarein@modares.ac.ir

2- Mechanical & Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
khoshtag@modares.ac.ir

3- Mechanical & Biosystems Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
ghobadib@modares.ac.ir

4- Electrical Engineering Department, Iran Telecommunication Research Center (ITRC), Tehran, Iran.
ameri@ieee.org

*Corresponding author

(Received: 2018.01.29, Received in revised form: 2018.06.30, Accepted: 2018.08.01)

The tendency toward research on the production and application of renewable energy, such as biodiesel, to reduce greenhouse gases and emissions of fossil fuels, is one of the most important issues in the world policies which has been discussed. Dielectric properties (ϵ' , dielectric constant and ϵ'' , dielectric loss factor) of materials play a major role in the microwave design and process of biodiesel production. The purpose of this research is to investigate and evaluate the biodiesel's dielectric properties in a pilot-scale using microwave technology and the relationship between its various effective parameters. In this study, the effects of reaction time (1, 3 and 9 minutes), catalyst concentration (1, 1.5 and 2% of oil weight) and temperature changes (30, 45 and 60°C) were studied. The probe reflection system was used at a frequency of 2450 MHz to measure the dielectric properties. The results showed that, with increasing reaction time and decreasing temperature, the dielectric constant values increased, and by decreasing catalyst concentration, temperature and reaction time, the dielectric loss factor decreased.

Keywords: Castor Biodiesel, Production Process, Dielectric Properties, Frequency, Catalyst