

ارزیابی ارزش حرارتی سوخت زیستی تولیدی از سامانه هیبرید خورشیدی-دیزل زیستی در شرایط مختلف آب‌وهوایی به کمک روش برخط دی‌الکترونیک

علیرضا زاهدی^{*}، اردشیر شایان‌نژاد^۲ و مهدی رشوند^۳

۱- استادیار، مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه علم‌و‌صنعت ایران، تهران، zahedi@iust.ac.ir

۲- کارشناس ارشد، مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه علم‌و‌صنعت ایران، تهران، ardilamkehchi@yahoo.com

۳- کارشناس ارشد، بیومکانیک، دانشگاه تهران، تهران، mahdi.rashvand.aveyi@gmail.com

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۹۷/۸/۱۴، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۷/۱۰/۱، پذیرش: ۹۷/۱۰/۲۳)

چکیده: با تغییر شرایط تولید بیودیزل ویژگی‌های این سوخت نظیر ارزش حرارتی تغییر می‌کند، اما ارزیابی هریک از خصوصیات بیودیزل با روش‌های معمول پرهزینه و وقت‌گیر است. هدف از این پژوهش ارزیابی یک سامانه نوین به‌منظور تشخیص ارزش حرارتی بیودیزل به کمک حسگر برخط دی‌الکترونیک در کمترین زمان و بیشترین دقت است. بیودیزل ترانس‌استریفیکاسیون روغن پالم به کمک گرمای اتلافی کلکتور خورشیدی سهموی-خطی تولید برق به‌علت تغییرات شرایط آب‌وهوایی در دماهای متفاوتی سنتز شد. علی‌رغم نصب سیستم کنترل دما برای سامانه هیبریدی کلکتور خورشیدی-بیودیزل، به‌علت نوسانات دمای محیط و افت دما، حتی تا زیر دمای تنظیم‌شده کنترلی امکان تثبیت دما وجود نداشت. به‌منظور بررسی ارزش حرارتی، ابتدا، چند نمونه بیودیزل در شرایط مختلف آب‌وهوایی توسط سامانه هیبریدی مذکور، به‌عنوان یکی از سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر، با هدف کاهش هزینه تولید و همچنین بررسی تغییرات بازده تولید شد. پس از آن، ارزش حرارتی نمونه‌ها محاسبه شد و سپس، نمونه‌ها طی سه مرحله مورد آزمون حسگر برخط دی‌الکترونیک قرار گرفت. پس از تحلیل داده‌ها، برای اعتبارسنجی تحلیل توسط تکنیک درخت تصمیم از سه نوع الگوریتم استفاده شد. با توجه به نتایج، روش درخت تصمیم و رگرسیون دارای بالاترین دقت (۹۹ درصد) در مقایسه با سایر روش‌ها بود. البته، با توجه به دقت روش‌ها که به هم نزدیک‌اند، تمامی تکنیک‌های انتخاب‌شده پتانسیل خوبی برای ارزیابی ویژگی‌های سوخت بیودیزل داشتند. نتایج حاکی از آن است که حسگر ساخته‌شده توانسته است ارزش حرارتی سوخت تولیدی را با دقت خوبی محاسبه کند.

کلیدواژه‌ها: بیودیزل، ارزش حرارتی، کلکتور خورشیدی، انرژی‌های تجدیدپذیر، دی‌الکترونیک

مقدمه

بیودیزل یک سوخت تجدیدپذیر، غیرسمی و بدون آروماتیک است که از منابع طبیعی و قابل تجدید مانند روغن‌های گیاهی تولید می‌شود. از این رو، در سال‌های اخیر، به‌دلیل مسائل زیست‌محیطی و قابلیت تجدیدپذیری سوخت‌های زیستی، تحقیقات وسیعی در راستای امکان جایگزینی بیودیزل به‌جای سوخت دیزل انجام گرفته است [۱]. قابلیت و محدوده عملکرد یکسان بیودیزل با دیزل امکان استفاده از آن را در موتورهای احتراق داخلی بدون هیچ‌گونه تغییری در این موتورها فراهم می‌کند. بیودیزل از نظر ساختار شیمیایی جزء استرها محسوب می‌شود. بیودیزل متیل استر یا اتیل استر روغن‌های گیاهی است که در اثر واکنش بین روغن با الکل در حضور یک کاتالیزور حاصل می‌شود [۲].

علت پاک‌بودن سوخت بیودیزل نسبت به دیزل وجود اکسیژن در ترکیب شیمیایی آن است که این امر باعث افت چگالی انرژی، به‌علت بالا‌بودن چگالی بیودیزل و به‌تبع آن کاهش ذرات معلق، می‌شود. در حالت کلی، ارزش حرارتی بیودیزل نسبت به دیزل کمتر است، اما ویژگی‌های دیگر از قبیل گرانبوی، چگالی، عدد ستان و نقطه اشتعال آن بیشتر است [۳]. این تغییرات به‌علت وجود اسیدهای چرب مختلف در بیودیزل است [۵،۴].

برای استفاده از بیودیزل به‌عنوان جایگزین دیزل باید خصوصیات آن تجزیه و تحلیل شود. در این میان، ارزش حرارتی یا ارزش گرمایی مهم‌ترین خصوصیت یک سوخت به‌شمار می‌رود. اگر ارزش حرارتی سوخت بالا باشد، توان ایجادشده در موتور بیشتر و اگر این مقدار کم باشد، باعث افت توان موتور و همچنین آلودگی هوا می‌شود. سوخت‌های مشابه معمولاً با ارزش حرارتی بالا و سوخت‌های غیرمشابه با ارزش حرارتی پایین با هم مقایسه می‌شوند. این موضوع به‌علت تفاوت در میزان هیدروژن موجود در این سوخت‌هاست [۶].

قیمت زیاد برای تولید یک لیتر سوخت بیودیزل انگیزه لازم برای استفاده از این سوخت به‌عنوان جایگزین دیزل را کاهش می‌دهد. به همین دلیل، محققان به‌دنبال راه‌هایی برای بهینه‌سازی تولید بیودیزل‌اند. تاکنون مطالعات بسیاری در مورد بهینه‌سازی فرایند تولید بیودیزل بر روی روغن‌های گیاهی صورت گرفته است [۷]، اما تحقیقات بر روی ارزیابی ارزش حرارتی سوخت زیستی برمبنای روش آنالین دی‌الکتریک تقریباً ناچیز است.

در مطالعات پیشین، محققان، به‌منظور کاهش زمان و هزینه ارزیابی ویژگی‌های بیودیزل، توانسته بودند به‌کمک مدل شبکه عصبی و مدل‌های ریاضی خصوصیات این سوخت مانند ارزش حرارتی و عدد ستان را براساس برخی دیگر از ویژگی‌های آن از قبیل چگالی و گرانبوی تعیین کنند. گیوا و همکاران عدد ستان، گرانبوی سینماتیکی، نقطه اشتعال و چگالی را به‌کمک شبکه عصبی محاسبه کردند و نشان دادند که مقادیر به‌دست‌آمده از تمام شبکه‌های استفاده‌شده به مقادیر واقعی بسیار نزدیک است [۸]. پیلیتو و همکاران نشان دادند که شبکه عصبی برای پیش‌بینی عدد ستان بیودیزل دقت بیشتری نسبت به رگرسیون خطی چندگانه دارد [۹]. همچنین، بسیاری از تحقیقات صحت تغییر خواص بیودیزل در شرایط مختلف واکنش را نشان می‌دهند. رشید و همکاران نشان دادند که تولید بیودیزل کلزا در شرایط مختلف ارزش حرارتی آن را تغییر می‌دهد. ارزش حرارتی بیودیزل حاصل از روغن‌های مختلف بین ۳۸ تا ۵۱ MJ/kg متغیر است [۱۰].

همچنین، مطالعاتی در مورد بررسی تکنیک‌های الکتریکی به‌منظور شناسایی مقدار بیودیزل موجود در مخلوط دیزل/بیودیزل صورت گرفت که ساختار آن‌ها براساس مقاومت سیال کار می‌کند. از این میان، روش استاندارد «طیف‌سنجی نیمه‌مادون قرمز با تبدیل فوریه» رایج‌ترین روش برای شناسایی محتوای بیودیزل در مخلوط دیزل/بیودیزل است که در سال‌های اخیر محققان بسیاری برای بهینه‌سازی و رفع محدودیت‌های این روش مطالعاتی انجام داده‌اند. طیف‌سنجی امپدانس یکی از روش‌های جایگزین و ارزان به‌شمار می‌رود. برای مثال، پکو و همکاران با استفاده از تکنیک طیف‌سنجی دی‌الکتریک میزان محتوای بیودیزل در مخلوط دیزل/بیودیزل را نشان دادند [۱۱]. در پژوهشی دیگر، پکو و همکاران نشان دادند که با طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی و گرانبوی می‌توان خواص دی‌الکتریک بیودیزل را شناسایی و ارزیابی کرد. آن‌ها تحقیقی بر روی خواص دی‌الکتریک سوخت‌های بیودیزل تولیدشده از روغن‌های نباتی متفاوت انجام دادند. در این تحقیق، روغن‌های گیاهی کلزا، سویا، آفتابگردان و ذرت مورد مطالعه قرار گرفتند. یافته‌ها حاکی از تغییرات شدید خاصیت دی‌الکتریک مواد با تغییرات گرانبوی بود [۱۲]. تیکسیرا و همکاران مدل‌های درجه‌بندی چندمتغیره براساس طیف‌سنجی مادون قرمز (نزدیک و میانی) را به‌منظور تعیین محتوای بیودیزل در مخلوط دیزل/بیودیزل توسعه دادند [۱۳].

کاروالهو و همکاران تحقیقی در زمینه ارزیابی کیفیت بیودیزل با استفاده از حسگر خازنی انجام دادند. آن‌ها، در این تحقیق، از بیودیزل سویا و برای صحت‌سنجی از دیزل S500 با ترکیب ۱-۹ درصد استفاده کردند. پس از ترکیب بیودیزل-دیزل

از یک دستگاه اندازه‌گیری ظرفیت خازن^۱ برای محاسبه برخط شاخص دی‌الکتریک استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق نشان داد دستگاه با ضریب همبستگی ۰/۹۹۲ و میانگین مربعات ۰/۰۰۲۳ دارای دقت بالایی است. بر این اساس، طیف‌سنجی دی‌الکتریک یک رویکرد تحلیلی جایگزین و قابل اطمینان برای تشخیص خواص مواد مختلف و نظارت بر خصوصیات برخی از سوخت‌های زیستی، مانند گرانروی و پارامترهای مرتبط مانند پروفیل‌های ساختاری اسید چرب، در سوخت‌های بیودیزل است. با توجه به تحقیقات انجام‌شده در زمینه خواص الکتریکی بیودیزل تنها به شاخص دی‌الکتریک بیودیزل حاصل از مواد مختلف و کیفیت مواد اشاره شده است. در این تحقیق، برای محاسبه ارزش حرارتی بیودیزل با استفاده از حسگر برخط خازنی آزمایش‌هایی صورت گرفت. استفاده از سامانه تولید سوخت زیستی با استفاده از گرمای اتلافی کالکتور خورشیدی سهموی-خطی تولید برق به‌منظور تامین دمای تولید بیودیزل برای اولین بار در دنیا در این تحقیق طراحی و راه‌اندازی شد. همچنین، به‌کارگیری روش ارزان و سریع استفاده از سامانه برخط تعیین ارزش حرارتی سوخت زیستی به‌کمک ضریب دی‌الکتریک تاکنون صورت نپذیرفته و کار مشابهی در این زمینه وجود ندارد. در این پژوهش، از روش دی‌الکتریک بدون به‌کارگیری دستگاه‌های پرهزینه امپدانس برای تخمین ارزش حرارتی در شرایط مختلف استفاده شد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌ها

در این تحقیق پنج نمونه بیودیزل از روغن پالم با روش ترنس‌استریفیکاسیون در شرایط دمایی مختلف محیط به‌کمک کلکتور خورشیدی تولید شدند. بیودیزل پالم، به‌علت ویژگی‌های منحصربه‌فرد روغن پالم، از کیفیت بهتری برخوردار است. به همین دلیل، در این پژوهش، از روغن پالم با HHV برابر با ۳۸/۹۹ (MJ/kg) و با ترکیب اسیدهای چرب به‌دست‌آمده از آزمون کروماتوگرافی گازی، که در جدول ۱ نشان داده شده، استفاده شد. فاکتورهای بهینه‌شده در تولید صنعتی بیودیزل پالم، که از پژوهش‌های پیشین به‌دست آمده‌اند، عبارت‌اند از: نسبت روغن به الکل ۱:۶، ۱/۵ درصد وزنی کاتالیزور، دور همزن ۴۰۰ دور بر دقیقه، دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد و یک‌ونیم ساعت زمان واکنش که برای تولید بیودیزل مینا برای کالیبره کردن سیستم دی‌الکتریک مورد استفاده قرار گرفت [۱۴]. درصد تبدیل از طریق جداسازی فاز آبی و گلیسیرین از بیودیزل پالم محاسبه شد. ارزش حرارتی هرکدام از نمونه‌ها براساس استاندارد D24 ASTM به روش کالریمتری با سه بار تکرار به‌دست آمد که مقادیر آن‌ها به‌همراه بازده تولید در جدول ۲ نشان داده شده است. به‌عبارت بهتر، متفاوت بودن ارزش حرارتی نمونه‌های مورد اشاره به‌دلیل عدم پیشرفت کامل واکنش ترانس‌استریفیکاسیون به‌خاطر تأمین نشدن دمای بهینه است؛ یعنی ترکیبات مورد آزمایش شامل متیل استر و روغن واکنش‌نداده است.

جدول ۱- مشخصات روغن پالم

Table 1- Properties of Palm oil

Fatty acids	Chemical formula	Percent, %
C 12:0	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	0.46
C 14:0	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	1.48
C 16:0	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	42.69
C 18:0	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	3.93
C 18:1	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	39.37
C 18:2	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	10.33
C 18:3	C ₁₈ H ₃₀ O ₂	0.39
C 20:0	C ₂₀ H ₄₀ O ₂	0.32
Other		1.03

1. Capacity detector
2. High Heat Value

جدول ۲- ارزش حرارتی واقعی و ارزیابی شده

Table 2- The real and evaluated amounts of heating value

Sample	Yield	Max temperature (°C)	Heat value (real) (MJ/kg)	Heat value (predicted) (MJ/kg)
1#	75	50	40.29	40.28
2#	66.1	۳۶	38.73	36.135
3#	71.6	۴۰	39.105	35.82
4#	75	۴۷	39.837	39.83
5#	74.7	55	41.33	41.3

کلکتور خورشیدی

در این پژوهش، به منظور تأمین گرمای واکنش تولید بیودیزل از گرمای اتلافی یک کالکتور سهموی-خطی تولید برق، با طول ۲ متر و عرض دهانه ۰/۷ متر، از جنس ورق استیل آینه‌ای با ضریب انعکاس ۰/۹ استفاده شد.

راکتور تولید بیودیزل

دمای مورد نیاز برای تولید بیودیزل به روش ترنس‌استریفیکاسیون براساس شرایط بهینه حدود ۵۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد [۱۶، ۱۵]، اما با توجه به شرایط محیطی و هدف پژوهش، این دما حاصل نشد و در هر آزمایش دمای متفاوتی با توجه به شرایط آب‌وهوایی توسط کلکتور خورشیدی برای تولید بیودیزل به دست آمد. همان‌طور که پیش از این عنوان شد، به منظور کاهش هزینه تولید بیودیزل برای مصارف نیروگاهی و همچنین دستیابی به اختلاف دمای مورد نظر برای ارزیابی خصوصیات بیودیزل، این حرارت از طریق کلکتور خورشیدی تأمین شد. به منظور انجام واکنش تولید بیودیزل، از یک راکتور دوجداره ۱/۵ لیتری حاوی کندانسور، ژاکت حرارتی با ورودی گاز نیتروژن همراه با کلکتور خورشیدی در فضای باز استفاده شد (شکل ۱). همچنین، برای اختلاط بهتر مواد موجود در محفظه انجام واکنش، از همزن مکانیکی با سرعت ۴۰۰ دور در دقیقه به مدت ۹۰ دقیقه استفاده شد.

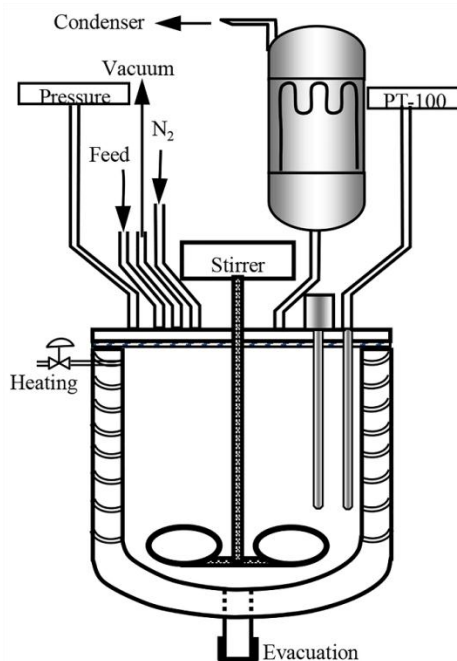


Figure 1- Reactor frame and accessories

شکل ۱- نمایشی از راکتور و تجهیزات جانبی

سیال گرم‌کننده از کلکتور خورشیدی با عبور از جداره بیرونی گرمای مورد نیاز واکنش تبادل استری را فراهم می‌کند. به‌منظور کنترل دمای واکنش و دبی جریان عبوری از راکتور، از یک شیر کنترلی دوراهه برقی به‌همراه کنترل‌کننده دما استفاده شد. شیر کنترلی دارای دو قسمت شامل بدنه اصلی شیر و محرک بود که محرک با دریافت فرمان از کنترلر، با ارسال آن به شیر تناسبی، باعث باز و بسته‌شدن شیر می‌شد. از آنجا که دمای سیال عامل کالکتور معمولاً بالاتر از دمای واکنش تبدیل روغن به بیودیزل (۵۵ درجه سانتی‌گراد) قرار داشت، استفاده از شیر کنترلی به‌منظور جلوگیری از افزایش دمای واکنش ضروری بود. لیکن، در صورت پایین‌آمدن دمای کالکتور از ۵۵ درجه سانتی‌گراد در شرایط نامساعد جوی دیگر امکان نگه‌داشتن دمای راکتور وجود نداشت.

سامانه ترکیبی خورشیدی-بیودیزل

سیستم هیبرید متشکل از کلکتور خورشیدی و راکتور تولید بیودیزل است. تولید بیودیزل به‌کمک سیستم هیبرید خورشیدی-بیودیزل دارای مزایای مهمی است. مهم‌ترین مزیت این سیستم کاهش هزینه تولید بیودیزل به‌منظور توسعه نیروگاهی است که مانع اصلی برای صنعتی‌شدن آن به‌شمار می‌رود. در سیستم هیبرید خورشیدی-بیودیزل، با تأمین حرارت مورد نیاز که بهینه‌شده آن ۵۵ درجه سانتی‌گراد است و همچنین، انرژی الکتریکی مورد نیاز برای سیستم برقی راکتور، هزینه تولید بیودیزل کاهش چشمگیری می‌یابد، به‌طوری که می‌توان هزینه اصلی تولید را هزینه مواد اولیه قلمداد کرد [۱۶]. در پژوهش زاهدی و همکاران گزارش شده است که در صورت استفاده از سامانه کالکتور خورشیدی به‌همراه پانل فوتوولتائیک (برای تأمین برق همزن و پمپ) و سامانه آب‌شیرین‌کن (برای تأمین فرایند آب‌شویی) تا ۲۸ درصد قیمت‌ها کاهش می‌یابد [۱۵]. قابل ذکر است که در صورت فعالیت کالکتور در دمایی بالاتر از دمای بهینه واکنش، کنترل دما به‌راحتی قابل تحقق بود. مزیت بعدی سیستم هیبرید، که بیشتر برای سامانه ارزیابی خصوصیات بیودیزل حائز اهمیت است، ارائه دماهای مختلف است که ارزش حرارتی بیودیزل را تغییر می‌دهد. بدین معنا که اختلاف دمای سیال داخل کالکتور و محیط باعث ایجاد تغییراتی در واکنش می‌شود که بر روی بازده و دیگر خصوصیات از قبیل ارزش حرارتی تأثیر می‌گذارد، زیرا در تمام فصول سال دمای محیط یکسان نیست. طرحواره سیستم هیبرید در شکل ۲ نشان داده شده است. به‌عبارت دیگر، دما مستقیماً و به خودی خود نمی‌تواند تأثیری روی ارزش حرارتی سوخت داشته باشد، زیرا ارزش حرارتی از سوختن ماده در داخل بمب کالری‌متر به‌دست می‌آید، مگر اینکه درصد متیل استرهای تولیدی کم یا زیاد باشد. هرچه دما کمتر از دمای بهینه باشد، در نتیجه بازده واکنش کمتر است و مقدار متیل استرهای تولیدشده کمتر است. لذا، ارزش حرارتی کمتر خواهد بود [۱۶].

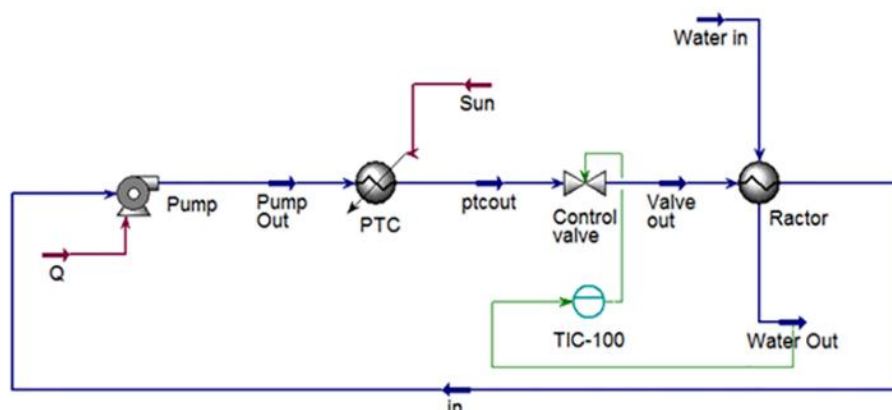


Figure 2- Schematic of hybrid system

شکل ۲- طرحواره سیستم هیبریدی

سامانه تست مشخصات سوخت

سامانه تست مشخصات سوخت مورد نظر از یک میکروکنترلر 16ATMEGA، مدار ولتاژ مستقیم، یک حسگر خازنی استوانه‌ای، مدار تولید سیگنال، گیرنده و فرستنده‌های سریال و صفحه نمایش ال‌سی‌دی ساخته شد. حسگر خازنی استوانه‌ای از ورق مسی به ضخامت ۰/۵ میلی‌متر و با ارتفاع ۵۰ میلی‌متر برای قرارگرفتن نمونه‌های سوخت تهیه شد. در قسمت سیگنال ژنراتور از تراشه MAX232 استفاده شد که یک سیگنال سینوسی شکل با فرکانس بالا تولید می‌کند. در این دستگاه، فرکانس خروجی، که در محدوده ۲۰ کیلوهرتز تا ۲۰ مگاهرتز بود، با استفاده از یک مقاومت خارجی و یک خازن متغیر کنترل می‌شود. به‌منظور اندازه‌گیری پارامترهای دی‌الکتریک شامل اختلاف فاز و میزان ضریب میرایی از تراشه AD8302 استفاده شد. همچنین، بسامد سیگنال ورودی تا ۲/۷ گیگاهرتز انتخاب شد. برای قرارگرفتن کامل نمونه درون حسگر، خازن به ارتفاع ۷۰ میلی‌متر، شعاع استوانه داخلی برابر ۴ میلی‌متر، شعاع استوانه خارجی ۲۵ میلی‌متر و حجم کل آن ۱۰۰ سی‌سی طراحی و ساخته شد سپس کلیه تجهیزات به رایانه متصل شدند. دیاگرام راه‌اندازی سیستم دی‌الکتریک در شکل ۳ نشان داده شده است.

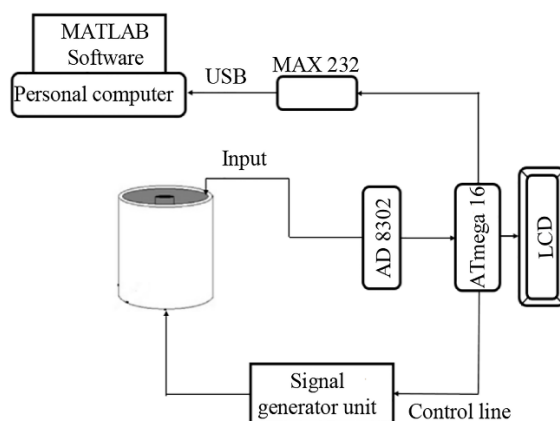


Figure 3- Starting system diagram
شکل ۳- دیاگرام راه‌اندازی سیستم

آزمایش مورد نظر در سیستم طیف‌سنجی دی‌الکتریک در دمای 25 ± 2 درجه سانتی‌گراد انجام شد. برای اینکه دستگاه بتواند خواص یک نمونه بیودیزل را تخمین بزند نیاز به یک حسگر خازنی دارد. پارامترهایی که از یک حسگر خازنی می‌توان استخراج نمود عبارت‌اند از: ضریب دی‌الکتریک و ضریب اتلاف. اگر یک نمونه سوخت بیودیزل درون خازن قرار گیرد، با توجه به کیفیت خود اثرات مختلفی روی ظرفیت خازن می‌گذارد.

حسگر مورد استفاده در این پژوهش از خازن استوانه‌ای و جنس رسانای داخل صفحات از مس با ظرفیت $1000 \mu F$ انتخاب شد، زیرا این فلز دارای پایداری زیادی است و با گذشت زمان و در شرایط جوی نامساعد اکسید نمی‌شود؛ به همین دلیل بر اندازه‌گیری‌ها اثر نامطلوب نمی‌گذارد. همچنین، این حسگر، به علت مقاومت کم، دارای ظرفیت بالایی است که سبب می‌شود خطای سیستم کمتر شود. به همین خاطر، استفاده از مس به جای فلزات دیگر مانند آلومینیوم، برنج و غیره مناسب‌تر است.

پارامتر دیگری که حسگر خازنی در اختیار می‌گذارد ضریب اتلاف است. وقتی که یک جریان متناوب از یک حسگر خازنی عبور می‌کند، در حالت ایدئال یک اختلاف فاز 90° درجه بین ولتاژ ورودی و جریان خروجی رخ می‌دهد. وقتی که یک ماده دی‌الکتریک درون حسگر قرار می‌گیرد، مولکول‌های ماده دی‌الکتریک به‌طور کامل نمی‌توانند خود را با میدان الکتریکی ایجاد شده وفق دهند. در نتیجه اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ کمی کمتر از مقدار 90° درجه می‌شود. اگر زاویه جدید ϕ باشد، آنگاه مقدار $\phi - 90^\circ$ برابر با زاویه اتلاف است که با δ نشان داده می‌شود.

وقتی که یک میدان الکتریکی بر یک ماده اثر می‌کند، پدیده ذخیره و اتلاف انرژی رخ می‌دهد. اتلاف انرژی زمانی رخ می‌دهد که ماده انرژی میدان الکتریکی را جذب می‌کند و ذخیره کامل انرژی زمانی رخ می‌دهد که اتلاف صورت نپذیرد. بنابراین، ضریب دی‌الکتریک شامل دو بخش خواهد بود که به صورت رابطه (۱) نمایش داده می‌شود:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = |\varepsilon|e^{-j\delta} \quad (1)$$

که در آن، بخش حقیقی ε' ثابت دی‌الکتریک و بخش موهومی ε'' ضریب اتلاف است. ثابت دی‌الکتریک قابلیت ذخیره انرژی و ضریب اتلاف دی‌الکتریک قابلیت جذب انرژی ماده درون خازن را نشان می‌دهد.

همچنین، مقدار دی‌الکتریک و ضریب اتلاف نمونه، با استفاده از رابطه (۲)، محاسبه شد [۱۷].

$$\varepsilon' = \left(1 + \frac{\varphi \times \lambda_0}{360t}\right) \quad (2\text{-الف})$$

$$\varepsilon'' = \frac{A\lambda_0\sqrt{\varepsilon'}}{8.68\pi t} \quad (2\text{-ب})$$

که در آن φ میزان شیفیت فاز (درجه)، λ_0 طول موج سیگنال (m)، t ضخامت نمونه داخل حسگر (m) و A ضریب میرایی (dB) است.

از روابط (۲) می‌توان نتیجه گرفت که ثابت دی‌الکتریک (ε') تابعی از مقدار تغییر فاز و ضریب اتلاف تابعی از ضریب میرایی حسگر است. با توجه به اینکه هدف از انجام این تحقیق ارزیابی ویژگی‌های سوخت بیودیزل است و اندازه‌گیری ضریب اتلاف و ضریب دی‌الکتریک مدنظر نیست، بنابراین نیازی به استخراج میزان جابه‌جایی فاز و میرایی نبود و تنها از ولتاژهای مرتبط با این دو پارامتر دی‌الکتریک در پیش‌بینی ارزش حرارتی استفاده شد.

استخراج ویژگی‌های دی‌الکتریک

به‌منظور دریافت ویژگی‌های دی‌الکتریک، محدوده فرکانسی که بین ۲۰ کیلوهرتز تا ۲۰ مگاهرتز بود برای تغذیه به خازن انتخاب شد. در هر اتصال سیستم دی‌الکتریک به رایانه ولتاژی به سیستم اعمال می‌شد و در هر رفت‌وبرگشت به خازن و رایانه ۲ داده به‌دست می‌آمد که در مجموع ۳۸۴ فرکانس برای هر نمونه در محدوده ۲۰ کیلوهرتز تا ۲۰ مگاهرتز وجود داشت. نیمی از این تعداد مربوط به ضریب دی‌الکتریک و نیمی دیگر مربوط به ضریب اتلاف بود. مقدار ولتاژهای استخراج‌شده، که در رایانه ذخیره شده‌اند، توسط برنامه MATLAB و WEKA تجزیه و تحلیل شد و درنهایت خصوصیت سوخت موردنظر توسط دستگاه حسگر خازنی مشخص شد.

با توجه به حجم عظیم اطلاعات استخراجی حین داده‌برداری، نیاز بود که دستگاه پارامترهای اندازه‌گیری‌شده را به رایانه ارسال و با کمک برنامه MATLAB و WEKA تحلیل آن‌ها را انجام دهد.

روش‌های تجزیه و تحلیل

با توجه به تعداد بالای فرکانس برای هر نمونه (۳۸۴ فرکانس) و در نتیجه زمان‌گیر بودن محاسبات، لازم بود ابعاد این ویژگی‌ها کاهش یابد. بدین منظور، به کمک نرم‌افزار MATLAB از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی^۱، که یک روش استخراج ویژگی به صورت خطی است و موجب کاهش ابعاد داده‌ها با از دست دادن حداقل اطلاعات است، برای ترکیب ویژگی‌ها و فشرده‌سازی آن‌ها استفاده شد. نتایج حاصل از آنالیز مؤلفه‌های اصلی نشان داد که با در نظر گرفتن سطح آستانه مشخص تعداد ۲ مؤلفه (ضریب دی‌الکتریک و ضریب اتلاف) استخراج می‌شود. همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد، داده‌ها به ۲ مؤلفه اصلی تبدیل شد. سپس، تکنیک تحلیل تفکیک خطی^۲ داده‌های مربوط به یک کلاس را که تا حد امکان در زیر فضای جدید ایجاد شده بود به

1. Principal component analysis
2. Linear discriminant analysis

هم نزدیک و داده‌های کلاس‌های مختلف را از هم دور کرد. درنهایت، داده‌های مربوط به ۵ نمونه سوخت طبقه‌بندی شد. نتایج حاصل از طبقه‌بندی به روش تحلیل تفکیک خطی برای نمونه‌های بیودیزل در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- ماتریس اغتشاش به‌دست‌آمده از مدل تحلیل تفکیک خطی

Table 3- Turbulence matrix obtained from LDA

Predicted	Real				
	1	2	3	4	5
1	3	0	0	0	0
2	0	3	0	0	0
3	0	0	3	0	0
4	0	0	0	3	0
5	0	0	0	0	3

تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی

تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی یک روش استخراج ویژگی به‌صورت خطی است که موجب کاهش ابعاد داده‌ها و زمان انجام محاسبات با حداقل از دست‌دادن اطلاعات می‌شود. همچنین، برای پیدا کردن ویژگی‌های درست از داده‌ها از این روش استفاده می‌شود. به‌طور کلی آنالیز مؤلفه‌های اصلی سه وظیفه مهم را انجام می‌دهد:

الف) اعضای بردار ورودی را به اعضای عمود برهم (مؤلفه‌های اصلی)، که همبستگی باهم ندارند، تبدیل می‌کند.
 ب) مؤلفه‌های اصلی را به‌نحوی مرتب می‌کند که مؤلفه‌هایی که بیشترین تغییرات یا بالاترین واریانس را دارند ارجحیت داشته و مؤلفه‌های با اهمیت کمتر بعد از مؤلفه اصلی قرار گیرند.

ج) مؤلفه‌هایی با اهمیت ناچیز را می‌توان از بقیه مؤلفه‌های مهم حذف کرد.

روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی به‌طور گسترده برای مشخص کردن الگوها و طبقه‌بندی داده‌ها به‌کار می‌رود و به نحوی داده‌ها را بیان می‌کند که شباهت‌ها و تفاوت‌های آن‌ها مشخص‌تر شود. چون در داده‌ها با ابعاد بالا یافتن الگوهای داده‌ها می‌تواند سخت باشد و نمایش ترسیمی امکان‌پذیر نیست. روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی می‌تواند به‌عنوان یک ابزار نمایش و تحلیل داده‌ها به‌کار رود.

تجزیه و تحلیل تفکیک خطی

تجزیه و تحلیل تفکیک خطی یک روش طبقه‌بندی نظارت‌شده است که تغییر خطی از بردارهای ویژگی n بعدی (نمونه‌ها) را به فضای m بعدی ($m < n$)، با هدف نزدیک کردن داده‌های مربوط به یک کلاس تا حد امکان در زیر فضای جدید ایجاد شده و دور کردن داده‌های کلاس‌های مختلف، فراهم می‌کند. به‌عبارت دیگر، پراکندگی بین کلاس داده‌ها، حداکثر و پراکندگی درون کلاس داده‌ها حداقل شود. برای رسیدن به این هدف دو ماتریس پراکندگی درون‌کلاسی و بین‌کلاسی تشکیل شد. ماتریس پراکندگی بین‌کلاسی، کوواریانس ماتریس تفاضل میانگین هر کلاس با میانگین کل است و نشان‌دهنده فاصله و پراکندگی بین کلاس‌هاست. ماتریس پراکندگی درون‌کلاسی کوواریانس ماتریس تفاضل داده‌ها با داده‌های میانگین همان کلاس است و بیانگر میزان پراکندگی داده‌های هر کلاس است. برای رسیدن به حداکثر فاصله بین داده‌های کلاس‌های مختلف و نزدیکی بیشتر داده‌های هر کلاس به همدیگر ماتریس (پراکندگی بین‌کلاسی و پراکندگی درون‌کلاسی) بیشینه شد. این کار با محاسبه بردارها و مقادیر ویژه این ماتریس انجام شد. با وجود تفاوت‌های بسیار روش تحلیل تفکیک خطی با روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی، شباهت اصلی این دو روش، که کاربرد عمده آن‌ها به‌شمار می‌رود، کاهش تعداد بعدهای داده بود [۱۸]. پس از کاهش ابعاد داده‌ها، برای پیش‌بینی ارزیابی و اعتبارسنجی به‌منظور نشان‌دادن دقت سیستم دی‌الکتربیک از درخت تصمیم استفاده شد.

درخت تصمیم

در این پژوهش از سه الگوریتم درخت تصمیم شامل M5P، J48 و CART برای پیش‌بینی استفاده شد. یکی از مزایای خاص درخت طبقه‌بندی و رگرسیون^۱، به‌عنوان یک الگوریتم درخت تصمیم، ویژگی اعتبارسنجی متقابل آن است که تلاش می‌کند پیش‌پردازش را شناسایی کند. البته CART در شرایط قابل‌قبول‌تری نسبت به روش‌های آماری دیگر پیش‌بینی می‌کند [۲۰، ۱۹].

نتایج و بحث

اندازه‌گیری دی‌الکتریک

پس از تهیه نمونه‌ها و کالیبره کردن سیستم دی‌الکتریک با بیودیزل مبنای، که با شرایط بهینه به‌دست آمده بود [۱۶، ۱۵]، سایر نمونه‌ها به‌طور جداگانه داخل خازن استوانه‌ای مورد سنجش قرار می‌گرفتند. سامانه مورد نظر به‌طور خودکار محدوده بسامدی ۲۰ کیلوهرتز تا ۲۰ مگاهرتز را جاروب می‌کرد و تعداد ۳۸۴ ویژگی که شامل ضریب اتلاف و ضریب دی‌الکتریک است را استخراج می‌کرد. همان‌طور که پیش‌تر عنوان شد، تعداد ۱۹۲ ویژگی از ویژگی‌های استخراج مربوط به ضریب اتلاف و ۱۹۲ ویژگی دیگر مربوط به ضریب دی‌الکتریک است.

تحلیل مؤلفه‌های اصلی

به‌منظور بهبود عملکرد سیستم، انتخاب ویژگی‌های مفید و حذف داده‌های بی‌ربط در طبقه‌بندی ضروری به‌نظر می‌رسد، چرا که سیستم باید به‌راحتی و با سرعت زیاد فرایند ارزیابی را انجام دهد. در آنالیز مؤلفه‌های اصلی، داده‌ها با D بعد به فضایی با بعد کمتر منتقل می‌شوند. مزایای دیگر این روش شامل کاهش درجات آزادی، کاهش فضا و کاهش زمان عملیات می‌شود. هدف این است که برای ارائه اطلاعات در یک فضا، بهترین توصیف را در مورد تغییر در مجموع مربعات خطا به‌دست آوریم [۲۱]. برای از بین بردن ویژگی‌های بی‌ربط و کاهش داده‌ها از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی استفاده شد که حاوی ۹۵ درصد از ویژگی‌های واریانس کل بود و تعداد داده‌ها را به ۲ مؤلفه رساند. در شکل ۴ نتایج حاصل از PC1 و PC2 نشان داده شده است که مجموع دو PC ۹۵ درصد از کل اطلاعات ویژگی‌های داده‌ها را داراست.

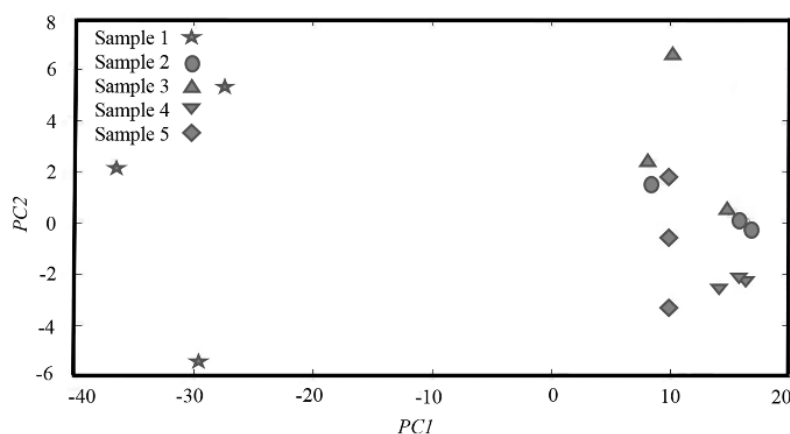


Figure 4- The results of PC1 and PC2

شکل ۴- نتایج حاصل از PC1 و PC2

تحلیل تفکیک خطی

با توجه به جدول ۳ که ماتریس اغتشاش نمونه‌های سوخت بیودیزل را نشان می‌دهد، دستگاه به‌خوبی توانست اکثر ویژگی نمونه‌ها را تشخیص دهد. در این روش، از هر نمونه سه تکرار گرفته شد. مواردی نیز در نتایج، که با اختلاف خیلی کمی دارای خطا است، مشاهده شد. دستگاه توانست نمونه‌ها را به‌طور درستی تشخیص دهد و با خطای کمی مواجه شد. با توجه به ماتریس اغتشاش به‌دست‌آمده از تحلیل تفکیک خطی، بیشترین شاخص‌های آماری حساسیت، اختصاصی بودن و دقت برای اکثر نمونه‌ها قابل قبول بوده و با توجه به جدول ۴ مقدار میانگین دقت کل برای تمامی نمونه‌ها ۸۹ درصد به‌دست آمد. همچنین، در کار کاروالهو و همکاران تشخیص درصد خلوص بیودیزل سویا و دیزل S500 با ترکیب ۱-۹ درصد نشان داد که دستگاه با ضریب همبستگی ۰/۹۹۲ و میانگین مربعات ۰/۰۰۲۳ دارای دقت بالایی است [۲۲]. این مسئله در تحقیق حاضر نیز قابل مشاهده است.

جدول ۴- شاخص‌های حساسیت، اختصاصی بودن و دقت برای کلیه نمونه‌ها

Table 4- Indicators of sensitivity, specificity and accuracy for all samples

Statistical index	Categories				
	1	2	3	4	5
Sensitivity index	100	89	87	100	100
Indicator of propriety	100	93	93	100	100
Percentage	100	89	87	100	100

درخت تصمیم

پس از کاهش ابعاد داده‌های سیستم دی‌الکترونیک توسط آنالیز مؤلفه‌های اصلی و تحلیل تفکیک خطی، نتایج حاصل از طبقه‌بندی سوخت توسط الگوریتم‌های یادگیری M5P، J48 و CART برای پیش‌بینی و اعتبارسنجی داده‌های حاصل از طیف‌سنجی دی‌الکترونیک در نرم‌افزار WEKA قرار داده شد که مقادیر آن‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به نتایج، الگوریتم CART دارای بالاترین دقت (۹۹/۴۲ درصد) در مقایسه با روش J48 و M5P بوده است.

جدول ۵- نتایج به‌دست‌آمده از درخت تصمیم سوخت‌ها

Table 5- The results obtained of different fuels decision tree

Mothed	RMSE	Accuracy (%)
J48 (%)	0.97	98
CART (%)	0.96	99
MSP (%)	1.4	82

نتیجه‌گیری

یافتن روش‌های نوینی به‌منظور شناسایی خواص سوخت‌های زیستی و تطابق آن‌ها با نوع فسیلی از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش پنج نمونه بیودیزل با روش ترنس‌استریفیکاسیون به‌کمک ائتلاف حرارتی کلکتور خورشیدی تولید برق سنتز شد. با توجه به تنظیم کنترلر بر روی دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد و همچنین زمان ثابت واکنش، که یک ساعت در نظر گرفته شد، در شرایط آب‌وهوایی مختلفی که برای تولید بیودیزل در نظر گرفته شده بود دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد تأمین نشد. در نتیجه، با کاهش دمای واکنش، بازده بیودیزل تغییر کرد. با این کاهش، محتوای اسید چرب محصولات نیز تغییر کرد و این تغییر در محتوای اسید چرب باعث تغییر در خصوصیات بیودیزل شد. برای ارزیابی خصوصیات بیودیزل‌های تولیدشده از دستگاه نوینی استفاده شد که این خصوصیات را براساس شاخص دی‌الکترونیک آن‌ها مورد بررسی قرار داد. دستگاه، با دریافت ویژگی‌های دی‌الکترونیک توسط یک خازن استوانه‌ای در بسامدهای مختلف، خصوصیات سوخت را طبقه‌بندی کرد. سامانه

محدوده بسامدی ۲۰ کیلوهرتز تا ۲۰ مگاهرتز را تولید کرده و تعداد ۳۸۴ ویژگی که شامل ضریب اتلاف و ضریب دی‌الکتریک بوده را استخراج کرد. همانطور که پیش‌تر بیان شد، برای ازبین‌بردن ویژگی‌های بی‌ربط و کاهش داده‌ها از روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی استفاده شد که حاوی ۹۵ درصد از ویژگی‌های واریانس کل بود و تعداد داده‌ها را به ۲ مؤلفه رساند. از هر نمونه توسط سامانه سه مرتبه تست گرفته شد که برای نمونه‌های ۱، ۴ و ۵ در هر سه بار مقادیر ارزش حرارتی به‌دست‌آمده یکسان بود و درصد تخمین مقدار ۱۰۰ را نشان داد و اما در نمونه‌های ۲ و ۳ درصد تخمین به‌ترتیب ۹۳ و ۹۲ به‌دست آمد. با این حال، درصدهای تخمین نشان داد که سیستم دارای دقت بالایی است. برای طبقه‌بندی نمونه‌ها نیز روش تحلیل تفکیک خطی به‌کار گرفته شد و شاخص‌های آماری حساسیت، اختصاصی‌بودن و دقت ارائه شد. پس از تحلیل داده‌ها توسط برنامه MATLAB، برای اعتبارسنجی تحلیل از برنامه WEKA توسط تکنیک درخت تصمیم از سه الگوریتم J48، CART و M5P نیز استفاده شد. با توجه به نتایج، روش CART دارای بالاترین دقت (۹۹ درصد) در مقایسه با روش J48 و M5P بود. نتایج این ارزیابی‌ها نشان داد که دستگاه طراحی‌شده توانایی ارزیابی ارزش حرارتی بیودیزل را با دقت بالایی داراست. با توجه به اینکه آزمایش انجام‌شده بر روی این دستگاه با سوخت بیودیزل مبنا انجام شده است، می‌توان دستگاه را با توجه به نیازهای کیفی متفاوت با سوخت‌های زیستی دیگر به‌جز سوخت مذکور نیز کالیبره کرد.

منابع

1. A. Banerjee and R. Chakraborty, "Parametric sensitivity in transesterification of waste cooking oil for biodiesel production-a review," *Resources, Conservation and Recycling*, 53, No. 9, 2009, pp. 490-497.
2. C. M. Caruana, "Pollution control drives new interest in biodiesel," *Chemical Engineering Process*, 84, 2000, pp. 14-18.
3. G. Knothe, "Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters," *Fuel processing technology*, 86, No. 10, 2005, pp. 1059-1070.
4. L. F. Ramirez-Verduzco, J. E. Rodriguez-Rodriguez and A. d. R. Jaramillo-Jacob, "Predicting cetane number, kinematic viscosity, density and higher heating value of biodiesel from its fatty acid methyl ester composition," *Fuel*, 91, No. 1, 2012, pp. 102-111.
5. M. J. Ramos, et al., "Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties," *Bioresource Technology*, 100, No. 1, 2009, pp. 261-268.
6. A. Demirbas, "Effects of Moisture and Hydrogen Content on the Heating Value of Fuels," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 29, No. 7, 2007, pp. 649-655.
7. B. Sajjadi, A. A. A. Raman and H. Arandiyani, "A comprehensive review on properties of edible and non-edible vegetable oil-based biodiesel: Composition, specifications and prediction models," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 63, 2016, pp. 62-92.
8. S. O. Giwa and et al., "Prediction of selected biodiesel fuel properties using artificial neural network," *Frontiers in Energy*, 9, No. 4, 2015, pp. 433-445.
9. R. Piloto-Rodriguez and et al., "Prediction of the cetane number of biodiesel using artificial neural networks and multiple linear regression," *Energy Conversion and Management*, 65, 2013, pp. 255-261.
10. U. Rashid, and F. Anwar, "Production of biodiesel through optimized alkaline-catalyzed transesterification of rapeseed oil," *Fuel*, 87, No. 3, 2008, pp. 265-273.
11. J. De Souza and et al., "A close dielectric spectroscopic analysis of diesel/biodiesel blends and potential dielectric approaches for biodiesel content assessment," *Fuel*, 105, 2013, pp. 705-710.
12. J. C. M'Peko and et al., "Evaluation of the dielectric properties of biodiesel fuels produced from different vegetable oil feedstocks through electrochemical impedance spectroscopy," *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, No. 22, 2013, pp. 9355-9359.
13. M. F. Pimentel and et al., "Determination of biodiesel content when blended with mineral diesel fuel using infrared spectroscopy and multivariate calibration," *Microchemical Journal*, 82, No. 2, 2006, pp. 201-206.
14. T. Eevera, K. Rajendran and S. Saradha, "Biodiesel production process optimization and characterization to assess the suitability of the product for varied environmental conditions," *Renewable Energy*, 34, No. 3, 2009, pp. 762-765.
15. A. Zahedi, M. Mirabdoli, and A. Shayan Nezhad, "Commercial optimization of biodiesel production from rapeseed oil as a clean fuel for thermal power plants," *Modares Mechanical Engineering*, 16, No. 9, 2016, pp. 135-142.
16. A. S. Nejad and A. R. Zahedi, "Optimization of biodiesel production as a clean fuel for thermal power plants using renewable energy source," *Renewable Energy*, 119, 2018, pp. 365-374.
17. H. Lizhi, K. Toyoda and I. Ihara, "Discrimination of olive oil adulterated with vegetable oils using dielectric spectroscopy," *Journal of Food Engineering*, 96, No. 2, 2010, pp. 167-171.

18. B. Tudu and et al., "Comparison of multivariate normalization techniques as applied to electronic nose based pattern classification for black tea," *Sensing Technology, ICST 2008, 3rd International Conference*, Taiwan, IEEE, 2008.
19. L. Breiman and et al., *Classification And Regression Trees*, New York, CRC press, 1984.
20. M. W. Kattan, and J. R. Beck, "Artificial neural networks for medical classification decisions," *Archives of pathology & laboratory medicine*, 119, No. 8, 1995, pp. 672-677.
21. M. Ghasemi-Varnamkhasi and et al., "Aging fingerprint characterization of beer using electronic nose," *Sensors and Actuators B: Chemical*, 159, No. 1, 2011, pp. 51-59.
22. C. Diniz Carvalho and et al., "Determination of the composition of biodiesel-diesel blends using the dielectric constant," *Instrumentation Science & Technology*, 44, No. 4, 2016, pp. 377-385.

Evaluation of heat value of biodiesels produced from solar collector-biofuel hybrid system by dielectric spectroscopy techniques

Alireza Zahedi^{1*}, Ardeshir Shayannejad¹ and Mahdi Rashvand²

1- School of New Technology, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Department of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran

*Corresponding author

(Received: 2018.11.05, Received in revised form: 2018.12.22, Accepted: 2019.01.13)

The properties of the biodiesel will be changed by changing the reaction parameters of biodiesel production from vegetable oils that heating value is one of important of them. The aim of this study is to evaluate a new system in order to detect changes in the properties of biodiesel, such as heating value by dielectric spectroscopy with the capacitive sensor. Transesterified palm-based biofuels were synthesized in different weather conditions using the heat loss of a linear parabolic trough solar collector power. At first, a sample of biodiesel was produced with optimized parameters as the basis of evaluation. Then, five samples of biodiesel with the same optimized parameters but with different temperatures were produced by the solar collector as one of the renewable energy systems. After that, the samples were placed in the device and information obtained by dielectric spectroscopy was transferred to software. In order to validate the analysis, some algorithms from the decision tree technique were used. According to the results, the Classification and Regression Tree (CART) algorithm had the highest accuracy (99%) in comparison with others. According to the accuracy of algorithms, it was deduced that the chosen techniques had good potential to determine biodiesel fuel properties.

Keywords: Biodiesel, Heating value, Solar collector, Renewable energies, Dielectric