

مدل‌سازی و بهینه‌سازی سامانه تولید بیودیزل پلاسمای سرد اتمسفری - فراصوت با استفاده از روش سطح پاسخ

مرضیه انصاری سامانی^۱، بهرام حسین‌زاده سامانی^{۲*}، مهدی قاسمی ورنامخواستی^۳، سجاد رستمی^۴ و رحیم ابراهیمی^۵

چکیده

به منظور پاسخ به تقاضای عظیم انرژی و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و کاهش آلودگی هوا، استفاده از یک سوخت زیستی سبز، پاک و پایدار تنها جایگزین است. زمانی که از یک پیش‌ساز و فرآیند مناسب در تولید بیودیزل استفاده شود، جایگزینی آن به عنوان یک سوخت قطعی می‌شود. هدف این مطالعه ارزیابی رآکتور ترکیبی جت پلاسما - فراصوت در تولید بیودیزل است. استفاده از جت پلاسما در تولید بیودیزل به دلیل استفاده از میدان‌های الکتریکی قوی در فرآیند ترانس - استریفیکاسیون به عنوان یک فرآیند تجزیه مولکولی پیشرفته در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است. چهار عامل نسبت مولی متانول به روغن (۱:۴، ۱:۶ و ۱:۸)، درصد کاتالیزور (۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵)، زمان (۳۰، ۶۰ و ۹۰ ثانیه) و توان فراصوت (۱۰۰، ۲۵۰ و ۴۰۰ وات) برای تولید بیودیزل در این سامانه ترکیبی بررسی شد. روش سطح پاسخ (RSM) برای بهینه‌سازی محتوای متیل استر استفاده شد. در بهینه‌سازی RSM، بیشترین عملکرد بیودیزل ۹۳/۸۲ درصد در توان فراصوت ۳۹۵/۷۶ وات، نسبت مولی ۱:۷۵، درصد وزنی کاتالیزور ۰/۹۶ و زمان واکنش ۷۹/۵۸ ثانیه بود. مشخصات فیزیکی شیمیایی بیودیزل تولید شده مطابق با استاندارد ASTM D6751 است، به‌طور کلی، نتایج نشان داد که بیودیزل تولید شده از طریق این سامانه ترکیبی، باعث صرفه‌جویی در زمان با بیشترین بازده تبدیل شده است.

واژه‌های کلیدی: فراصوت، تولید بیودیزل، سوخت زیستی، جت پلاسما، ترانس استریفیکاسیون.

ارجاع: انصاری سامانی م. حسین‌زاده سامانی ب. قاسمی ورنامخواستی م. رستمی س. و ابراهیمی ر. ۱۴۰۲. مدل‌سازی و بهینه‌سازی سامانه تولید بیودیزل پلاسمای سرد اتمسفری - فراصوت با استفاده از روش سطح پاسخ. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۹: ۹۴-۹۹.
<https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.14230.650>

۱- دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.
۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
۴- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
۵- استاد تمام گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

*نویسنده مسئول: b.hosseinzadehsamani@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۸

مقدمه

جایگزینی سوخت های فسیلی با انرژی های پایدار و به بیشینه رساندن استفاده از انرژی های تجدیدپذیر، نه تنها برای کاهش انتشار گازهای گلخانه ای (GHG) بلکه برای بهبود تأمین امنیت انرژی، اهمیت فزاینده ای دارد. اتلاف انرژی و نابودی محیط زیست، بحران های جدی ای هستند که با اتخاذ روش های پایدارتر و سازگار با محیط زیست و استفاده از منابع انرژی سوخت های زیستی همچون بیودیزل کاهش می یابد (Hiwot, 2017). در بین انواع سوخت های زیستی، بیودیزل با توجه به خواص و ماهیت شیمیایی، جذابیت بیشتری پیدا می کند و می توان از آن به عنوان مخلوط با سوخت دیزل استفاده کرد (Nisar et al., 2018). بیودیزل تقریباً در همه جای دنیا به دلیل عوامل متعددی مانند تجدیدپذیری، زیست تخریب پذیری، غیرسمی بودن، نقطه اشتعال بالا و دوستدار محیط زیست در مقایسه با دیزل معمولی مورد استقبال قرار گرفته است (Shi et al., 2013). بیودیزل که مخلوطی از آلکیل استرهای تولید شده از اسیدهای چرب است، به عنوان یک جایگزین تجدیدپذیر و کم کربن برای دیزل فسیلی در بخش حمل و نقل معرفی شده است (Sharma et al., 2008). روش های متعددی برای تولید بیودیزل ابداع شده است، مانند تجزیه در اثر حرارت، روش سیال فوق بحرانی و ترانس استریفیکاسیون که رایج ترین روش مورد استفاده در بین همه این روش ها است. در این روش از روغن، بیودیزل و گلیسرین تولید می کنند (Bet-Moushouli et al., 2016). روغن های گیاهی و چربی های حیوانی مختلف را می توان با الکل و یک کاتالیزور قلیایی، اسیدی، زیستی (همگن / ناهمگن) ترانس استری یا استری کرد تا بیودیزل به دست آورد. با این حال، هر رویکرد، دارای مزایا و معایب خاص خود است. به عنوان مثال، استفاده از کاتالیزور قلیایی کارآمدترین فرآیند در نظر گرفته شده و سرعت واکنش را می توان حتی در دمای پایین ۶۰ درجه سلسیوس به دست آورد. مسئله ای که در رابطه با استفاده از کاتالیزور قلیایی در تولید بیودیزل وجود دارد این است که کاتالیزور قلیایی تنها می تواند برای ترانس استری کردن روغن هایی با FFA کمتر از ۱٪ استفاده شود تا از صابونی شدن جلوگیری کند؛ چرا که تشکیل صابون می تواند جداسازی استر را با مشکل مواجه کند (Ho et al.,

2016). بنابراین همواره تلاش هایی برای پیدا کردن روش های کاهش مصرف کاتالیزور در فرآیند تولید بیودیزل و شدت بخشی به فرآیند صورت گرفته است. یکی از رآکتورهای شدت بخشی در تولید بیودیزل، رآکتور حفره زای فراصوت است. گزارش شده است که تهیه بیودیزل به کمک فراصوت با کاهش مقدار کاتالیزور شدن (Allami et al., 2020)، افزایش نسبت مولی روغن به الکل و اجتناب از صابون سازی (Huang et al., 2020) همراه است. فراصوت نسبت به سایر روش های اختلاط، با ایجاد یک امولسیون خوب (He et al., 2020) و ایجاد میکرو آشفتگی به دلیل حرکت شعاعی حباب ها، توانایی بیشتری در افزایش اختلاط دارد (Sharma et al., 2020; Hosseinzadeh Samani et al., 2020b). علاوه بر این، فراصوت می تواند حفره هایی ایجاد کند که باعث افزایش دمای موضعی شود و نیاز به گرمایش خارجی را جبران کند. در سال های اخیر از فن آوری های شدت بخشی مایکروویو، حفره زایی یا فراصوت برای بهبود شرایط انتقال حرارت و اختلاط در واکنش ترانس استریفیکاسیون استفاده شده است (Gülyurt et al., 2016; Tan et al., 2019). به موازات آن، روش های دیگری برای بهبود بازدهی بیودیزل مانند رآکتورهای پلاسمای سرد نیز مورد بررسی قرار گرفتند (Abdul-Majeed et al., 2016). پلاسما به چهارمین حالت ماده بعد از حالت جامد، مایع و گاز اشاره دارد (Mandal et al., 2018). پلاسما یک گاز یونیزه شده است که تعداد الکترون های آزاد آن تقریباً برابر با تعداد یون های مثبت است (Gan et al., 2018). این گاز با یونیزاسیون، تجزیه و تحریک اتم ها و شکستن پیوند مولکول های گاز پس زمینه به پلاسما تبدیل می شود. در صورتی که از پلاسما برای تولید بیودیزل استفاده شود، الکترون های پر انرژی پلاسما نقش کاتالیزور را ایفا می کنند و دارای انرژی فعال سازی هستند (Hyun et al., 2012). در پلاسمای غیرحرارتی، دمای الکترون ها به دلیل اندازه بسیار کوچک الکترون ها در مقایسه با سایر ذرات دیگر بسیار بیشتر افزایش می یابد. الکترون های پر انرژی پس از حمل به متانول منجر به تحریک گروه OH و باعث تشکیل یون متوکسید شده و فرایند ترانس استریفیکاسیون شروع می شود (Hernando et al., 2007). همچنین هنگامی که گاز یونیزه شده تولید می

از این سامانه ترکیبی با مقادیر استاندارد ASTM D6751 مورد مقایسه و بررسی قرار می‌گیرد. در این مطالعه تحلیل و بهینه سازی داده‌ها با استفاده از روش سطح پاسخ انجام شد. این روش قادر است با تعداد کم داده تخمین دقیقی از نقاط بهینه ارائه دهد و با کاهش تعداد آزمایش‌ها منجر به کاهش هزینه‌ها نیز خواهد شد.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه

برای تولید بیودیزل به روش ترانس‌استریفیکاسیون از روغن آفتابگردان استفاده شد. دانه‌های آفتابگردان جمع-آوری و توسط استخراج سوکسله روغن‌گیری صورت گرفت. الکل و کاتالیزور مورد استفاده در این مطالعه الکل متانول (۹۹/۹٪، مرک، آلمان) و هیدروکسید پتاسیم (۹۹/۸٪، مرک، آلمان) بود. برای تولید جت پلاسما از گاز آرگون بسیار خالص (۹۹/۹۹٪) استفاده شد. برای بررسی عدد اسیدی روغن آفتابگردان از روش تیتراسیون استفاده شد. روغن آفتابگردان با سطوح اسیدی از ۰/۱ تا ۰/۵۵ میلی گرم KOH/g با افزودن ۱۰ میلی لیتر ایزوپروپانول به نمونه ۱ میلی گرمی، سپس افزودن ۲ تا ۳ قطره فنل فتالئین و خنثی کردن محلول با ۰/۱ مولار KOH مورد بررسی قرار گرفت. محاسبه عدد اسیدی با استفاده از معادله (۱) انجام شد:

$$\text{Acid value (mg KOH/g)} = (56.1 \times 0.1M \times V) / g \quad (1)$$

که در آن:

$$56.1 = \text{جرم مولکولی ثابت برای KOH}$$

$$0.1 = \text{مولار = غلظت KOH}$$

$$V = \text{حجم مقدار نهایی - حجم مقدار اولیه}$$

$$g = \text{وزن نمونه بر حسب گرم است}$$

سیستم ترکیبی جت پلاسما - فراصوت

تولید بیودیزل توسط سامانه ترکیبی جت پلاسما-فراصوت در دمای اتاق همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است انجام شد. سامانه شامل ۱ رآکتوری شیشه‌ای دارای طول ۱۵۰ میلی‌متر، قطر داخلی ۶۰ میلی‌متر و حجم ۲۵۰ میلی‌لیتر است. جت تخلیه سد دی‌الکتریک (ACP Jet) برای تولید پلاسما در بالا و پروب فراصوت (مدل تاپسونیک، UP400، ایران) برای

شود، الکترون‌ها با مولکول‌ها برخورد و گونه‌های فعال شیمیایی به نام رادیکال‌ها را ایجاد می‌کنند. رادیکال‌ها، پس از تولید، می‌توانند جایگزین شکل شیمیایی معمولی کاتالیزور در طی واکنش‌های استری‌سازی شده و جداسازی بیودیزل تشکیل‌شده را تسهیل کنند (Istadi et al., 2009). در پژوهش (Meeprasertsagool et al., 2017) نگرش جدیدی در مورد استفاده از روش پلاسما سرد برای پیرولیز روغن پالم ارائه کردند و دریافتند که استفاده از فرآیند پلاسما در تولید سوخت سبز کاربردی است. استفاده از فناوری‌های پیشرفته‌تر از جمله رآکتورهای پلاسما در تولید بیودیزل به دلیل زمان واکنش بسیار کوتاه، امیدوارکننده تلقی می‌شوند. در واقع بدون نقش پلاسما، زمان واکنش مورد نیاز برای تشکیل FAME طولانی‌تر خواهد بود. در مطالعه (Buchori et al., 2016a) زمانی که از کربن اصلاح‌شده به‌عنوان کاتالیزور استفاده شد زمان مورد نیاز در طول فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون با کمک پلاسما حدود ۵ دقیقه بود، اما بدون استفاده از پلاسما، FAME تولید نشد که ممکن است به دلیل نسبت مولی بیشتر واکنش‌دهنده‌ها باشد و زمان بیشتری برای واکنش مورد نیاز است. بنابراین فناوری تولید بیودیزل به کمک پلاسما دارای مزایای مختلفی در مقایسه با یک روش معمول است، مانند: زمان واکنش کوتاه‌تر، بدون محصول صابون، بدون محصول گلیسرین و عملکرد بیودیزل بالاتر (Buchori et al., 2016b). در حال حاضر از منابع مختلف برای واکنش‌های به کمک پلاسما استفاده می‌شود. جت پلاسما تخلیه سد دی‌الکتریک (ACP Jet) به دلیل چندین مزیت در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت که از جمله انعطاف پذیری زیاد این رآکتور از نظر پیکربندی الکترو و رآکتور، جلوگیری از ایجاد جرقه و قوس الکتریکی به دلیل وجود یک مانع دی‌الکتریک در بین شکاف تخلیه الکتریکی و همچنین کاتالیز واکنش به کمک رآکتور پلاسما می‌توان اشاره کرد (Nozaki & Okazaki, 2013). مطالعه حاضر امکان‌سنجی تولید بیودیزل توسط سامانه ترکیبی جت پلاسما-فراصوت را مورد بررسی قرار می‌دهد. همچنین بهینه‌سازی عوامل عملیاتی و ویژگی‌های طراحی به منظور دستیابی به بیشینه راندمان تبدیل FAME و کاهش زمان، بررسی می‌شود. در نهایت سوخت بیودیزل تولید شده با استفاده

گرفتند. ابتدا کاتالیزور همگن هیدروکسید پتاسیم (KOH) با استفاده از هات پلیت استیرر دار آنالوگ آلفا در متانول (CH_3OH) حل و مخلوط شد. بعد از تهیه متوکسید (متانول و کاتالیزور پتاسیم هیدروکسید)، در هر مرحله، روغن آفتابگردان و متوکسید توسط سیستم پمپ و نازل با دبی ۴۵ میلی لیتر بر ثانیه اتمیزه شده و در مخزن واکنش با یکدیگر برخورد کردند. آرگون کاملاً خالص (۹۹/۹٪) با دبی ۳ لیتر بر دقیقه در ولتاژ ۲۰ کیلوولت و فرکانس ۲۰ کیلوهرتز تشکیل و با مواد واکنش دهنده برخورد کرد. به منظور شدت بخشی به فرآیند با استفاده از پروب فراصوت در این مرحله حفره زایی رخ می دهد و امولسیون روغن و متوکسید تشکیل می شود. واکنش انجام شده منجر به تشکیل گلیسرین و متیل استر و همچنین مقداری الکل اضافی می شود. الکل موجود در محصول واکنش ترانس- استریفیکاسیون با عملیات حرارتی (نقطه جوش الکل) بازیافت شد و سپس به دلیل چگالی بالاتر گلیسرین نسبت به متیل استر، گلیسرین از متیل استر توسط قیف دکانتور جدا شد.

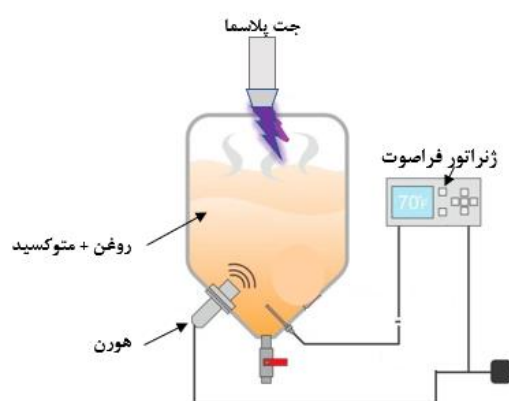
محاسبه محتوای متیل استر

بررسی بیودیزل معمولاً با تجزیه و تحلیل کروماتوگرافی یا طیف سنجی مشخص می شود. در واقع پس از جداسازی و شستشو، ابتدا نمونه ها توزین شدند تا درصد تبدیل واکنش (محتوای متیل استر) و کارایی مشخص شود. درصد متیل استر توسط کروماتوگرافی گازی (Perkin Elmer-Claruss 580) اندازه گیری شد. کروماتوگرافی گازی ناحیه توزیع مربوط به هر جزء در نمونه تولید شده را فراهم می کند. بیودیزل به دست آمده را می توان با کمک ناحیه توزیع حاصل از تجزیه و تحلیل کروماتوگرافی گازی (GC) تعیین کرد. خلوص FAME تولید شده توسط کروماتوگرافی گازی (GC) تعیین و مطابق با معادله (۲) (Dharma et al., 2016) محاسبه شد، اگر درصد FAME برای یک ماده اولیه مشخص باشد می توان بازده بیودیزل را با استفاده از معادله (۳) محاسبه کرد (Elkady et al., 2015).

$$\text{FAME خلوص} = \frac{(\sum A) - A_{EI}}{A_{EI}} \times \frac{W_{EI}}{m} \times 100\% \quad (2)$$

که در آن:

شدت بخشی فرآیند تولید به صورت مورب در مخزن شیشه ای قراردارند. پروب فراصوت از جنس تیتانیوم و قادر به تولید امواج فراصوت در محدوده بین ۰ تا ۴۰۰ وات است. امواج فراصوت به صورت پالسی با قابلیت تنظیم دمای محیط و تنظیم میزان پالس اعمال می شوند. پیکربندی سامانه جت پلازما شامل دو الکتروود هم محور است که یکی از آن ها به صورت یک سیم راست از جنس تنگستن در مرکز قرار دارد. الکتروود حلقوی مسی به صورت هم محور با الکتروود مرکزی بر روی یک لوله دی الکتریک قرار گرفته است. جنس دی الکتریک به دلیل مقاومت در برابر شکست الکتریکی ناشی از اعمال ولتاژ بالا و خصوصیات عایق بودن از جنس سرامیک انتخاب شد. در این پژوهش منبع تغذیه AC، ولتاژ - فرکانس متغیر با قابلیت تنظیم ولتاژ در محدوده صفر تا ۲۰ کیلوولت و فرکانس در محدوده ۶ تا ۲۰ کیلوهرتز است. آنچه سبب تشکیل جت پلازما می شود، اعمال اختلاف پتانسیل بین این دو الکتروود و عبور گاز آرگون (۹۹/۹٪) به عنوان گاز تشکیل دهنده پلازما است. گاز آرگون به دلیل ولتاژ شکست نسبتاً پایین و این که یک گاز نجیب بی اثر است در این پژوهش استفاده شد. همچنین با معرفها یا تجهیزات آزمایشی که قادر به ایجاد خوردگی هستند واکنش نشان نمی دهد.



شکل ۱- نمای فرآیند تولید بیودیزل توسط رآکتور ترکیبی جت ACP - فراصوت

روش تولید بیودیزل در سیستم توسعه یافته

به منظور انجام واکنش ترانس استریفیکاسیون چهار متغیر مستقل یعنی نسبت مولی روغن به متانول ۱:۴ - ۱:۸، توان فراصوت ۱۰۰-۴۰۰ وات، درصد کاتالیزور ۰/۷۵ - ۱/۲۵ و زمان واکنش ۳۰-۹۰ ثانیه مورد بررسی قرار

جدول ۱- سطوح متغیرهای مستقل انتخاب شده در روش سطح پاسخ

سطوح هر متغیر			متغیرهای مستقل
۱	۰	-۱	
۸:۱	۶:۱	۴:۱	نسبت مولی
۱/۲۵	۱	۰/۷۵	درصد وزنی کاتالیزور
۹۰	۶۰	۳۰	زمان واکنش (ثانیه)
۴۰۰	۲۵۰	۱۰۰	توان فراصوت (وات)

بحث و نتایج

نتایج طیف سنجی جت پلاسما

طیف‌های به دست آمده از پلاسمای تولید شده با استفاده از آرگون در شکل ۲ نشان داده شده است. این طیف انتشار توسط یک طیف سنج برای تعیین پلاسما ثبت شد. طیف‌های مربوط به اتم‌های آرگون در محدوده طول موج ۶۵۰-۹۵۰ نانومتر قابل مشاهده هستند. بنابراین سامانه استفاده شده به‌خوبی توانسته است اتم‌های آرگون را یونیزه کند. ترکیبات تخلیه را می‌توان با کاهش طیف انتشار و نسبت دادن خطوط منتشر شده به اتم‌ها و مولکول‌های خاص برانگیخته بررسی کرد.

ویژگی‌های روغن آفتابگردان

جدول ۲ اطلاعات اسیدهای چرب و برخی از خواص فیزیکی و شیمیایی روغن آفتابگردان را نشان می‌دهد. بر اساس جدول ۲، اسیدهای چرب لینولئیک و اولئیک با مقادیر ۶۵/۹۳ و ۲۱/۹۲ درصد بیشترین سهم را از اسیدهای چرب در روغن مذکور دارند. اسید اولئیک یک اسید چرب است که به طور طبیعی در تمام مواد اولیه کم هزینه و با FFA بالا وجود دارد (Banković-Ilić et al., 2012) و نقش مهمی در ساختار اسیدهای چرب روغن‌های گیاهی ایفا می‌کند. استفاده از اسید اولئیک در فرآیند استری‌سازی می‌تواند منجر به افزایش بازده محصول شود (Banković-Ilić et al., 2012). بنابر این روغن آفتابگردان مورد استفاده به دلیل اسید اولئیک منبع مناسبی برای تولید بیودیزل است.

ΣA مجموع نواحی پیک محتوای FAME به دست آمده از تجزیه و تحلیل GC

A_{EI} ناحیه پیک IS (متیل نونادکانوات)

W_{EI} وزن ثابت IS (mg) و

m وزن (mg) نمونه بیودیزل است

حاصل از FAME درصد = (عملکرد بیودیزل / بازده حجمی $\times$ GC) (۳)

در حالی که بازده حجمی بیودیزل تولید شده را می‌توان با استفاده از معادله (۴) به دست آورد (Elkady et al., 2015):

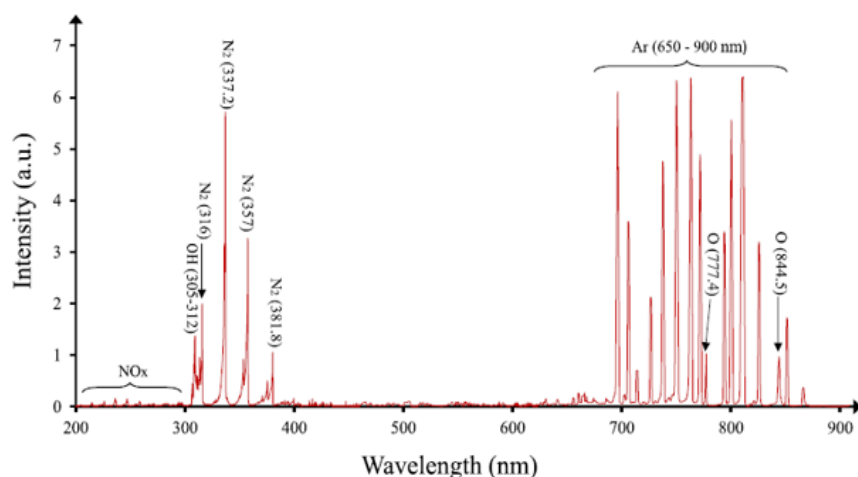
$$(۴) \quad \text{بازده حجمی} (\%) = \frac{\text{حجم محصول}}{\text{حجم واکنش دهنده}} \times 100$$

تجزیه و تحلیل آماری

بعد از تولید بیودیزل، مدلی آزمایشگاهی به منظور تعیین میزان بازده بیودیزل بر اساس عوامل مورد استفاده در واکنش ترانس‌استریفیکاسیون توسط نرم افزار Design Expert 12 ارائه شد. به منظور افزایش بیشتر بازده تولید، روش‌های زیادی برای بهینه‌سازی فرآیند تولید بیودیزل توسعه داده شده است (De et al., 2019). یکی از روش‌های بهینه‌سازی، روش سطح پاسخ است. بهینه‌سازی چند متغیره مانند روش‌شناسی سطح پاسخ (RSM)، کاهش زمان آزمایش و اطلاعاتی در مورد تعاملات متغیرها را ارائه می‌دهد و مدل‌های آماری تجربی را ایجاد می‌کند (Natesan & Rajoo, 2018). به منظور به دست آوردن مقدار بهینه، از حل معادله رگرسیون (۵) استفاده خواهد شد.

$$(۵) \quad Y_i = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \sum \beta_{jj} X_i^2 + \varepsilon$$

که در آن β_0 ، β_{ij} ، β_{jj} و β_i ضرایب ثابت، x_i و x_j متغیرهای مستقل در فرآیند و ε خطای تصادفی هستند با توجه به شرایط و دامنه تغییرات متغیرهای مستقل انتخابی از روش box-behnken برای انتخاب سطوح و تحلیل اثر متغیرها استفاده شد. هر یک از متغیرهای مستقل و سطوح آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. سطوح توان فراصوت طبق مطالعات قبل تعیین (Hosseinzadeh Samani et al., 2020a) و سطوح دیگر عوامل بر اساس آزمایشات اولیه تعیین شد.



شکل ۲- طیف سنجی نوری پلاسمای حاصل از گاز آرگون

متیل استر بیودیزل را نشان می دهد. برای ارزیابی تأثیر متغیرهای مستقل فرایند بر افزایش عملکرد بیودیزل مطابق جدول ۳، تأثیر همه عوامل به جز دو برهم کنش توان فراصوت (A) × درصد کاتالیزور (C) و نسبت مولی (B) × درصد کاتالیزور (C) در سطح احتمال ۱۰٪، معنی دار بوده است. با توجه به معنادار شدن مدل، معنی دار نشدن عدم تناسب (Lack of fit) نشان دهنده این است که مدل از دقت کافی برخوردار بوده است. بر اساس طرح Box-Behnken و نتایج آزمایش ها، معادله کدگذاری شده (۶) و معادله واقعی (۷) به دست آمد. در این معادله ها، (A) توان فراصوت بر حسب وات، B نسبت مولی، C درصد کاتالیزور بر حسب درصد وزنی روغن و D زمان انجام واکنش بر حسب ثانیه هستند

$$\begin{aligned} \text{عملکرد } (\%) = & 87.92 + 3.93A + 2.71B - 0.7313C + 5.41D + 0.3921AB + 0.3500AD - 0.5500BD + 0.3450CD + 0.324A^2 - 4.76B^2 - 3.79C^2 - 6.26D^2 \\ \text{عملکرد } (\%) = & -62.69522 + 0.06966A + 16.36428B + 115.45511C + 10.448D + 0.1307AB + 0.00078AD - 0.009167BD + 0.46000CD + 0.000013A^2 - 1.19031B^2 - 6.057015C^2 - 0.069555D^2 \end{aligned} \quad (6)$$

در معادله (۶) مقادیر عددی ضرایب نشان دهنده اهمیت هر عامل است، به طوری که علامت منفی ضریب نشان دهنده اثر معکوس و ضرایب مثبت نشان دهنده اثر هم افزایی است. بنابراین ضریب منفی نشان دهنده کاهش محتوای متیل استر است. با توجه به ضرایب همبستگی معادله (۶) می توان ادعا کرد که زمان انجام واکنش و D

جدول ۲- مشخصات اسیدهای چرب روغن آفتابگردان

مقدار	واحد	خواص
۰/۹۱	g cm ⁻³	چگالی
۳/۳	mm2s ⁻¹	ویسکوزیته سینماتیک
۰/۹۵	mg K/g oil	عدد اسیدی
۱۱۸	g I2/100g oil	عدد یدی
۰/۱	mg g ⁻¹	مقدار آب
۰/۰۹	wt. %	اسید میریستیک (C14:0)
۶/۱۱	wt. %	پالمیتیک اسید (C16:0)
۰/۰۷	wt. %	اسید پالمیتولیک (C16:1)
۴/۲۹	wt. %	اسید استئاریک (C18:0)
۲۱/۹۲	wt. %	اسید اولئیک (C18:1)* cis
۶۵/۹۳	wt. %	اسید لینولئیک (C18:2)*
۰/۱	wt. %	اسید لینولئیک (C18:3)*
۰/۵۱	wt. %	اسید آراکیدیک (C20:0)
۰/۷۴	wt. %	اسید بهینیک (C22:0)
۰/۲۱	wt. %	اسید لیگنوسریک (C24:0)
۰/۰۳	wt. %	اسیدهای چرب آزاد

نتایج تحلیل آماری و مدل سازی داده ها

طرح آزمایشی Box-Behnken در نرم افزار Design-Expert 12 برای چهار متغیر مستقل توان فراصوت، نسبت مولی، درصد کاتالیزور و زمان واکنش اعمال شد و ۲۹ آزمایش با سه تکرار در نقطه مرکزی پیش بینی شد. تجزیه و تحلیل واریانس گام به گام (Stepwise) انجام شد. جدول ۳ نتایج تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) اثرات اصلی و متقابل توان فراصوت، مدت زمان انجام واکنش، نسبت مولی و درصد کاتالیزور بر افزایش محتوای

محاسبه شده با مقدار ۰/۹۹۹۳ نشان می‌دهد که مدل به خوبی با داده‌ها تناسب دارد. ضریب تغییرات (C.V) (۰/۲۶) نشان دهنده مطابقت زیاد بین داده‌های به دست آمده از آزمایش و داده‌های شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار است.

به دنبال آن توان فراصوت A و نسبت مولی B بیشترین تأثیر و درصد کاتالیزور C دارای کمترین تأثیر و رابطه معکوس بر محتوای متیل‌استر را دارد. جدول ۴ عوامل آماری محاسبه شده در رگرسیون گام به گام بر اساس مدل پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد. ضریب تعیین (R^2)

جدول ۳- نتایج مدل عملکرد تولید بیودیزل به روش سطح پاسخ

منبع تغییر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	ضریب معناداری
مدل	۱۱۱۸/۳۴	۱۲	۹۳/۱۹	<۰/۰۰۰۱**
توان فراصوت (A)	۱۸۵/۲۶	۱	۱۸۵/۲۶	<۰/۰۰۰۱**
نسبت مولی (B)	۱۶۵/۵۸	۱	۱۶۵/۵۸	<۰/۰۰۰۱xx
درصد کاتالیزور (C)	۶/۴۲	۱	۶/۴۲	<۰/۰۰۰۱**
زمان (D)	۳۵۱/۲۲	۱	۳۵۱/۲۲	<۰/۰۰۰۱xx
AB	۰/۶۱۴۹	۱	۰/۶۱۴۹	۰/۰۰۲۳**
AD	۰/۴۹۰۰	۱	۰/۴۹۰۰	۰/۰۰۵۳**
BD	۱/۲۱	۱	۱/۲۱	۰/۰۰۰۱xx
CD	۰/۴۷۶۱	۱	۰/۴۷۶۱	۰/۰۰۵۳xx
A ²	۰/۵۹۳۱	۱	۰/۵۹۳۱	۰/۰۰۲۷xx
B ²	۱۴۷/۰۴	۱	۱۴۷/۰۴	<۰/۰۰۰۱**
C ²	۹۲/۹۶	۱	۹۲/۹۶	<۰/۰۰۰۱**
D ²	۲۵۴/۱۵	۱	۲۵۴/۱۵	<۰/۰۰۰۱xx
باقیمانده	۰/۷۵۳۹	۱۶	۰/۰۴۷۱	۰/۰۴۷۱
عدم برازش	۰/۶۳۱۸	۱۲	۰/۰۵۲۶	۰/۳۱۷۰ns
خطای خالص	۰/۱۲۲۱	۴	۰/۰۳۰۵	۰/۰۳۰۵
کل	۱۱۱۹/۰۹	۲۸		

xx معنی‌دار در سطح احتمال ۱۰٪ ns عدم معنی‌داری

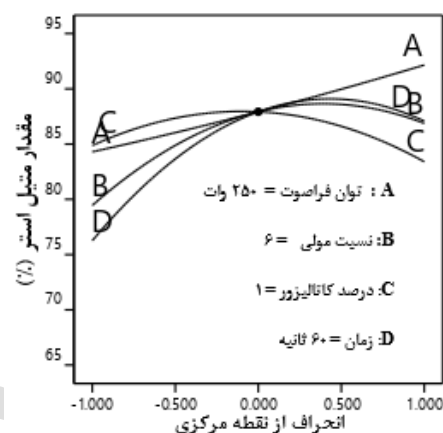
جدول ۴- عوامل آماری محاسبه شده در رگرسیون گام به گام در RSM

عوامل	مقدار	عوامل	مقدار
استاندارد خطا (Std. Dev)	۰/۱۲۷۱	ضریب تعیین (R^2)	۰/۹۹۹۳
میانگین	۸۱/۹۲	Adjust R ²	۰/۹۹۸۸
ضریب تغییرات (C.V%)	۰/۲۶۵۰	Pred R-Squared	۰/۹۹۷۳
		Adeq Precision	۱۶۸/۰۷۹۷

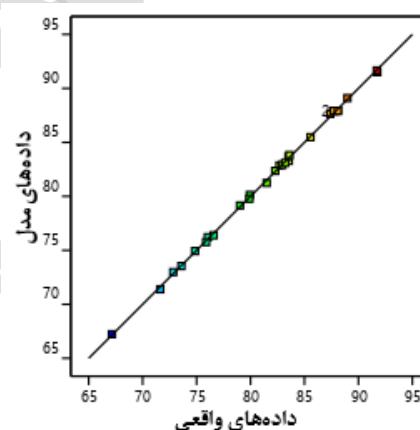
به نمودار توان فراصوت، نسبت مولی و درصد کاتالیزور است و نشان‌دهنده تأثیر بیشتر این متغیر در افزایش بازده بیودیزل است. شکل ۴ انطباق داده‌های آزمون را با داده‌های پیش‌بینی شده نرم‌افزار برای بازده بیودیزل نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل ۴ نشان می‌دهد، مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل بسیار نزدیک به مقادیر به دست آمده از آزمایش است و بنابراین مدل ارائه

در شکل ۳ اثر ورودی‌های مدل (توان فراصوت A، نسبت مولی B، درصد کاتالیزور C و زمان واکنش D) نسبت به نقطه مرکزی (توان فراصوت برابر ۲۵۰ وات، نسبت مولی ۱:۶، درصد کاتالیزور ۱ و زمان برابر ۶۰ ثانیه) نشان داده شده است. این شکل مقایسه‌ای از تأثیر هر عامل بر میزان افزایش بازده بیودیزل در یک نقطه مرکزی را نشان می‌دهد. نمودار زمان واکنش دارای شیب بیشتری نسبت

شده برای بازده از اعتبار خوبی از نظر متغیرهای فرآیند برخوردار است.



شکل ۳- اثر ورودی‌های مدل نسبت به نقطه مرکزی در افزایش مقدار متیل استر



شکل ۴- برازش داده‌های تجربی در مقابل داده‌های مدل

تأثیر متغیرهای مستقل بر محتوای متیل استر

نمودارهای کانتور و سه بعدی درصد راندمان با استفاده از RSM برای چهار متغیر زمان واکنش، درصد کاتالیزور، نسبت مولی و توان فراصوت در شکل ۵ نشان داده شده است. درصد تبدیل متیل استر با افزایش توان فراصوت از ۱۰۰ به ۴۰۰ وات افزایش یافته است. نرخ افزایش درصد تبدیل بیودیزل از ۱۰۰ به ۲۵۰ وات به میزان ۳/۷ درصد و از ۲۵۰ به ۴۰۰ وات به میزان ۴/۴ درصد افزایش یافته است. با توجه به اهمیت عامل توان فراصوت و علامت مثبت ضریب آن در معادله (۶) می‌توان نشان داد که این متغیر به طور مستقیم با بازده متیل استرها مرتبط است، به طوری که افزایش توان فراصوت منجر به افزایش تولید بیودیزل می‌شود (Hosseinzadeh Samani et al.,).

(Farvardin et al., 2020b). در واقع افزایش توان فراصوت منجر به افزایش هم‌زنی فراصوت و در نهایت منجر به افزایش سطح تماس بین دو حالت تشکیل شده (متوکسید و روغن) می‌شود (Fayyazi et al., 2018). (Fayyazi et al., 2014) بیان کردند که افزایش سطح تماس واکنش‌دهنده‌ها به دلیل افزایش توان فراصوت باعث کاهش زمان واکنش از ۹۰ دقیقه به چیزی در حدود ۶ دقیقه شده است. اما افزایش بیشتر در توان هم ممکن است محدودیت‌هایی را ایجاد کند. در این راکتور ممکن است به دلیل تشکیل ابرهای حباب‌دار در نزدیکی نوک پروپ مانعی برای انتقال انرژی مافوق صوت در توان‌های بالاتر ایجاد و کارایی فراصوت را ضعیف کند و در نتیجه تشدید فرآیند کاهش یابد (Gogate et al., 2011).

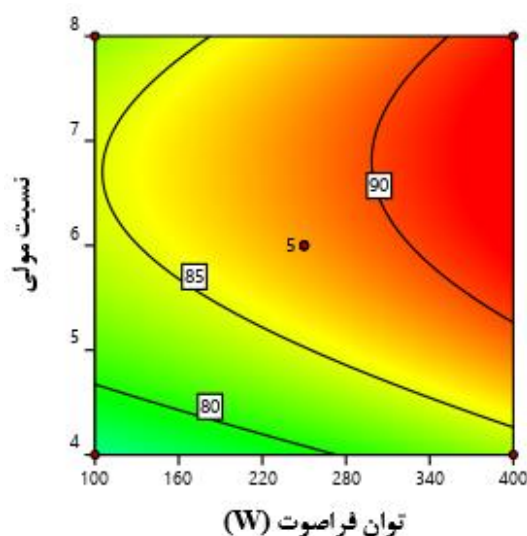
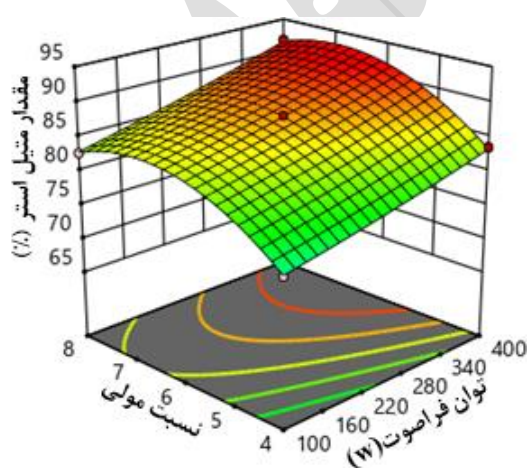
با توجه به شکل ۶- ب، افزایش زمان واکنش از ۳۰ به ۶۰ ثانیه منجر به افزایش محتوای متیل استر به میزان ۱۲ درصد و افزایش زمان واکنش از ۶۰ به ۹۰ ثانیه منجر به کاهش ۱ درصد بر محتوای متیل استر شد. این نتیجه را می‌توان به این صورت تفسیر کرد که افزایش زمان واکنش تا حد معینی منجر به انتقال جرم بیشتر متانول و روغن می‌شود و در نتیجه حلال بودن و امتزاج پذیری عملکرد را افزایش می‌دهد (Phan et al., 2011). دلیل کاهش محتوای متیل استر با افزایش زمان واکنش، صابونی شدن محصول توسط کاتالیزورهای قلیایی است (Rezania et al., 2019). از طرفی با توجه به اینکه گلسیرین و متانول هر دو قطبی و به طور مشترک محلول هستند، بنابراین، با افزایش زمان واکنش و تولید گلسیرین بیشتر، متانول بیشتری در سطح آن حل می‌شود و واکنش به تولید متانول تبدیل می‌شود و بازده واکنش اصلی کاهش می‌یابد (Capocelli et al., 2014).

شکل ۶-ج نمودار کانتور و نمودار سه بعدی تأثیر نسبت مولی بر افزایش محتوای متیل استر را نشان می‌دهد. شکل ۶-ج نشان می‌دهد نرخ افزایش درصد تبدیل بیودیزل از نسبت مولی ۱:۴ به ۱:۶، ۱:۶ به ۱:۸ و ۱:۸ به ۱:۱۰ درصد افزایش یافته و سپس از نسبت مولی ۱:۶ به ۱:۸ به میزان ۱/۲ درصد کاهش یافته است. دلیل این کاهش این بود که افزایش مقدار متانول در مخلوط با میزان بالاتر، انحلال بین محصول جانبی گلسیرین و مولکول‌های الکل واکنش نداده را در بیودیزل ایجاد کرده که بر غلظت و خلوص

محتوای متیل استر از ۰/۷۵ به ۱ درصد، ۳/۲ درصد افزایش و سپس از ۱ به ۱/۲۵ درصد محتوای متیل استر به میزان ۴/۷ درصد کاهش یافته است. دلیل این کاهش این است که افزودن بیش از حد کاتالیزور قلیایی می‌تواند باعث شود تری‌گلیسیریدهای بیشتری در واکنش جانبی صابونی سازی با KOH شرکت کنند و صابون بیشتری تولید کند و در نتیجه بازده را کاهش دهد (Encinar et al., 2012). علاوه بر این، افزایش مقدار کاتالیزور فراتر از حد بحرانی، حلالیت FAME در گلیسرین را نیز افزایش داده و منجر به از دست دادن قابل توجه بازده FAME شده که پس از جداسازی حالت، همچنان در حالت گلیسرین باقی می‌ماند (Noureddini et al., 1998). الکترون‌های پرانرژی در پلاسما می‌توانند با سطح واکنش‌دهنده و کاتالیزورها ترکیب شوند و ساختارهای سخت کربنی C-C و C-H را متلاشی کنند و محصولات هیدروکربنی سبک‌تر با مصرف انرژی کمتری حاصل کنند (Amin, 2006). اثر هم افزایی پلاسما با داشتن الکترون‌های پرانرژی، اتم‌های برانگیخته و ذرات خنثی که نقش کاتالیزوری دارند باعث فعال کردن واکنش‌دهنده‌ها در ناحیه تخلیه و یا حتی کمک به شکستن پیوند کووالانسی واکنش‌دهنده‌ها قبل از انجام واکنش اصلی را دارند. در نهایت تأثیر مثبت بر عملکرد و سرعت واکنش وجود دارد (Fridman, 2008) و محتوای متیل استر افزایش می‌یابد.

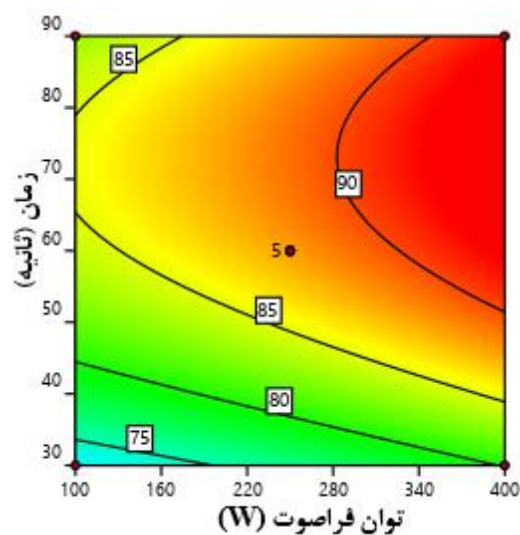
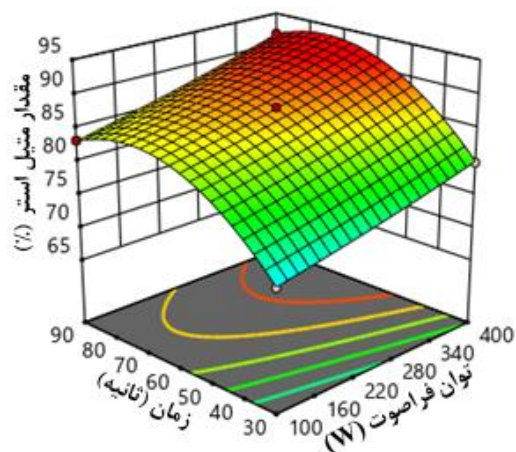
بیودیزل تأثیر منفی داشت (Samani et al., 2016). نتایج مشابهی را در مورد تأثیر نسبت مولی بر تبدیل متیل‌استر گزارش کردند. افزایش نسبت مولی تا میزان بهینه و بیشتر شدن متانول، پدیده حفره‌زایی اضافی را ایجاد می‌کند. در نتیجه باعث امتزاج‌پذیری بین متانول و حالت روغن و میزان امولسیون شدن (اندازه قطرات کوچک‌تر) را افزایش می‌دهد. بدین ترتیب فضای اضافی برای واکنش فراهم می‌شود که در نتیجه خلوص FAME و بازده بیودیزل افزایش می‌یابد (Malani et al., 2017b). علاوه بر این، تولید رادیکال‌های RO- با افزایش نسبت مولی متانول به روغن استری شده افزایش یافته که سرعت واکنش ترانس استریفیکاسیون را تسریع می‌کند (Malani et al., 2017a). از آنجایی که نسبت مولی متانول به روغن قادر به تعیین جهت ترانس استری شدن است، استفاده از پلاسما و با بالا رفتن نسبت مولی، باعث می‌شود یون‌های متوکسید بیشتری در اثر حمله الکترون‌های پرانرژی به متانول تشکیل شده که این یون‌ها منجر به جدا شدن بیشتر پیوند گلیسرید روغن می‌شوند. بنابراین، واکنش ترانس استریفیکاسیون به جلو پیش می‌رود (Hyun et al., 2012).

مطابق شکل ۶-د، با افزایش درصد کاتالیزور از ۰/۷۵ به ۱٪، محتوای متیل استر ابتدا افزایش یافته و سپس از درصد کاتالیزور ۱٪ به ۱/۲۵٪ کاهش می‌یابد. نرخ افزایش

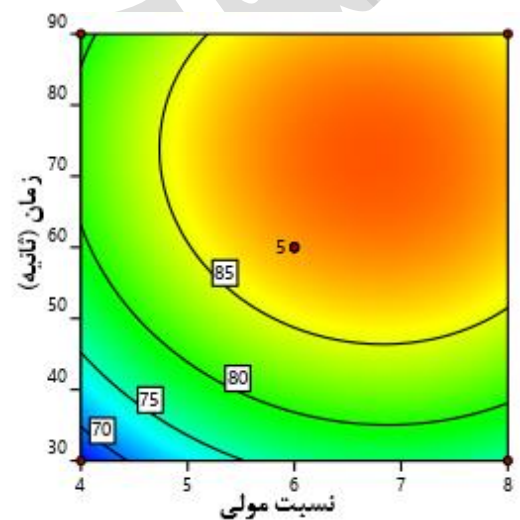
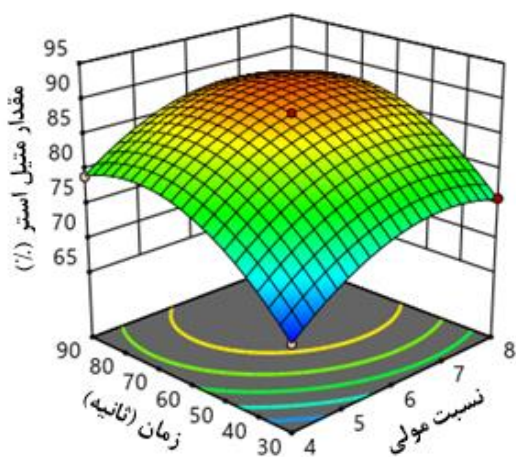


(الف)

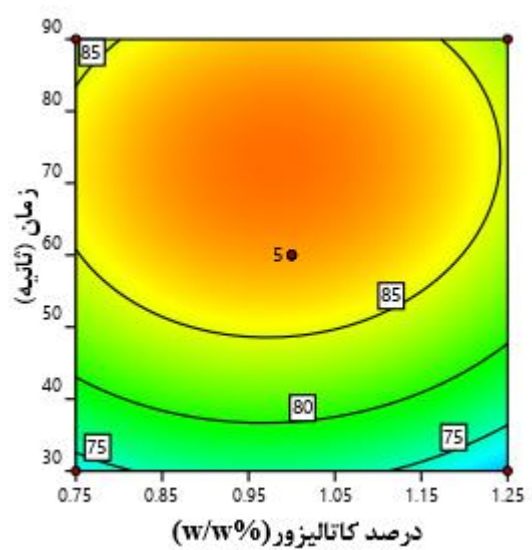
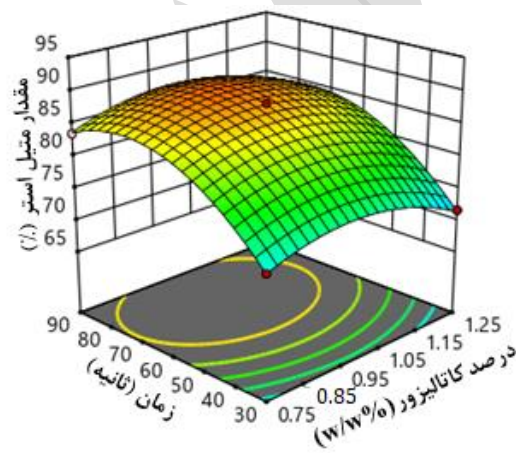
شکل ۵- تأثیر متقابل متغیرهای مستقل بر محتوای متیل استر



(ب)

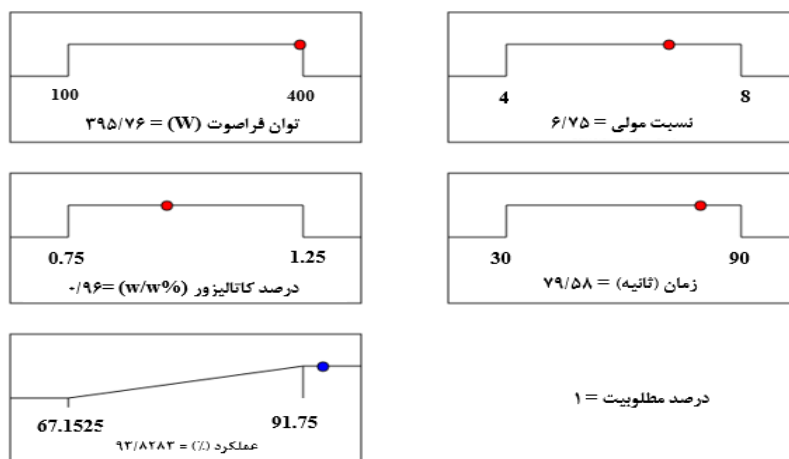


(ج)



(د)

ادامه شکل ۵- تأثیر متقابل متغیرهای مستقل بر محتوای متیل استر



شکل ۶- بهینه‌سازی فرآیند بر اساس مدل سطح پاسخ برای یک سامانه پلاسمای سرد - فراصوت

اندک بین مقدار بهینه نظری و مقدار بهینه به دست آمده در آزمایشگاه، صحت روش بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

خصوصیات بیودیزل تولید شده

بیودیزل تولید شده باید استانداردهای سوخت را برای استفاده به عنوان سوخت جایگزین خالص و یا مخلوط سوخت دیزل-بیودیزل در موتورهای دیزلی داشته باشد. پس از شستشو و خالص‌سازی بیودیزل تولیدی، چندین ویژگی مهم آن بر اساس استاندارد ASTM D6751 اندازه‌گیری شد. نتایج در جدول ۵ نشان داده شده است. مشخصات اصلی متیل‌استر روغن آفتابگردان، یعنی چگالی، لزجت، عدد اسیدی، عدد یدی و عدد ستان با استفاده از استاندارد اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که برخی از ویژگی‌های متیل‌استر آفتابگردان با استانداردهای ASTM D6751 بیودیزل مطابقت دارد بنابراین می‌تواند به طور مؤثری جایگزین دیزل شود.

بهینه‌سازی متغیرهای مستقل مؤثر بر عملکرد

سامانه ترکیبی جت ACP - فراصوت

پس از مشخص شدن اثر متغیرهای توان فراصوت، نسبت مولی، درصد کاتالیزور و زمان، بر افزایش محتوای متیل‌استر، مقادیر بهینه متغیرها برای حالتی که بیشترین بازده واکنش رخ دهد تعیین شدند. نتایج بهینه‌سازی پیشنهادی نرم‌افزار نسبت مولی ۶/۷۵، توان فراصوت ۳۹۵/۷۶ وات، درصد کاتالیزور ۰/۹۶ و زمان واکنش ۷۹/۵۸ ثانیه بود. مقدار بازده بیودیزل در نقاط بهینه ۹۳/۸۲ درصد توسط نرم‌افزار تعیین گردید (شکل ۶). برای صحت‌سنجی، نقاط پیشنهادی در آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار گرفتند. بدین منظور مقدار متغیرهای مستقل به نزدیک‌ترین عدد صحیح گرد شدند تا قابلیت اجرای عملی داشته باشند. بر این اساس، نسبت مولی ۷، توان فراصوت ۴۰۰ وات، درصد کاتالیزور ۱ درصد و زمان واکنش ۸۰ ثانیه به دست آمد. میزان افزایش بازده واکنش در آزمایشگاه برابر با ۹۴٪ تعیین گردید. اختلاف

جدول ۵- خواص متیل‌استر تولیدی در مقایسه با استانداردهای بیودیزل (EN 14214) و دیزل

خواص	واحدها	EN 14214	متیل‌استر	دیزل	روش آزمون
لزجت سینماتیک	mm ² /s	۵-۳/۵	۴/۱۵	۲/۹۶	ASTM D445
عدد اسیدی	mg KOH/g	بیشینه ۰/۵۰	۰/۴۱	۰/۱۸	ASTM D664
چگالی در ۱۵°C	g/cm ³	۰/۹۰-۸۶/۰	۰/۸۸	۰/۸۶۱	ASTM D4052
عدد یدی	g iodine/100 g	بیشینه ۱۲۰	۱۲۳	-	AOAC CD1-25
عدد ستان	-	حداقل ۵۱	۶۱	۵۱	ASTM D613
مقدار متانول	%volume	بیشینه ۰/۲	۰/۱۷	-	EN14110
آب و رسوبات	%volume	بیشینه ۰/۰۵	۰/۰۴	-	ASTMD2709
گلیسرین آزاد	%mass	۰/۰۲	۰/۰۱۲	-	ASTMD6584
کل گلیسرین	%mass	۰/۲۴	۰/۲۱	-	ASTMD6584

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف ارزیابی ترکیب جت پلاسما-فراصوت در تولید بیودیزل از روغن آفتابگردان به منظور دستیابی به بیشینه بازده در تولید بیودیزل انجام شد. نتایج نشان داد که با استفاده از این سامانه ترکیبی و افزایش توان فراصوت از ۱۰۰ به ۴۰۰ وات محتوای متیل استر به میزان ۸/۱ درصد افزایش یافته است. چرا که افزایش توان فراصوت منجر به افزایش سطح تماس بین واکنش دهنده-ها و افزایش عملکرد می‌شود. با افزایش نسبت مولی از ۱:۴ به ۱:۶ محتوای متیل استر به میزان ۱۵/۷ درصد افزایش یافته است. در واقع استفاده از پلاسما و افزایش نسبت مولی باعث می‌شود یون‌های متوکسید بیشتری در اثر حمله الکترون‌های پر انرژی به متانول تشکیل شده و پیوندهای بیشتری در واکنش دهنده‌ها از یکدیگر جدا شوند. افزایش درصد کاتالیزور از ۰/۷۵ به ۱ درصد منجر به افزایش محتوای متیل استر به میزان ۳/۲ درصد و افزایش تا ۱/۲۵ درصد منجر به کاهش ۴/۷ درصدی محتوای متیل استر شده است؛ به دلیل اینکه افزایش کاتالیزور بیشتر منجر به صابونی شدن واکنش و کاهش بازده می‌شود. در نهایت افزایش زمان واکنش از ۳۰ به ۶۰ ثانیه منجر به افزایش محتوای متیل استر به میزان ۱۲ درصد شد. نتایج نشان داد که زمان، بیشترین تأثیر را بر کارایی بیودیزل در استفاده از جت پلاسما-فراصوت دارد. در شرایط بهینه، بیشینه بازده توسط جت پلاسما در ۷۹/۵۸ ثانیه، درصد کاتالیزور ۰/۹۶، توان فراصوت ۳۹۵/۷۶ و نسبت مولی الکل به روغن ۶/۷۵ برابر با ۹۳/۸۲ درصد به دست آمد. نقطه بهینه مورد آزمایش قرار گرفت و تجزیه و تحلیل بیودیزل تولیدی نشان داد که برخی از خواص سوخت توسط سامانه پیشنهادی دارای ویژگی‌های ذکر شده در استاندارد ASTM D6751 است. بنابراین تولید بیودیزل با استفاده از سامانه پیشنهادی می‌تواند جایگزین مناسبی برای گازوئیل معمولی باشد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، تولید بیودیزل با این روش نسبت به روش معمول منجر به کاهش زمان واکنش و دمای واکنش و افزایش راندمان تولید می‌شود. از طرفی استفاده از این روش در مقایسه با روش‌های معمولی نیاز به استفاده از مقادیر زیاد متانول و کاتالیزور را از بین می‌برد و مقرون به صرفه بودن آن را از نظر اقتصادی ثابت می‌کند.

با توجه به ماهیت ناشناخته واکنش‌های شیمیایی ایجاد شده در فرآیند ترانس‌استری شدن توسط پلاسما، پیشنهاد می‌شود محققان در تحقیقات آتی خود این واکنش‌ها را بررسی کنند. همچنین، ترکیب پلاسما با روش‌های دیگر می‌تواند بیشینه انتقال جرم را بین پلاسما و محلول واکنشی ایجاد کند.

منابع

- Abdul-Majeed, W. S., AAl-Thani, G. S., & Al-Sabahi, J. N. (2016). Application of flying jet plasma for production of biodiesel fuel from wasted vegetable oil. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 36(6): 1517-1531.
- Allami, H. A., Tabasizadeh, M., Rohani, A., Nayebyzadeh, H., & Farzad, A. (2020). Effect of ultrasonic irradiation on the properties and performance of biodiesel produced from date seed oil used in the diesel engine. *Ultrasonics sonochemistry*, 60: 104672.
- Amin, N. A. S. (2006). Co-generation of synthesis gas and C2+ hydrocarbons from methane and carbon dioxide in a hybrid catalytic-plasma reactor: A review. *Fuel*, 85(5-6): 577-592.
- Banković-Ilić, I. B., Stamenković, O. S., & Veljković, V. B. (2012). Biodiesel production from non-edible plant oils. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(6): 3621-3647.
- Bet-Moushoul, E., Farhadi, K., Mansourpanah, Y., Nikbakht, A. M., Molaei, R., & Forough, M. (2016). Application of CaO-based/Au nanoparticles as heterogeneous nanocatalysts in biodiesel production. *Fuel*, 164: 119-127.
- Buchori, L., Istadi, I., & Purwanto, P. (2016). Advanced chemical reactor technologies for biodiesel production from vegetable oils-a review. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 11(3): 406-430.
- Buchori, L., Istadi, I., Purwanto, P., Kurniawan, A., & Maulana, T. I. (2016). Preliminary testing of hybrid catalytic-plasma reactor for biodiesel production using modified-carbon catalyst. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis*, 11(1): 59-65.
- Capocelli, M., Musmarra, D., Prisciandaro, M., & Lancia, A. (2014). Chemical effect of hydrodynamic cavitation: simulation and experimental comparison. *AIChE Journal*, 60(7): 2566-2572.
- De, R., Bhartiya, S., & Shastri, Y. (2019). Multi-objective optimization of integrated biodiesel production and separation system. *Fuel*, 243: 519-532.

- process. *Bioresource technology*, 304: 123017.
- Hernando, J., Leton, P., Matia, M. P., Novella, J. L., & Alvarez-Builla, J. (2007). Biodiesel and FAME synthesis assisted by microwaves: homogeneous batch and flow processes. *Fuel*, 86(10-11): 1641-1644.
- Hiwot, T. (2017). Determination of oil and biodiesel content, physicochemical properties of the oil extracted from avocado seed (*Persea Americana*) grown in Wonago and Dilla (gedeo zone): southern Ethiopia. *Chem. Int*, 3(3): 311-319.
- Ho, W. W. S., Ng, H. K., & Gan, S. (2016). Advances in ultrasound - assisted transesterification for biodiesel production. *Applied Thermal Engineering*, 100: 553-563.
- Hosseinizadeh Samani, B., Ansari Samani, M., Ebrahimi, R., Esmaeili, Z., & Ansari Ardali, A. (2020). Energy, exergy, and environmental analysis and optimization of biodiesel production from rapeseed using ultrasonic waves. *Journal of Renewable Energy and Environment*, 7(1): 51-61.
- Hosseinizadeh Samani, B., Ansari Samani, M., Shirneshan, A., Fayyazi, E., Najafi, G., & Rostami, S. (2020). Evaluation of an enhanced ultrasonic-assisted biodiesel synthesized using safflower oil in a diesel power generator. *Biofuels*, 11(4): 523-532.
- Huang, J., Zhao, Q., Bu, W., Zhang, C., Yang, Z., Zhang, X., & Zhang, K. (2020). Ultrasound-assisted hydrolysis of lard for free fatty acids catalyzed by combined two lipases in aqueous medium. *Bioengineered*, 11(1): 241-250.
- Hyun, Y. J., Mok, Y. S., & Jang, D. I. (2012). Transesterification of vegetable oils in pulsed-corona plasma discharge process. *Journal of the Korean Applied Science and Technology*, 29(1): 81-87.
- Istadi, I., Anggoro, D. D., Marwoto, P., Suherman, S., & Nugroho, B. T. (2009). Biodiesel production from vegetable oil over plasma reactor: optimization of biodiesel yield using response surface methodology. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 4(1): 23-31.
- Krishnamurthy, K. N., Sridhara, S. N., & Kumar, C. A. (2020). Optimization and kinetic study of biodiesel production from *Hydnocarpus wightiana* oil and dairy waste scum using snail shell CaO nano catalyst. *Renewable Energy*, 146: 280-296.
- Malani, R. S., Goyal, A., & Moholkar, V. S. (2017). Ultrasound-assisted biodiesel synthesis: a mechanistic insight. In *Biofuels* (pp. 103-135). Springer, Singapore.
- Dharma, S. M. H. H., Masjuki, H. H., Ong, H. C., Sebayang, A. H., Silitonga, A. S., Kusumo, F., & Mahlia, T. M. I. (2016). Optimization of biodiesel production process for mixed *Jatropha curcas*-*Ceiba pentandra* biodiesel using response surface methodology. *Energy Conversion and Management*, 115: 178-190.
- Elkady, M. F., Zaatout, A., & Balbaa, O. (2015). Production of biodiesel from waste vegetable oil via KM micromixer. *Journal of Chemistry*, 2015.
- Encinar, J. M., Pardal, A., & Martínez, G. (2012). Transesterification of rapeseed oil in subcritical methanol conditions. *Fuel processing technology*, 94(1): 40-46.
- Farvardin, M., Hosseinizadeh Samani, B., Rostami, S., Abbaszadeh-Mayvan, A., Najafi, G., & Fayyazi, E. (2019). Enhancement of biodiesel production from waste cooking oil: ultrasonic-hydrodynamic combined cavitation system. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-15.
- Fayyazi, E., Ghobadian, B., Najafi, G., & Hosseinizadeh, B. (2014). Genetic algorithm approach to optimize biodiesel production by ultrasonic system. *Chemical Product and Process Modeling*, 9(1): 59-70.
- Fayyazi, E., Ghobadian, B., van de Bovenkamp, H. H., Najafi, G., Hosseinizadehsamani, B., Heeres, H. J., & Yue, J. (2018). Optimization of biodiesel production over chicken eggshell-derived CaO catalyst in a continuous centrifugal contactor separator. *Industrial & engineering chemistry research*, 57(38): 12742-12755.
- Fridman, A. (2008). Plasma chemistry. Cambridge university press.
- Gan, L., Zhang, S., Poorun, D., Liu, D., Lu, X., He, M., & Chen, H. (2018). Medical applications of nonthermal atmospheric pressure plasma in dermatology. *JDDG: Journal der Deutschen Dermatologischen Gesellschaft*, 16(1): 7-13.
- Gogate, P. R., Sutkar, V. S., & Pandit, A. B. (2011). Sonochemical reactors: important design and scale up considerations with a special emphasis on heterogeneous systems. *Chemical Engineering Journal*, 166(3): 1066-1082.
- Gülyurt, M. Ö., Özçimen, D., & Inan, B. (2016). Biodiesel production from *Chlorella protothecoides* oil by microwave-assisted transesterification. *International journal of molecular sciences*, 17(4): 579.
- He, C., Mei, Y., Zhang, Y., Liu, L., Li, P., Zhang, Z., ... & Jiao, Y. (2020). Enhanced biodiesel production from diseased swine fat by ultrasound-assisted two-step catalyzed

- Samani, B. H., Zareiforoush, H., Lorigooini, Z., Ghobadian, B., Rostami, S., & Fayyazi, E. (2016). Ultrasonic-assisted production of biodiesel from *Pistacia atlantica* Desf. oil. *Fuel*, 168: 22-26.
- Sharma, A., Kodgire, P., & Kachhwaha, S. S. (2020). Investigation of ultrasound-assisted KOH and CaO catalyzed transesterification for biodiesel production from waste cottonseed cooking oil: Process optimization and conversion rate evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 259: 120982.
- Sharma, Y. C., Singh, B., & Upadhyay, S. N. (2008). Advancements in development and characterization of biodiesel: A review. *Fuel*, 87(12): 2355-2373.
- Shi, W., Li, J., He, B., Yan, F., Cui, Z., Wu, K., & Cheng, Y. (2013). Biodiesel production from waste chicken fat with low free fatty acids by an integrated catalytic process of composite membrane and sodium methoxide. *Bioresource technology*, 139: 316-322.
- Tan, S. X., Lim, S., Ong, H. C., & Pang, Y. L. (2019). State of the art review on development of ultrasound-assisted catalytic transesterification process for biodiesel production. *Fuel*, 235: 886-907.
- Malani, R. S., Patil, S., Roy, K., Chakma, S., Goyal, A., & Moholkar, V. S. (2017). Mechanistic analysis of ultrasound-assisted biodiesel synthesis with Cu₂O catalyst and mixed oil feedstock using continuous (packed bed) and batch (slurry) reactors. *Chemical engineering science*, 170: 743-755.
- Mandal, R., Singh, A., & Singh, A. P. (2018). Recent developments in cold plasma decontamination technology in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 80: 93-103.
- Meeprasertsagool, P., Watthanaphanit, A., Ueno, T., Saito, N., & Reubroycharoen, P. (2017). New insights into vegetable oil pyrolysis by cold plasma technique. *Energy Procedia*, 138: 1153-1158.
- Natesan, S., & Rajoo, B. (2018). Optimization, equilibrium and kinetic studies of basic red 2 removal onto waste *Gossypium hirsutum* Seeds. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 37(2): 157-169.
- Nisar, N., Mehmood, S., Nisar, H., Jamil, S., Ahmad, Z., Ghani, N. (2018). Brassicaceae family oil methyl esters blended with ultra-low sulphur diesel fuel (ULSD): Comparison of fuel properties with fuel standards. *Renewable Energy*, 117: 393-403.
- Noureddini, H., Harkey, D., & Medikonduru, V. (1998). A continuous process for the conversion of vegetable oils into methyl esters of fatty acids. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 75(12): 1775-1783.
- Nozaki, T., & Okazaki, K. (2013). Non-thermal plasma catalysis of methane: Principles, energy efficiency, and applications. *Catalysis today*, 211: 29-38.
- Phan, A. N., Harvey, A. P., & Rawcliffe, M. (2011). Continuous screening of base-catalysed biodiesel production using new designs of mesoscale oscillatory baffled reactors. *Fuel Processing Technology*, 92(8): 1560-1567.
- Rezania, S., Oryani, B., Park, J., Hashemi, B., Yadav, K. K., Kwon, E. E., ... & Cho, J. (2019). Review on transesterification of non-edible sources for biodiesel production with a focus on economic aspects, fuel properties and by-product applications. *Energy Conversion and Management*, 201: 112155.
- Samani, B. H., Behruzian, M., Najafi, G., Fayyazi, E., Ghobadian, B., Behruzian, A., & Yue, J. (2021). The rotor-stator type hydrodynamic cavitation reactor approach for enhanced biodiesel fuel production. *Fuel*, 283: 118821.

Research paper

Design, construction, and evaluation of a washing machine with water circulation system for agricultural tuber products

M. Ansari Samani¹, B. Hosseinzadeh Samani², M. Ghasemi Varnamkhasti³, S. Rostami⁴
and R. Ebrahimi⁵

Abstract

To respond to the huge demand for energy reduce the consumption of fossil fuels and reduce air pollution, the use of a green, clean, and stable biofuel is the only alternative. When a suitable precursor and process is used in the production of biodiesel, its replacement as an alternative fuel becomes more certain. This study aims to evaluate the combined jet plasma-ultrasonic reactor in biodiesel production. The use of plasma jet in the production of biodiesel is known as an advanced molecular decomposition process due to the use of strong electric fields in the transesterification process and has been the focus of researchers in recent years. Four factors: molar ratio of methanol to oil (1:4, 1:6, 1:8): catalyst concentration (0.75, 1, 1.25): time (30, 60, and 90 s): and ultrasonic power (100, 250 and 400 W) was investigated for biodiesel production in this combined system. Response surface methodology (RSM) was used to optimize the methyl ester content. In RSM optimization, the highest yield of biodiesel by the software was 93.82% in ultrasonic power of 395.76 W, molar ratio of 6.75, catalyst concentration of 0.96%w/w, and reaction time of 79.58 s. The physical and chemical characteristics of the produced biodiesel were following the ASTM D6751 standard. In general, the results show that the biodiesel produced through this combined system saves time with the highest conversion efficiency.

Keywords: Ultrasound, Biodiesel production, Biofuel, Plasma jet, Transesterification.

Citation: Ansari Samani M. Hosseinzadeh Samani B. Ghasemi Varnamkhasti Rostami S. and Ebrahimi R. 2023. Design, construction, and evaluation of a washing machine with water circulation system for agricultural tuber products. *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*. 29: ??-??.
<https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.14230.650>

1- Ph.D. Graduate, Department of Biosystem Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

2- Associate Professor, Department of Biosystem Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

3- Associate Professor, Department of Biosystem Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

4- Associate Professor, Department of Biosystem Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

5- Professor, Department of Biosystem Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

Responsible Author: b.hosseinzadehsamani@gmail.com

Received: 2023/01/24

Accepted: 2023/05/08

<https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.14230.650>