

بهینه‌سازی عملکرد رآکتور حفره‌زای هیدرودینامیکی جهت تولید بیودیزل به کمک سطح پاسخ (مطالعه موردی: روغن آفتابگردان)

حسین جوادی کیا^{۱*} - یوسف نصرتی^۲ - مصطفی مصطفایی^۳ - لیلا ندرلو^۴ - میثم طباطبایی^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۹/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۲/۰۴

چکیده

توسعه و به کارگیری فن‌آوری‌های شدت بخشی فرآیند تولید بیودیزل در واکنش ترانس استریفیکاسیون جهت بهبود فرآیند همزنی و انتقال جرم و حرارت بین دو فاز مایع واکنش، منجر به ابداع رآکتورهای جدید شد که این امر سبب افزایش بازده واکنش و کاهش زمان تولید سوخت بیودیزل شده است. بنابراین، در این تحقیق عملکرد رآکتور حفره‌زای هیدرودینامیکی ساخته شده که جزء رآکتورهای نوین و قابل توسعه در ابعاد صنعتی می‌باشد، بررسی شد تا تنظیمات دقیق رآکتور برای تولید بیودیزل بهینه شود. روغن مورد استفاده در این آزمایش، روغن آفتابگردان بود و نسبت مولی متانول به روغن ۶ به ۱ در نظر گرفته شد. همچنین، از هیدروکسید سدیم به عنوان کاتالیزور قلیایی با درصد وزنی ۰/۱ نسبت به روغن استفاده گردید. موارد مورد مطالعه دور رآکتور، دبی سیال ورودی به رآکتور و مدت زمان چرخش سیال در رآکتور بود. نمونه‌های حاصل توسط دستگاه کروماتوگراف گازی تجزیه و تحلیل شد و درصد متیل استر تولید شده استخراج شد. سپس به کمک روش سطح پاسخ با استفاده از نرم افزار Design Expert عملکرد رآکتور مدل شد و در فرآیند بهینه‌سازی بهترین شرایط تولید بیودیزل بررسی گردید. بهترین عملکرد در تولید بیودیزل: دبی سیال ورودی ۰/۸۶ لیتر بر دقیقه، زمان گردش ۱/۰۲ دقیقه و سرعت دورانی رآکتور ۸۴۴۷ دور بر دقیقه با عملکرد ۶/۱۹ میلی‌گرم بر کیلوژول حاصل شد که بهترین خلوص بیودیزل تولیدی بالغ بر ۸۸ درصد متیل استر بود.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، بیودیزل، ترانس استریفیکاسیون، روش سطح پاسخ

مقدمه

بیودیزل مانع اصلی تولید تجاری آن می‌باشد که استفاده از روغن‌های پسماند، انطباق با فرآیند پیوسته ترانس استریفیکاسیون و بازیافت گلیسرین^۶ با کیفیت بالا از بیودیزل از مواردی هستند که هزینه تمام شده بیودیزل را کمتر می‌کنند (Fangrui and Milford, 1999). البته کیفیت بیودیزل تولیدی از روغن‌های پسماند برابر کیفیت بیودیزل تولید شده از روغن گیاهی می‌باشد (Mangesh and Ajay, 2006).

از بین روش‌های تولید بیودیزل، روش ترانس استریفیکاسیون معمول‌ترین روش تولید مونو آلکیل استرهای روغن گیاهی و چربی‌های حیوانی می‌باشد. البته روش مذکور با هدف کاهش ویسکوزیته^۷ روغن در طی واکنش بین تری‌گلیسرید و الکل در حضور کاتالیزور^۸ و یا بدون آن است. در تحقیق حاضر از روش ترانس استریفیکاسیون^۹ با کاتالیزور قلیایی^{۱۰} که معمول‌ترین و تجاری‌ترین روش تولید صنعتی بیودیزل می‌باشد، استفاده گردیده است. تولید

سوخت‌های گیاهی یکی از عمده‌ترین منابع تولید سوخت‌های تجدیدپذیر یا جایگزین سوخت‌های فسیلی محسوب می‌شوند. احتراق سوخت‌های با پایه گیاهی در واقع استفاده غیرمستقیم از انرژی خورشید می‌باشد. سوخت‌های گیاهی به‌طور عمده آلودگی‌های کمتری نسبت به سوخت‌های فسیلی دارند و به راحتی می‌توانند از بقایای مواد گیاهی تولید گردند. زباله‌ها و ته‌مانده‌های مربوط به غذاها و مواد دور ریختنی صنایع غذایی و همچنین فاضلاب می‌تواند منبع خوبی برای تولید سوخت‌های گیاهی باشند (Demirbas, 2009). هزینه تولید

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه رازی، کرمانشاه

(*) نویسنده مسئول: (Email: pjavadikia@gmail.com)

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۴- استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۵- استادیار، پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی ایران

DOI: 10.22067/jam.v7i1.51920

6- Glycerol

7- Viscosity

8- Catalyst

9- Transesterification

10- Alkaline catalyst

هیدرودینامیکی در مقایسه با رآکتورهای حفزه‌زایی صوتی بیشتر می‌باشد که به نوبه خود عملکرد تولید آن نیز بیشتر شده است. بنابر این اثر شدت بخشی مدل هیدرودینامیکی بیشتر است (*et Mandar*, 2008). در مقیاس تولید صنعتی نیز روش حفزه‌زایی هیدرودینامیکی راحت‌تر حاصل می‌شود (Jianbing, 2006). محققانی تأثیر تغییرات شکل و سطح را بر روی فرآیند حفزه‌زایی، به صورت آزمایشگاهی بررسی کرده‌اند و یافته‌های آن‌ها نشان داد که تغییرات فشار تابعی از تغییر ساختار و ابعاد ایجادکننده است (*Ozonek and Lenik*, 2011). برخی از پژوهشگران با تکنیک حفزه‌زایی هیدرودینامیکی که در آن از صفحه‌های سوراخ‌دار استفاده کرده‌اند، توانستند بیودیزلی با زمان ماند کمتر و کیفیت مناسب تولید نمایند (*Amit et al.*, 2010). در این تحقیق تنظیمات رآکتور حفزه‌زای هیدرودینامیکی ساخته شده مورد بررسی قرار گرفت تا کیفیت سوخت بیودیزل تولیدی اندازه‌گیری شده و عملکرد دستگاه با یافتن شرایط بهینه ارتقاء یابد. برای این منظور از نرم‌افزار Design Expert روش سطح پاسخ^۲ استفاده شد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از روش ترانس استریفیکاسیون استفاده شد. البته روش مذکور با هدف کاهش ویسکوزیته روغن در طی واکنش بین تری‌گلیسیرید و الکل در حضور کاتالیزور و یا بدون آن است (Demirbas, 2009). مواد مورد نیاز در تولید بیودیزل به روش ترانس استریفیکاسیون عبارتند از: روغن گیاهی، الکل، کاتالیزور. روغن مورد استفاده در فرآیند تولید بیودیزل، روغن گیاهی آفتاب‌گردان بوده که با توجه به روش تیتراسیون به مقدار ۰/۶ لیتر در فرآیند تولید هر آزمون استفاده شد. الکل مورد استفاده متانول ایرانی با درجه خلوص ۹۹/۸ درصد ساخت مجتمع صنایع شیمیایی و دارویی کیان کاوه آزما بود که طبق معادله تیتراسیون، با توجه به مراجع تحقیقاتی موجود بهترین نسبت به صورت نسبت مولی ۶ به ۱ استفاده شد (*Gharat and Rathod*, 2013; *Amit et al.*, 2014; *Liu and Wang*, 2013) که نسبت مولی الکل به روغن، در کلیه واکنش‌های تولیدی در این تحقیق بوده است. کاتالیزور به کار رفته در فرآیند تولید پیوسته، سدیم هیدروکسید با خلوص بالا (۹۹٪) ساخت شرکت صنایع شیمیایی دکتر مجللی بوده که از نوع کاتالیزورهای قلیایی است. به مقدار یک درصد وزنی از مقدار روغن به کار برده شده در واکنش استفاده شده است (*Amit et al.*, 2014). در تحقیق حاضر از روغن تازه آفتاب‌گردان که به تصفیه مواد اضافی و حذف آب احتمالی در آن نیازی نداشت استفاده شد. به منظور افزایش انحلال و واکنش‌پذیری کاتالیزور، محلول متوکسید (مخلوط کاتالیزور و متانول)، درون یک

سوخت بیودیزل به طور گسترده از اوایل دهه ۱۹۹۰ شروع شد و تا امروز تولید آن به شدت در حال افزایش است. با این‌که سوخت بیودیزل یک محصول از منابع تجدیدپذیر است، اما بعضی مسائل و مشکلاتی برای تولید با روش ترانس استریفیکاسیون وجود دارد، مانند زمان تولید طولانی، هزینه تولید بالاتر، بازده تولید کمتر و غیره که لازم است در طراحی و ساخت سیستم‌های تولید بیودیزل به آن‌ها پرداخته شود تا تولید سوخت بیودیزل بهینه و به صرفه‌تر گردد. در سال‌های اخیر مطالعات در رابطه با تولید بیودیزل به سمت توسعه فناوری شدت بخشی فرآیند متمرکز شده است تا بتواند برخی از مسائل مذکور را برطرف سازد. این فن‌آوری‌ها شامل رآکتورهای جدید و یا ترکیبی از رآکتور و جداکننده‌ها هستند که بعضی از خصوصیات فن‌آوری شدت بخشی واکنش‌ها، همچون همزنی، انتقال حرارت و انتقال جرم بین دوفاز مایع در فرآیند تولید بیودیزل را دارا می‌باشند (*Qiu et al.*, 2010). بعضی از توسعه‌های اخیر استفاده از توان فراصوت، حفزه‌زایی هیدرودینامیکی^۱ و فرآیند متانول فوق بحرانی می‌باشد. در میان این نوآوری‌های فناوری بیودیزل، حفزه‌زایی هیدرودینامیکی یک روش با پتانسیل بالا برای تولید بیودیزل در مقیاس صنعتی است که توانایی توسعه راحت‌تری را دارا می‌باشد (*Amit et al.*, 2010). برای ایجاد حفزه‌زایی هیدرودینامیکی به طور ساده در مسیر جریان چرخه‌ای که ایجاد می‌شود، از انواع روزنه‌ها با صفحه‌های تک‌سوراخه یا چندسوراخه استفاده می‌شود که با عبور جریان از آن‌ها، افزایش سرعت خود باعث افت فشار می‌شود. شدت حفزه‌زایی رابطه مستقیمی با ابعاد منفذ صفحه دارد. از جهتی برای افزایش سطح مقطع خط لوله اصلی که باعث کاهش نرخ جریان و به تبع آن افزایش فشار و نوسانات آن خواهد شد، ابعاد دیگر ایجاد حفزه‌زایی همچون افزایش و افت جریان به طور جدی مورد توجه قرار می‌گیرد (*Amit et al.*, 2014). استفاده از قدرت مافوق صوت جهت حفزه‌زایی و حفزه‌زایی هیدرولیکی هر دو بازده انرژی خوبی داشته و باعث کوتاه‌تر شدن زمان واکنش با مصرف انرژی کمتر نسبت به روش مکانیکی معمول می‌شوند (Jianbing, 2006). در رابطه با مقایسه کاربرد رآکتورهای مجهز به تجهیزات حفزه‌زایی هیدرودینامیکی و یا حفزه‌زایی فراصوتی، با در نظر گرفتن تعریف عملکرد حفزه‌زایی که به عنوان پارامتر اصلی می‌باشد، نسبت به انرژی صرف شده برای سیستم تولید بیودیزل می‌توان عملکرد تولید را مشخص نمود. با توجه به هزینه ترکیبات و انرژی صرف شده، محاسبه هزینه واقعی انجام عملیات تولید بیودیزل، بسیار مهم است. انرژی صرف شده برای فرآیند حفزه‌زایی بستگی به تجهیزات به کار برده شده دارد (*Mandar et al.*, 2008). در تحقیقات انجام شده توسط محققان مشاهده شد که بازده انرژی رآکتورهای حفزه‌زایی

می‌توان میزان کیفیت سوخت و قابلیت‌های آن را بیان نمود. از جمله استانداردهایی که برای بیودیزل تعریف شده است شامل EN14214-08، ASTM D6751-09 و DIN V51606 می‌شود. چنانچه بیودیزل تولیدی با این استانداردها همخوانی داشته باشد به‌عنوان سوخت بیودیزل یا B100 قابل استفاده است (Mostafaei, 2012). راکتور مورد استفاده جهت تولید پیوسته بیودیزل به‌کمک حفره‌زایی هیدرودینامیکی مرکب، شامل قسمت‌های مختلفی است که در شکل ۱ نشان داده شده است.

محاسبه عملکرد حفره‌زایی هیدرودینامیکی

جهت محاسبه میزان عملکرد حفره‌زایی انجام گرفته، مطابق رابطه (۱) نسبت جرم بیودیزل تولید شده به حجم روغن استفاده شده را بر انرژی مصرفی به‌ازای هر لیتر تقسیم می‌کنیم (Vichare et al., 2000).

$$Y_C = \frac{\text{Biodiesel (mg.litr}^{-1}\text{)}}{\text{power} \times t \text{ (J.litr}^{-1}\text{)}} \quad (1)$$

در این تحقیق میزان توان مصرفی سیستم که الکتریکی است طبق رابطه (۲) با اندازه‌گیری ولتاژ و آمپر مصرفی هر آزمایش به‌طور جداگانه، محاسبه شد. سپس این مقدار که برحسب وات می‌باشد برای زمان واکنش هر آزمایش ضرب شده و در رابطه (۱) قرار گرفته است.

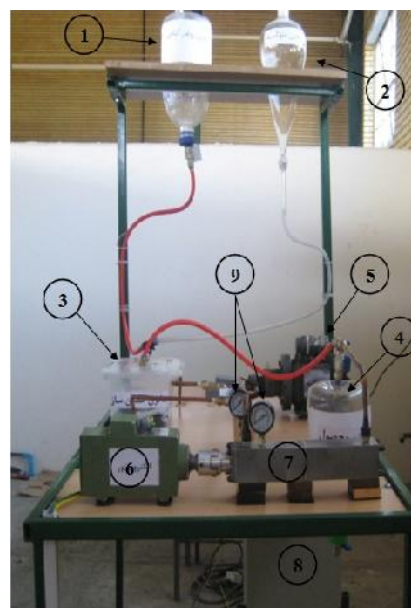
$$P(W) = V(V) \times I(A) \quad (2)$$

روش سطح پاسخ

روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های ریاضی و آماری است که برای توسعه، پیشبرد و بهینه‌سازی فرآیندهایی به‌کار می‌رود که در آن‌ها سطح مورد نظر تحت تأثیر متغیرهای بسیاری قرار داشته و هدف، بهینه کردن پاسخ مزبور است. به‌عبارت دیگر این روش به‌کمک نرم‌افزار Design Expert با روابط آماری و ریاضی پیشرفته، پارامتر مشخصی را براساس ورودی‌های مورد نظر مدل می‌کند به‌طوری‌که تعداد مجموعه داده‌های ورودی و خروجی در کمترین حد ممکن باشد. لذا در مواردی که امکان داده‌برداری بسیار مشکل بوده و یا هزینه‌بر می‌باشد به‌خوبی کاربرد دارد (Khuri and Mukhopadhyay, 2010).

برای بهینه‌سازی عملکرد دستگاه سه تنظیم مهم راکتور در نظر گرفته شد که عبارتند از: دبی ورودی به راکتور، دور راکتور و مدت زمان چرخش سیال در راکتور. هر تنظیم در سه سطح در نظر گرفته شد. در صورتی‌که از آزمایش فاکتوریل برای تجزیه و تحلیل استفاده شود، بدون هیچ تکرار ۲۷ وضعیت وجود خواهد داشت که با توجه به هزینه‌های تجزیه و تحلیل هر نمونه توسط دستگاه GC عملاً امکان‌پذیر نبود. لذا از روش سطح پاسخ و به‌کمک نرم‌افزار

ظرف جداگانه با استفاده از یک همزن مغناطیسی مدل MR3001 ساخت شرکت لیدهولف آلمان حل شد و سپس به درون مخزن اولیه متانول انتقال داده شد (به‌بیان دیگر کاتالیزور و متانول قبل از واکنش ترانس استریفیکاسیون تهیه شد). در واقع در این حالت، تعداد مولکول‌های کاتالیزور بیشتری به‌صورت یکنواخت و همگن در دسترس مولکول‌های متانول و روغن بوده و واکنش با سرعت بیشتری انجام خواهد گرفت. جهت اندازه‌گیری میزان تأثیر روش حفره‌زایی هیدرودینامیکی با راکتور ابداعی تولید بیودیزل، در این تحقیق در پایان هر آزمایش، ۱۵ میلی‌لیتر از نمونه‌های تولیدی را برداشته و در ظرف مخصوص ۱۵ میلی‌لیتر محصولات شیمیایی، نمونه‌ها به داخل یخچال با دمای ۵- درجه سانتی‌گراد منتقل شد تا واکنش در همان مرحله زمانی متوقف شود و تأثیر پارامترهای دستگاه ساخته شده و میزان شدت بخشی واکنش تعیین شود. البته این شرایط تا زمان تجزیه با دستگاه کروماتوگراف گازی (GC) حفظ شده است (Mostafaei, 2012).



شکل ۱- راکتور حفره‌زایی هیدرودینامیکی مورد استفاده (۱- مخزن روغن، ۲- مخزن متوکسید، ۳- مخزن همگن‌ساز، ۴- مخزن بیودیزل تولیدی، ۵- پمپ با جابه‌جایی مثبت، ۶- الکتروموتور، ۷- راکتور حفره‌زایی هیدرودینامیکی، ۸- اینورتر و ۹- فشارسنج)

Fig.1. Used hydrodynamic cavitations reactor (1- Oil tank, 2-Metoxed tank, 3- Homogenizer tank, 4- Biodiesel tank, 5- Positive displacement pump, 6- Electro motor, 7- Hydrodinamic cavitation reactor, 8- Inverter and 9- Pressure indicator)

سوخت بیودیزل تولید شده دارای خواص و ویژگی‌هایی می‌باشد که با مطابقت دادن آن خواص با استانداردها و قراردادهای بین‌المللی

متغیرها و محدوده آن‌ها، نرم‌افزار تعداد آزمایش‌های لازم با متغیرهای Expert_Design استفاده شد. به عبارت دیگر بعد از تعریف تعداد مربوطه را تعیین نموده است. در جدول ۲ محدوده پارامترهای ورودی و کدهای هر کدام در نرم‌افزار Design Expert نشان داده شده است.

جدول ۱- محدوده پارامترهای مستقل ورودی مدل و کدهای هر کدام در روش سطح پاسخ

Table 1- Input independent variables range and their encoded values in response surface method

متغیر ورودی Input variable	سطح تغییرات Variables ranges			برچسب Lable
	1 ()	0	-1 (-)	
دور (دور بر دقیقه) Reactor speed (rpm)	16000	12000	8000	A
دبی (لیتر بر دقیقه) Flow (lit min ⁻¹)	3.09	1.96	0.83	B
زمان (دقیقه) Time (min)	5	3	1	C

جدول ۲- نتایج مدل عملکرد رآکتور به روش سطح پاسخ

Table 2- The results of reactor performance model by response surface method

عامل Factor	مجموع مربعات خطا Sum square error	میانگین مربعات خطا Mean square error	درجه آزادی Freedom degree	ضریب معناداری p significant factor
مدل Model	47.54	5.28	9	0.0001>
دور رآکتور A-(rpm) Reactor rotational speed	0.46	0.46	1	0.0021
دبی ورودی رآکتور B – (lit min ⁻¹) Reactor inlet flow	0.13	0.13	1	0.0425
زمان کار رآکتور C –(min) Reactor time	39.34	39.34	1	0.0001>
AB	0.02	0.02	1	0.3596
AC	0.27	0.27	1	0.0083
BC	0.073	0.073	1	0.1006
A ²	0.15	0.15	1	0.0312
B ²	0.091	0.091	1	0.0726
C ²	6.76	6.76	1	0.0001>
باقی‌مانده (خطا) Residual (Error)	0.14	0.02	7	

جدول ۳- ضرایب تعیین مدل عملکرد رآکتور به روش سطح پاسخ

Table 3- The determination coefficient of performance model of reactor by RSM

R ²	Adjust R ²	R ² پیش‌بینی Predicted R ²	C.V. %
0.9970	0.9932	0.9814	5.29

نتایج و بحث

خروجی مدل در نظر گرفته شد. با استفاده از روابط (۱) و (۲)، بیشترین عملکرد حفرة‌زایی هیدرودینامیکی رآکتور برابر با ۶/۱۹ میلی‌گرم بر کیلوژول و کمترین عملکرد برابر با ۱/۱۳ میلی‌گرم بر کیلوژول شد. نتایج مدل مطابق جدول ۲ و ۳ می‌باشد. معادله حاصل بین ورودی‌ها و عملکرد رآکتور به صورت رابطه (۳) می‌باشد.

در تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از رآکتور و دستگاه GC^۱ توسط نرم‌افزار Design Expert سه پارامتر دور، دبی ورودی و زمان کار رآکتور به عنوان متغیرهای ورودی مدل و عملکرد رآکتور به عنوان

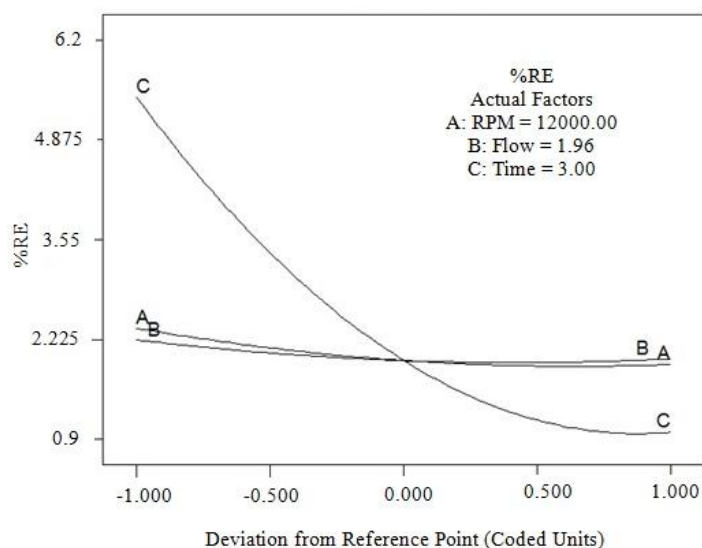
1- Gas Chromatography

نمودارهای سه‌بعدی مدل عملکرد رآکتور به کمک سطح پاسخ در مقابل سه ورودی دور، دبی و زمان کار رآکتور در شکل ۳ نشان داده شده است.

با توجه به شکل مذکور، عملکرد رآکتور به‌ازای کاهش سرعت دورانی و کاهش نرخ جریان، سیر صعودی داشته و بیشترین مقدار آن در دور ۸۴۴۷ دور بر دقیقه و نرخ جریان ۰/۸۶ لیتر بر دقیقه حاصل شد که برابر ۶/۳ میلی‌گرم بر کیلوژول می‌باشد. در ضمن عملکرد رآکتور به‌ازای کاهش زمان و سرعت دورانی سیر صعودی داشته ولی همانند اثر نرخ جریان بر روی عملکرد رآکتور، با گذشت زمان بیشتر موجب کاهش آن می‌گردد که به دلیل بازگشت‌پذیر بودن واکنش مذکور زمان کار بیشتر واکنش باعث کاهش عملکرد رآکتور می‌شود. همچنین عملکرد رآکتور به‌ازای افزایش زمان و کاهش نرخ جریان، سیر صعودی داشته و با گذشت زمان بیشتر عملکرد رآکتور کاهش یافته است. مناسب‌ترین زمان و نرخ جریان برای حصول عملکرد بیشینه در کمترین مقادیر نرخ جریان سیال و زمان واکنش ۱ دقیقه می‌باشد. با کاهش نرخ جریان عبوری از رآکتور عملکرد رآکتور بیشتر می‌شود (Visscher *et al.*, 2013) که این نتیجه از شکل‌های مذکور به روشنی پیدا می‌باشد.

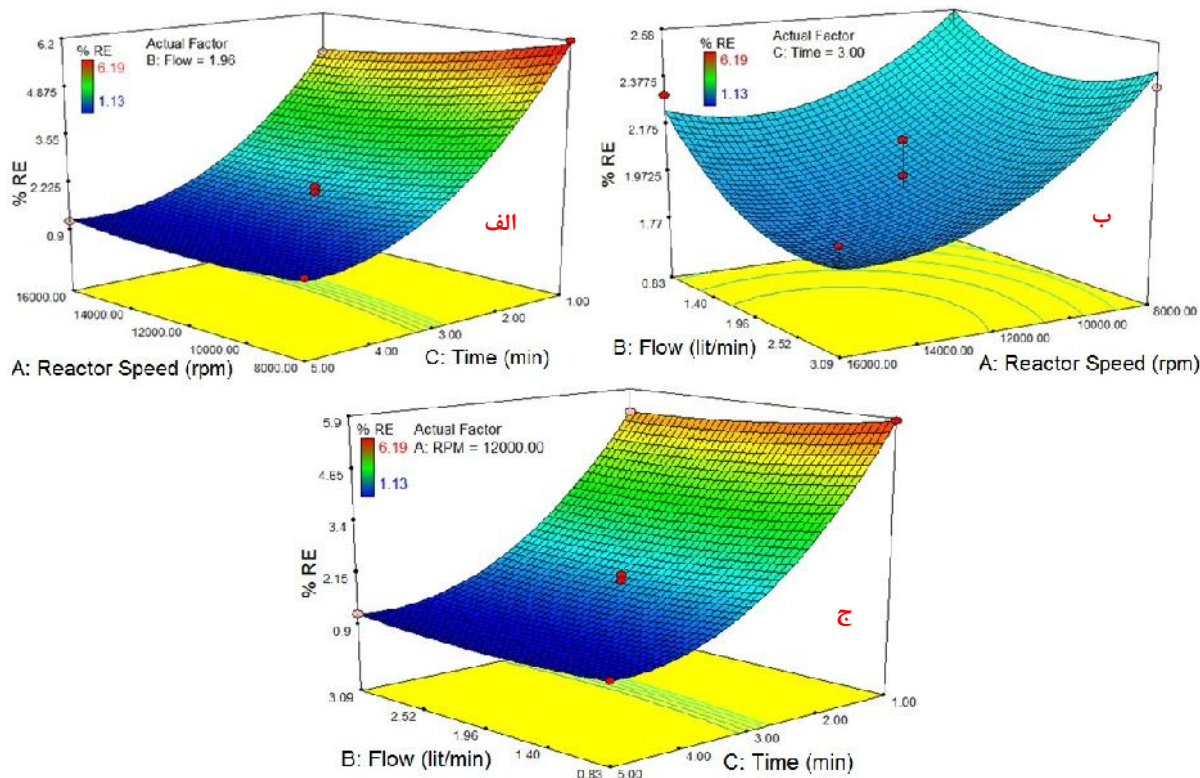
$$\begin{aligned} \text{عملکرد رآکتور} &= ۱۲/۳۴۲۰۶ - (\text{دور} \times ۴ - ۴/۰۷ E) - (\text{دبی} \times ۰/۵۵) - (\text{زمان} \times ۳/۵۱) - (\text{دور} \times \text{دبی} \times ۵ - E) \\ &+ (۱/۵۴۸) + (\text{دور} \times \text{زمان} \times ۵ - ۳/۲۵ E) + (\text{دبی} \times \text{زمان} \times ۰/۵۹) \\ &+ (\text{دور} \times \text{دور} \times ۸ - ۱/۱۶۸۷ E) + (\text{دبی} \times \text{دبی} \times ۰/۱۱۵) \\ &+ (\text{زمان} \times \text{زمان} \times ۰/۱۳۱۶) \end{aligned} \quad (۳)$$

نمودار برهم‌کنش بین ورودی‌های مدل نسبت به خروجی مدل در شکل ۲ نشان داده شده است. با افزایش دور و دبی ورودی رآکتور عملکرد آن اندکی کاهش می‌یابد. شاید علت این امر به دلیل افزایش توان مصرفی الکتروموتور و ثابت بودن تولید متیل استر باشد. اما نتایج ارزیابی سه زمان مختلف کار رآکتور ۱، ۳ و ۵ دقیقه نشان می‌دهد که با افزایش زمان، عملکرد رآکتور سیر نزولی دارد. علت آن را شاید بتوان به این صورت توجیه نمود که گلیسرین و متانول هر دو قطبی بوده و در همدیگر حل می‌شوند، لذا با افزایش زمان و تولید بیشتر گلیسرین، مقدار متانول بیشتری در آن حل و از دسترس واکنش اصلی خارج می‌شود. لذا واکنش به سمت تولید متانول برگشته و از بازده واکنش اصلی کاسته می‌شود. محققان دیگری (Capocelli *et al.*, 2014; Mostafaei, 2012; Jianbing, 2006) نتایج مشابهی را در رابطه با افزایش زمان واکنش و کاهش عملکرد رآکتور به‌دست آورده‌اند.



شکل ۲- برهم‌کنش ورودی‌های مدل نسبت به یکدیگر (محور افقی: پارامترهای ورودی کد شده، محور عمودی: درصد عملکرد رآکتور)

Fig.2. Interaction of model inputs relative to each other (Horizontal axis: the codes of input parameters, Vertical axis: Reactor efficiency)



شکل ۳- نتایج مدل سطح پاسخ برای عملکرد رآکتور (الف: دور و دبی، ب: دور و زمان، ج: دبی و زمان)

Fig.3. Results of response surface model for the reactor performance (A: reactor speed and flow, B: reactor speed and time, C: flow and time)

بیودیزل تولیدی را نشان می‌دهد. میزان گرانیوی سینماتیکی روغن آفتاب گردان با روش ترانس استریفیکاسیون به $4/2 \text{ (mm}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$ کاهش یافته است که نشان‌دهنده امکان استفاده مستقیم از این سوخت در موتور دیزل می‌باشد. این امر باعث افزایش عملکرد موتور می‌شود و سازگاری سوخت بیودیزل تولیدی را با موتورهای دیزل نشان می‌دهد.

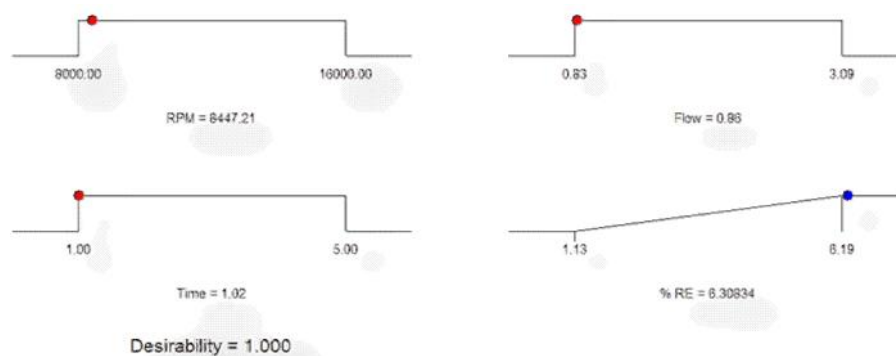
بعد از اندازه‌گیری درصد متیل استر در نمونه‌های رآکتور بهترین نتیجه به دست آمده مطابق جدول ۴ می‌باشد. محدوده مجاز هریک از پارامترها مطابق استانداردهای ذکر شده نیز در جدول مشخص می‌باشد. با توجه به مقادیر جدول ۴ نقطه اشتعال بالای این سوخت که تفاوت معنی‌داری با نقطه اشتعال سوخت دیزل (64°C) دارد، میزان ایمنی و اطمینان کافی در نگه‌داری و حمل و نقل سوخت

جدول ۴- خواص بیودیزل تولید شده به همراه استانداردهای مربوطه

Table 4- Properties of produced biodiesel along with the relevant standards

واحد Unit	مقدار اندازه‌گیری شده برای بیودیزل The measured value for biodiesel	حدود مجاز Limits	روش استاندارد آزمون Standard test method	خصوصیات Properties
$^\circ\text{C}$	172	>101	ISO2719 ISO3679	نقطه اشتعال Flash point
$\text{mm}^2 \text{ s}^{-1}$	4.2	5-3.5	ISO3104	گرانیوی سینماتیکی در دمای 40°C Kinematic viscosity at 40°C
kg m^{-3}	861	860-900	ISO3675 ISO12185	چگالی در دمای 15°C Density at 15°C
درصد جرمی	88.53	96.5	EN14103	درصد متیل استر Methyl ester percent

مورد نظر در محدوده تعریف شده قابل تغییر است. خروجی مدل یعنی عملکرد راکتور با شرط حداکثر تنظیم شده است و در نتیجه نرم‌افزار این شرط را به صورت خط مورب با شیب مثبت نشان می‌دهد. به طور کلی هدف این بهینه‌سازی، به دست آوردن شرایط مربوط به پارامترهای ورودی است که بیشترین عملکرد را دربر داشته باشد که نتیجه با نقاطی بر روی نمودارها نشان داده شده است. بیشترین عملکرد راکتور در سرعت ۸۴۴۷ دور بر دقیقه و دبی ۰/۸۶ لیتر بر دقیقه و زمان ۱/۰۲ دقیقه حاصل شد که عملکرد برابر ۶/۳ میلی‌گرم بر کیلوژول بود. برای ارزیابی نتیجه بهینه‌سازی در شرایط آزمایشگاهی، تنظیمات پیشنهادی نرم‌افزار تا حد امکان پیاده‌سازی شد به این صورت که با توجه به گام کنترل کننده دور راکتور، این پارامتر در سرعت ۸۴۰۰ دور بر دقیقه تنظیم گردید و عملکرد راکتور در دبی ۰/۸۳ لیتر بر دقیقه و زمان ۱ دقیقه، برابر با ۶/۱۹ میلی‌گرم بیودیزل بر کیلوژول بود که با توجه به نتیجه حاصل شده از نرم‌افزار قابل قبول می‌باشد.



شکل ۴- بهینه‌سازی مدل سطح پاسخ برای یافتن تنظیمات مناسب راکتور با بیشترین عملکرد

Fig.4. Optimization of response surface model to find the suitable settings of reactor with the highest yield

به کار برده شد. تنظیمات مورد مطالعه دور، دبی، زمان کار راکتور بود و بیودیزل تولید شده توسط دستگاه کارموتوگراف گازی آنالیز شد. نتایج نشان داد که در سرعت دورانی ۸۴۴۷ دور بر دقیقه راکتور، دبی ۰/۸۶ لیتر بر دقیقه سیال ورودی و زمان ۱/۰۲ دقیقه کار راکتور بهترین عملکرد تولید بیودیزل حاصل می‌شود. نقطه اشتغال بیودیزل تولیدی در این تحقیق ۱۷۲ درجه سلسیوس، گرانیوی سینماتیکی ۴/۲ میلی‌متر مربع بر ثانیه و چگالی آن ۸۶۱ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. بیشترین و کمترین عملکرد حفره‌زایی راکتور تولید بیودیزل با روش حفره‌زایی هیدرودینامیکی در این تحقیق به ترتیب برابر با ۶/۱۹ و ۱/۱۳ میلی‌گرم بر کیلوژول شد.

با توجه به این که روش تولید سوخت در این تحقیق ترانس استریفیکاسیون بوده، آزمایش‌های انجام گرفته و بهینه‌سازی شده با نرم‌افزار نشان داد در ۳/۵۱ دقیقه زمان ماند مواد اولیه سوخت بیودیزل در سیستم، در روش ترانس استریفیکاسیون بیش از ۸۸ درصد واکنش انجام می‌گیرد و این نشان دهنده بهبود بسیار خوب زمان واکنش برای تولید بیودیزل خام می‌باشد. این روش زمان ماند بسیار پایینی را نسبت به راکتورهای رایج تولید سوخت بیودیزل ناپیوسته که بیش از ۲۰ دقیقه (Khatamifar, 2006) تا بالاتر از یک ساعت طول می‌کشد، دارا می‌باشد (Ghobadian et al., 2008; Amit et al., 2014; Marchetti et al., 2007).

بهینه‌سازی روش سطح پاسخ

در بهینه‌سازی روش سطح پاسخ برای یافتن تنظیمات مناسب با بیشترین عملکرد راکتور از شرایط زیر مطابق شکل ۴ استفاده شد. در این شکل سه پارامتر ورودی مدل یعنی دور، دبی و زمان کار راکتور بدون هیچ شرطی قابل تغییر می‌باشند. به همین دلیل نمودار آن‌ها به صورت خط راست افقی است که نشان می‌دهد مقادیر پارامترهای

نتیجه‌گیری

بر اساس تحقیقات انجام شده، بازده تولید سوخت بیودیزل در راکتورهای حفره‌زای هیدرودینامیکی از راکتورهای فراصوتی بالاتر است و از طرفی از لحاظ پیاده‌سازی در صنعت متداول‌تر و آسان‌تر است. لذا در این تحقیق تنظیمات یک راکتور حفره‌زای هیدرودینامیکی ساخته شده مورد بررسی قرار گرفت تا بتوان تنظیمات مناسب جهت تولید سوخت بیودیزل به صورت بهینه را به دست آورد. روغن آفتابگردان به عنوان روغن مورد مطالعه استفاده شد. متانول با نسبت ۶ به ۱ مولی با روغن و هیدروکسید سدیم به عنوان کاتالیزور

References

1. Amit, P., V. Ashish, S. S. Kachhwaha, and S. Maji. 2010. Biodiesel production through hydrodynamic cavitation and performance testing. *Renewable Energy* 35 (3): 619-624.
2. Amit, P., M. Shashank, and T. Dhananjay. 2014. Production and performance testing of waste Frying oil biodiesel. *International Journal of Current Engineering and Technology* 4 (3): 1366-1369.
3. Capocelli, M., D. Musmarra, M. Prisciandaro, and A. Lancia. 2014. Chemical effect of hydrodynamic cavitation: Simulation and experimental comparison. *AIChE Journal* 60 (7): 2566-2572.
4. Demirbas, A. 2009. Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Conversion and Management* 50 (1): 14-34.
5. Demirbas, A. 2009. Biofuels from agricultural biomass. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 31 (17): 1573-1582.
6. Fangrui, M., and H. Milford. 1999. Biodiesel production: a review. *Bioresource Technol* 70 (1): 1-15.
7. Gharat, N., and V. K. Rathod. 2013. Enzyme catalyzed transesterification of waste cooking oil with dimethyl carbonate. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic* 88: 36-40.
8. Ghobadian, B., H. Rahimi, T. Tavakkoli Hashjin, and M. Khatamifar. 2008. Production of bioethanol and sunflower methyl ester and investigation of fuel blend properties. *Journal of Agricultural Science and Technology* 10: 225-232.
9. Jianbing, J., J. Wang, L. Yongchao, Y. Yunliang, and X. Zhichao. 2006. Preparation of biodiesel with the help of ultrasonic and hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics* 44: e411-e414.
10. Khatamifar, M. 2006. Design, manufacture, test and evaluation the biodiesel processing device, Ph.D. Thesis in Mechanics of Agricultural Machinery Engineering, Tarbiat Modares University. (In Farsi).
11. Khuri, A. I., and S. Mukhopadhyay. 2010. Response surface methodology. *WIREs Computational Statistics* 2: 128-149.
12. Liu, K., and R. Wang. 2013. Biodiesel production by transesterification of duck oil with methanol in the presence of alkali catalyst. *Petroleum & Coal* 55 (1): 68-72.
13. Mandar, K., G. Parag, and P. Aniruddha. 2008. Intensification of esterification of acids for synthesis of biodiesel using acoustic and hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry* 15 (3): 188-194.
14. Mangesh, G. K., and K. D. Ajay. 2006. Waste cooking oil an economical source for biodiesel: a review. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 45: 2901-2913.
15. Marchetti, J. M., V. U. Miguel, and A. F. Errazu. 2007. Possible methods for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11 (6): 1300-1311.
16. Mostafaei, M. 2012. Effect of Ultrasonic Parameters on Continuous Biodiesel Production, Ph.D. Thesis in Mechanics of Agricultural Machinery Engineering, Tarbiat Modares University. (In Farsi).
17. Ozonak, J., and K. Lenik. 2011. Effect of different design features of the reactor on hydrodynamic cavitation process. *Archives of Materials Science and Engineering* 52 (2): 112-117.
18. Qiu, Z., L. Zhao, and L. Weatherley. 2010. Process intensification technologies in continuous biodiesel production. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 49 (4): 323-330.
19. Vichare, N. P., P. R. Gogate, and A. B. Pandit. 2000. Optimization of hydrodynamic cavitation using a model reaction. *Chemical Engineering & Technology* 23 (8): 683-690.
20. Visscher, F., J. V. D. Schaaf, T. A. Nijhuis, and J. C. Schouten. 2013. Rotating reactors-A review. *Chemical Engineering Research and Design* 91 (10): 1923-1940.



Optimization of hydrodynamic cavitations reactor efficiency for biodiesel production by response surface methods (Case study: Sunflower oil)

H. Javadikia^{1*} - Y. Nosrati² - M. Mostafaei³ - L. Naderloo⁴ - M. Tabatabaei⁵

Received: 04-12-2015

Accepted: 23-02-2016

Introduction

Biofuels are considered as one of the largest sources of renewable fuels or replacement of fossil fuels. Combustion of plant-based fuels is the indirect use of solar energy. Biofuels significantly have less pollution than other fossil fuels and can easily generate from residual plant material. Waste and residues of foods and wastewater can also be a good source for biofuel production.

Transesterification method (one of biodiesel production methods) is the most common forms to produce mono-alkyl esters from vegetable oil and animal fats. The procedure aims are reduction the oil viscosity during the reaction between triglycerides and alcohol in the presence of a catalyst or without it. In this study, the method of transesterification with alkaline catalysts is used that it is the most common and most commercial biodiesel production method.

In this study, configurations of made hydrodynamic cavitation reactor were studied to measure biodiesel fuel quality and enhanced device performance with optimum condition. The Design Expert software and response surface methodology were used to get this purpose.

Materials and Methods

Transesterification method was used in this study. The procedure aims were reduction of the oil viscosity during the reaction between triglycerides and alcohol in the presence of a catalyst or without it. Materials needed in the production of biodiesel transesterification method include: vegetable oil, alcohol and catalysts. The used oil in the production of biodiesel was sunflower oil, which was used 0.6 liters per each test in the production process base on titration method. Methanol with purity of 99.8 percent and the molar ratio of 6:1 to oil was used based on titration equation and according to the results of other researchers. The used catalyst in continuous production process was high-purity sodium hydroxide (99%) that it is one of alkaline catalysts. Weight of hydroxide was 1% of the used oil weight in the reaction.

Response surface methodology: Three important settings of reactor were considered to optimize reactor performance, which include: inlet flow to reactor, reactor rotational speed and the fluid cycle time in the system. Each set was considered at three levels. The factorial design was used to the analysis without any repeat, there will be 27 situations that because of the cost of analysis per sample by GC, practically not possible to do it. Therefore, response surface methodology was used by Design Expert software. In the other words, after defining the number of variables and their boundaries, software determined the number of necessary tests and the value of the relevant variables.

Results and Discussion

Three parameters include the inlet flow to reactor, reactor rotational speed and the fluid cycle time in the system were considered as input variables and performance of reactor as outcome in analyzing of extracted data from the reactor and GC by Design Expert software. The results of tests and optimization by software indicated that in 3.51 minutes as retention time of the raw material of biodiesel fuel in the system, the method of transesterification reaction had more than 88% Methyl ester and this represents an improvement in reaction time of biodiesel production. This method has very low retention time rather than biodiesel fuel production in conventional batch reactors that it takes 20 minutes to more than one hour.

1, 2, 3, 4- Assistant Professor, Former M.Sc. Student, Assistant Professor and Assistant Professor respectively, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Razi University, Kermanshah, Iran

5- Assistant Professor, Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran, Karaj, Iran

(* - Corresponding Author Email: pjavadikia@gmail.com)

Conclusions

According to the researches, efficiency of biodiesel fuel production in hydrodynamic cavitation reactors is higher than ultrasonic reactors so in this study, the settings of hydrodynamic reactor were investigated so that the settings were optimized in production of biodiesel fuel. Sunflower oil was used in this research. The molar ratio of Methanol to oil was 6 to 1 and sodium hydroxide as a catalyst was used. Three important settings of reactor were considered which include: inlet flow to reactor, reactor rotational speed and the fluid cycle time in the system. The results were analyzed by gas chromatography. The results showed that at 8447 rpm of reactor speed, inlet flow of reactor at 0.86 liters per minute and 1.02 minute of circulation time, the best performance of reactor were created. The flash point, kinematic viscosity and density of biodiesel in this study were 172 ° C, 2.4 square millimeters per second and 861 kg per cubic meter, respectively. Maximum and minimum performances of hydrodynamic cavitation reactor in biodiesel production were 6.19 and 1.13 mg kJ⁻¹, respectively.

Keywords: Biodiesel, Optimization, RSM, Transesterification