علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و دوم، شماره یک، فروردین ماه ۹۹

بررسی و تحلیل پارامترهای تاثیر گذار بر روی عملکرد و راندمان انرژی تولید بیودیزل حاصل از روغن پسماند

گل محمد خوب بخت[1*]

g.m.khoobbakht@pnu.ac.ir

محمود کریمی[2]

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۵/۰۶ **تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۹**

چکیده:

زمینه و هدف: افزایش مداوم تقاضای انرژی و کم شدن منابع نفت خام منجر به جستجو برای سوخت های تجدید پذیر و پایدار شده است. بیودیزل به خاطر این‌که دوست دار محیط زیست است بهترین جایگزین سوخت دیزل می باشد. بیودیزل به طور معمول از روش ترانس استریفیکاسیون تولید می‌شود. در این تحقیق به بررسی بازده انرژی و تاثیر زمان و دمای واکنش و همچنین نسبت مولی متانول به روغن بر روی تولید بیودیزل حاصل از روغن پسماند پرداخته شد.

روش بررسی: در این مطالعه انرژی نهاده هایی هم‌چون نیروی انسانی، پسماند روغن خوراکی، الکل (متانول)، کاتالیست (KOH)، الکتریسیته و انرژی ماشین تولید بیودیزل و انرژی خروجی شامل: بیودیزل، گلیسرول، اضافات الکل، آب، صابون، مونوگلیسرید و دی گلیسیرید برای محاسبه بازده انرژی، محاسبه شد. همچنین برای محاسبه عملکرد، وزن استرهای اسید چرب و تری گلیسیرید روغن پسماند حاصل از واکنش اندازه گیری شد.

یافته ها: نتایج این تحقیق نشان داد این سه پارامتر زمان و دمای واکنش و همچنین نسبت مولی متانول به روغن بر عملکرد واکنش ترنس استریفیکاسیون به روش مرسوم تاثیر گذار بود. نسبت مولی متانول به روغن ۶:۱، زمان واکنش ۶۰ دقیقه و دمای واکنش ۶۰ درجه سلسیوس با تبدیل ۹۵ درصد تری گلیسرید به استرهای اسید چرب بیش‌ترین عملکرد واکنش را در میان تیمارهای مورد آزمایش به خود اختصاص داد.

بحث و نتیجه گیری: در تولید بیودیزل راندمان مصرف انرژی برای نسبت های مولی متانول به روغن ۳:۱، ۶:۱ و ۹:۱ به ترتیب ۶۹، ۸۹ و ۷۶ درصد برآورد شد. همچنین راندمان مصرف انرژی برای دما های واکنش ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۷۲، ۸۳ و ۹۵ درصد برآورد شد.

واژه های کلیدی: بیودیزل، انرژی، زمان، دما، نسبت مولی.

۱- استادیار، گروه مهندسی کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران * (مسوول مکاتبات)

۲- استادیار،گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه اراک، ایران

March, 2020 J. Env. Sci. Tech., Vol 22, No.1,

Analysis of the Parameters Affecting on the Performance and Energy Efficiency of Biodiesel Production from Waste Oil

Golmohammad Khoobbakht[1*]

g.m.khoobbakht@pnu.ac.ir

Mahmoud karimi[2]

Accepted: 2017.01.18 Received: 2016.07.27

Abstract

Background and Objective: The steady increase in energy demand and the depletion of crude oil resources have led to the search for renewable and sustainable fuels. Biodiesel is the best alternative to diesel because it is environmentally friendly. Biodiesel is typically produced by the transesterification method. In this study, energy efficiency and the effect of reaction time and temperature as well as the molar ratio of methanol to oil on biodiesel production from waste oil were investigated.

Methods: In this study, the energy of inputs such as manpower, edible oil waste, alcohol (methanol), catalyst (KOH), electricity and energy of biodiesel production machine and energy output including: biodiesel, glycerol, alcohol additives, water, soap, mono-glyceride and Diglyceride was calculated to calculate energy efficiency. Also, to calculate the yield, the weight of fatty acid esters and triglycerides of waste oil from the reaction was measured.

Findings and Conclusions: The results of this study showed that these three parameters of reaction time and temperature as well as the molar ratio of methanol to oil affected the performance of the transesterification reaction by the conventional method. The molar ratio of methanol to oil was 6: 1, the reaction time was 60 minutes and the reaction temperature was 60 ° C with 95% conversion of triglycerides to fatty acid esters.

Keywords: Biodiesel, Energy, Time, Temperature, Molar Ratio

1- Assistant Professor, Department of Agricultural Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran
*(Corresponding Author)
2- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Arak University, Arak, Iran.

مقدمه

تأمین انرژی جهان و چگونگی مصرف آن از دیرباز یکی از دغدغه-های ذهن بشر و مباحث روز دنیا بوده و هست و انسان همیشه مجبور به جستجو برای یافتن راه‌هایی برای کاهش هزینه‌های تولید آن کرده است. انرژی، بستر حرکت‌های اقتصادی را تعیین می‌کند و به پیروی از آن حرکت‌های اجتماعی، سیاسی و فرهنگی ملت‌ها، جهت و شکل می‌گیرند. (۱). در بین سوخت‌های تجدیدپذیر، سوخت‌های به دست آمده از بیوماس مواد کشاورزی مورد توجه بسیاری از دانشمندان قرار گرفته است، زیرا باعث کاهش گازهای گلخانه ای و آلاینده‌ی هوا می‌شوند. همچنین باعث کاهش وابستگی به واردات سوخت و کاهش هزینه‌ی انرژی شده و بخشی از تقاضای انرژی جهانی را جواب‌گو می‌باشند(۲).

بیودیزل یکی از انواع بیو سوخت هاست و به علت شباهت زیاد خصوصیات بیودیزل و سوخت دیزل، با به کارگیری این سوخت نه تنها نیازی به تغییر و اصلاح موتورهای دیزل نیست بلکه همه زیرساخت های مربوط به ذخیره و توزیع سوخت دیزل برای سوخت بیودیزل نیز کاملا قابل استفاده می‌باشد. بیودیزل از نقطه نظر علم شیمی ترکیبی از اسیدهای چرب استرهای مونو-الکیل[1] می‌باشد. بیودیزل به طور معمول از روش ترانس استریفیکاسیون[2] تولید می‌شود که از واکنش دادن تری گلیسرید[3] (ترکیبات اصلی روغن و چربی) با الکل‌های زنجیره کوتاه مثل متانول و اتانول به دست می آید(۳). فرآیند ترانس استریفیکاسیون تحت تأثیر پارامترهای مختلفی قراردارد‌که از مهم‌ترین‌های آن‌ها می‌توان به نسبت مولی الکل به روغن، غلظت ماده کاتالیزور در واکنش، دما و زمان واکنش اشاره کرد(۴،۵)

تولید بیودیزل یک فرآیند تبدیل انرژی است. در فرآیند تولید بیودیزل، جریان انرژی نیز جنبه بسیار مهمی در مدیریت تولید بیودیزل محسوب می‌شود. راندمان تبدیل انرژی نسبت انرژی مفید خروجی به انرژی ورودی یک ماشین است (۶). به طور کلی هدف از انجام این تحقیق بررسی میزان انرژی ورودی و خروجی و بازده انرژی در تولید بیودیزل از پسماند روغن‌های خوراکی و مقایسه میزان تاثیر تغییر یک واحد از پارامترهای نسبت مولی متانول به روغن، زمان و دمای واکنش ترانس استریفیکاسیون به روش مرسوم، بر روی تولید بیودیزل و نسبت انرژی می باشد.

روش ترانس‌استریفیکاسیون

ترانس‌استریفیکاسیون که به آن الکلیزیز هم گفته می‌شود، واکنشی است کـه در آن ترکیبات روغن‌های گیاهی و یا چربی-های حیوانی (تری‌گلیسیریدها) با یک الکل واکنش داده و OH الکل مورد استفاده، جایگزین زنجیرهٔ هیدروکربنی موجود در روغن می‌شود و در نتیجه استرهایی با ساختمان مولکولی جدید به نام استرهای متیل اسید چرب بوجود می‌آید که تشابه زیادی با گازوئیل شمارهٔ ۲ دارد (۷). ویژگی‌های بیودیزل تولید شده به روش ترنس استریفیکاسیون بسیار شبیه به ویژگی‌های سوخت دیزل می‌باشد به طوری که بیودیزل میتواند یک گزینه مطلوب جایگزین سوخت دیزل به شمار آید. بیودیزل به عنوان یک سوخت دوستدار محیط زیست مورد توجه قرارگرفته است. بیو دیزل عاری از گوگرد می‌باشد، بوندارد، درساختمان مولکولی آن ۱۰٪ وزنی اکسیژن یافت می‌شودکه باعث می‌شود به طورکامل سوخته شود و عدد ستان بالاتر آن کیفیت احتراق را بهبود می-بخشد(۸).

نسبت مولی الکل به روغن

بسیاری از محققان تشخیص داده‌اند که یکی از مهم‌ترین فاکتورهای موثر بر عملکرد تولید بیودیزل نسبت مولی الکل به تری‌گلیسرید می‌باشد(۱۰،۹،۴). بر اساس نسبت استوکیومتری در واکنش ترنس استریفیکاسیون به ۳ مول الکل، به ازای هر ۱ مول تری گلیسرید نیاز است که منجر به تولید ۳ مول استر اسید چرب (بیودیزل) و ۱ مول گلیسرول خواهد شد. اما برای اطمینان به

1- Fatty acids mono-alkyl esters
2- Transesterification
3- Triglyceride

این‌که روغن به کار رفته در واکنش به طور کامل تبدیل به استر شود، در عمل یک مقدار الکل اضافی در واکنش ترانس استریفیکاسیون استفاده می‌شود به طوری که یک نسبت بالاتری از الکل به تری گلیسرید می‌تواند به تولید مقدار بیش‌تری استر در یک زمان کوتاه‌تری منجر شود. بنابراین اگر نسبت الکل به تری گلیسرید بیشتر از ۳ باشد، محصول بیودیزل افزایش خواهد یافت. اما افزایش بیش‌تر این نسبت از یک مقدار بهینه، نه تنها منجر به افزایش محصول بیودیزل نمی‌شود بلکه منجر به تحمیل هزینه بازیافت الکل پس از واکنش نیز خواهد شد(۹).

زمان واکنش

فریدمن[1] و همکاران(۱۹۸۶) دریافتند که سرعت تبدیل استرهای اسید چرب متناسب با زمان واکنش افزایش می‌یابد. درشروع، به خاطر اختلاط و پراکندگی غیر یکسان الکل داخل روغن و اکنش کند صورت می‌گیرد. اما بعد از مدتی واکنش خیلی سریع ادامه می‌یابد(۱۱). معمولا با یک کاتالیزور قلیایی محصول در یک زمان واکنش کم‌تر از ۹۰ دقیقه به بیشینه خود می‌رسد و سپس با گذشت بیشتر زمان، تعادل واکنش نسبتا ثابت باقی می‌ماند (۹،۱۲). با این وجود، گذشت زمان بیشتر از حد بهینه، تولید محصول را به خاطر واکنش برگشتی ترانس استریفیکاسیون کاهش خواهد داد و در نتیجه منجر به کاهش استرها و تبدیل بیشتر اسیدهای چرب به صابون خواهدشد (۱۴،۱۳).

دمای واکنش

دما به طور واضح بر واکنش و تولید محصول بیو دیزل موثر می‌باشد. دمای بالاتر واکنش می‌تواند گران‌روی روغن را کاهش داده و در نتیجه با یک سرعت واکنش بیش‌تر منجر به کوتاه‌تر شدن زمان واکنش شود. به هر حال لئونوجئو[2] (۲۰۰۶)، همچنین اورا[3] و همکاران (۲۰۰۹) دریافتند وقتی که دمای واکنش از مقدار بهینه بیش‌تر شود تولید محصول بیودیزل کاهش می‌یابد زیرا دمای واکنش بالاتر واکنش صابون سازی از تری گلیسرید را تسریع می‌کند (۱۳،۹). دمای واکنش باید کم‌تر از نقطه جوش الکل در نظر گرفته شود تا اطمینان حاصل شود که الکل تبخیر شده به بیرون از واکنش تراوش نکند. متناسب با روغن مورد استفاده دمای بهینه واکنش در واکنش‌های ترانس استریفیکاسیون با یک کاتالیزور قلیایی و به روش مرسوم بین ۵۰°C تا ۶۰°C در نظر گرفته می‌شود(۱۴،۹).

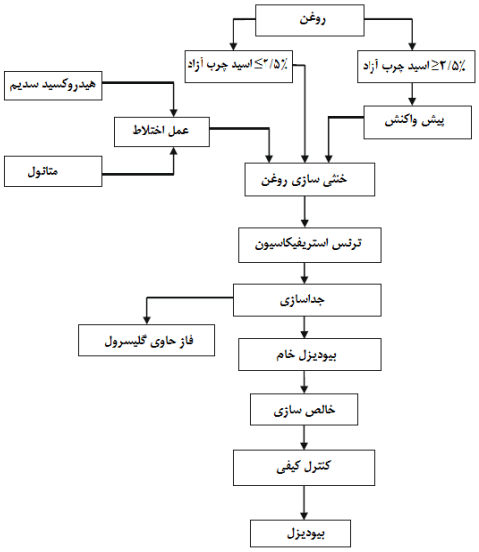
مواد و روش ها

این مطالعه در آزمایشگاه بیودیزل دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است. به‌طور کلی هدف از این مطالعه بررسی تاثیر نسبت مولی متانول به روغن، زمان و دمای واکنش بر روی عملکرد و راندمان انرژی تولید بیودیزل از پسماند روغن‌های خوراکی به روش مرسوم می‌باشد. داده‌های انرژی توسط دستگاه تولید بیودیزل به روش ترانس استریفیکاسیون در ظرفیت صد لیتری صورت گرفت. فرآیند تولید بیودیزل از طریق ترانس استریفیکاسیون با کاتالیزور قلیایی به نام هیدروکسیدپتاسیم انجام می‌گیرد. نمودار جریان مراحل این روش در شکل ۱ ارایه شده است. آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه بیودیزل دانشگاه تربیت مدرس برای حجم تولیدی صد لیتر صورت گرفت.

1- Freedman

2-Leung and Guo

3-Eevera



شکل ۱- نمودار جریان فرآیند تولید بیودیزل(۱۵).

Fig 1- Biodiesel production process flow diagrams (15).

روش مرسوم

در حالت مرسوم[1] از یک همزن برای اختلاط این دو مایع ناهمگن استفاده می‌شود که این امر باعث کاهش زمان واکنش و افزایش تولید محصول خواهد شد. هنگامی که روغن، الکل و هیدروکسیدپتاسیم در یک مخزن واکنش، تحت اختلاط قرار گیرد واکنش ترانس‌استریفیکاسیون آغاز خواهد شد. در این تحقیق ترانس استریفیکاسیون به روش مرسوم انجام خواهد شد. در ترانس استریفیکاسیون به روش مرسوم، از یک مخزن واکنش استفاده خواهد شد که شامل گرم‌کن، حسگر دما، نمایش‌گر دما، همزن، کنترل کننده و نمایش‌گر دور همزن می‌باشد. در این روش عمل اختلاط توسط یک همزن انجام می‌شود. زمان واکنش در واکنش های مورد آزمایش ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه در نظر گرفته شد همچنین دمای واکنش در این تحقیق ۴۰°C، ۵۰°C و ۶۰°C بود.

جداسازی و تعیین عملکرد بیودیزل

پس از تکمیل واکنش ترانس‌استریفیکاسیون، دو محصول اصلی استرها (بیودیزل) و گلیسرول حاصل این واکنش خواهد بود. فاز گلیسرول نسبت به فاز بیودیزل چگال‌تر بوده و پس از مدتی ته نشین خواهد شد. این مدت از ده دقیقه تا چند ساعت ممکن است طول بکشد. پس از ته نشین شدن گلیسرول می توان این دو فاز را با استفاده از قیف جداکننده یا سانتریفیوژ تفکیک نمود. وزن فاز بیودیزل هر نمونه، پس از جداسازی، با یک ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری می‌شود. سپس با استفاده از کروماتوگرافی گازی (GC) میزان دقیق استرهای اسید چرب تعیین می‌شود. در این مرحله می‌توان با استفاده از رابطه (۳-۱) عملکرد تولید بیودیزل در واکنش را محاسبه کرد.

$$Y = \frac{w_e}{w_t} \times 100 \qquad (۱)$$

که در آن we، وزن استرهای اسید چرب حاصل از واکنش (g)؛ wt، وزن تری گلیسیرید روغن پسماند در واکنش(g)؛ و Y عملکرد تولید بیودیزل در واکنش ترانس‌استریفیکاسیون می‌باشد.

1-Conventional

در این تحقیق تاثیر متغیرهای زمان واکنش (۹۰، ۶۰، ۳۰ دقیقه)، دمای واکنش (۴۰، ۵۰، ۶۰ درجه سلسیوس) و نسبت مولی الکل به روغن (۳:۱، ۶:۱، ۹:۱) بر روی عملکرد تولید بیودیزل در سه سطح بررسی شد و هر آزمایش در سه تکرار انجام شد.

جریان انرژی

در این مطالعه برای تولید بیودیزل، انرژی نیروی انسانی، پسماند روغن خوراکی، الکل (متانول)، کاتالیست (KOH)، الکتریسیته و انرژی ماشین تولید بیودیزل و همچنین انرژی خروجی که عبارت بودند از: بیودیزل، گلیسرول، اضافات الکل، آب، صابون، مونوگلیسرید و دی گلیسیرید در نظر گرفته شد و محاسبه شد. بازده انرژی با استفاده از رابطه ۲ بدست می آید:

$$\text{بازده انرژی} = \frac{\text{انرژی خروجی}(\text{مگاژول بر لیتر})}{\text{انرژی ورودی}(\text{مگاژول بر لیتر})} \quad (۲)$$

نتایج و بحث

تاثیر نسبت مولی متانول به روغن بر روی راندمان انرژی و عملکرد تولید بیودیزل

با توجه به اطلاعات بدست آمده، میزان مصرف انرژی هر یک از نهاده‌ها با توجه به میزان انرژی مصرفی کل در تولید بدست آمد. در نسبت های مولی متانول به روغن ۳:۱، ۶:۱ و ۹:۱ انرژی مصرفی مربوط به پسماند روغن خوراکی شامل ۸۱٪، ۷۳٪ و ۶۵٪ کل انرژی های ورودی در واکنش می باشد. در همه نسبت های مولی متانول به روغن بیش‌ترین سهم انرژی های ورودی مربوط به انرژی پسماند روغن خوراکی می‌باشد. این نکته نشان می‌دهد که برای افزایش بازده انرژی باید به سمت افزایش عملکرد تولید رفت. به عبارت دیگر افزایش تبدیل تری گلیسرید به استرهای اسید چرب می‌تواند منجر به افزایش بازده انرژی شود. با این حال بیش‌ترین عملکرد واکنش ترانس استریفیکاسیون مربوط به نسبت مولی متانول به روغن ۶:۱ بدست آمد در حالی‌که کم‌ترین سهم انرژی پسماند روغن خوراکی مربوط به نسبت مولی متانول به روغن ۹:۱ می باشد. این رخداد به این دلیل است که افزایش نسبت مولی متانول به روغن باعث افزایش مصرف متانول در واکنش شده که منجر به افزایش کل انرژی های ورودی شده است. بنابراین سهم کم‌تر انرژی پسماند روغن خوراکی (۶۵٪) در آزمایش نسبت مولی متانول به روغن ۹:۱ در مقایسه با آزمایش نسبت مولی متانول به روغن ۶:۱ به دلیل بیش‌تر بودن کل انرژی مصرفی است نه کمتر بودن مقدار انرژی پسماند روغن خوراکی.

جدول ۱- راندمان مصرف انرژی و عملکرد تولید بیودیزل در نسبتهای مولی متانول به روغن، زمان‌های مختلف و دماهای مختلف واکنش

Table 1- Energy efficiency and performance of biodiesel production in molar ratios of methanol to oil, different time period and different reaction temperatures

شاخص	نسبت های مولی مختلف متانول به روغن			زمان‌های مختلف واکنش			دماهای مختلف واکنش		
	۳:۱	۶:۱	۹:۱	۳۰	۶۰	۹۰	۴۰	۵۰	۶۰
راندمان مصرف انرژی (درصد)	۶۹	۸۹	۷۶	۶۱	۸۸	۸۵	۶۷	۷۸	۹۱
عملکرد تولید بیودیزل (درصد)	۷۱	۹۴	۸۰	۶۴	۹۵	۹۳	۷۲	۸۳	۹۵

سهم انرژی متانول در کل انرژی های ورودی آزمایش های نسبت های مولی متانول به روغن ۳:۱، ۶:۱ و ۹:۱ به ترتیب برابر ۷/۹۹٪، ۲۱/۵۴٪ و ۲۴/۴۵٪ بدست آمد. به وضوح مشخص است که هر چه نسبت مولی متانول به روغن افزایش یافته است سهم انرژی این نهاده از کل انرژی مصرفی بیش‌تر شده است. عملکرد تولید بیودیزل در نسبت های مولی متانول به روغن ۳:۱، ۶:۱ و ۹:۱ به ترتیب ۷۱٪، ۹۴٪ و ۸۰٪ به دست آمد. با افزایش نسبت متانول عملکرد بیودیزل ابتدا افزایش یافت و سپس افزایش بیش‌تر این نسبت از یک مقدار بهینه باعث کاهش عملکرد بیودیزل شد. نسبت مولی الکل به روغن ۶:۱ یک مقدار بهینه در تولید سوخت بیودیزل می باشد ولی با افزایش نسبت مولی به بالاتر از ۶:۱، گلیسیرین و الکل مازاد بیش‌تری پس از مرحله جداسازی، در داخل بیودیزل بصورت محلول باقی می ماند و در نتیجه بر میزان خلوص بیودیزل نهایی تاثیر گذاشته و عملکرد تولید سوخت بیودیزل را پایین می آورد.

با توجه به جدول ۱ در تولید بیودیزل راندمان مصرف انرژی برای نسبت های مولی متانول به روغن ۳:۱، ۶:۱ و ۹:۱ به ترتیب ۶۹٪، ۸۹٪ و ۷۶٪ برآورد شد. یعنی بازای ۱ مگاژول نهاده برای تولید بیودیزل، به ترتیب ۰/۶۹، ۰/۸۹ و ۰/۷۶ مگاژول ستانده تولید می‌شود و همانند عملکرد تولید بیودیزل با افزایش نسبت های مولی متانول به روغن بازده انرژی ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند. بنابراین نسبت مولی متانول به روغن ۶:۱ بیش‌ترین راندمان مصرف انرژی را در مقایسه با دیگر نسبت‌های مورد آزمایش در این تحقیق داشته است. نسبت مولی متانول به روغن ۶:۱ بیش‌ترین عملکرد را نیز به خود اختصاص داد. بنابراین یک مقدار بهینه از نسبت مولی متانول به روغن اگرچه باعث افزایش انرژی مصرفی شده است ولی به دلیل آنکه عملکرد واکنش را به نسبت بیش‌تری افزایش داده است باعث شده که در نهایت راندمان انرژی افزایش یابد. به هرحال استفاده بیشتر متانول در واکنش از حد بهینه نه تنها باعث کاهش عملکرد شد بلکه راندمان انرژی را نیز کاهش داد.

جدول ۲ تجزیه واریانس عملکرد تولید بیودیزل و راندمان مصرف انرژی برای نسبت های مولی متانول به روغن ۳:۱، ۶:۱ و ۹:۱ را نشان می دهد. با توجه به جدول بین سطوح مختلف عملکرد و بازده انرژی اختلاف معنی داری در سطح یک درصد وجود دارد و با آزمون دانکن مشخص شد که بین هر یک از این سطوح اختلاف معنی داری وجود دارد.

جدول ۲- تجزیه واریانس عملکرد تولید بیودیزل و راندمان مصرف انرژی برای نسبت های مولی متانول به روغن ۳:۱، ۶:۱ و ۹:۱

Table 2- Analysis of variance biodiesel production performance and energy efficiency for methanol to oil molar ratios of 3: 1, 6: 1 and 9: 1

عامل	منابع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F	P-Values
	تیمار	۲	۰/۰۶۲	۰/۰۳۱	۹/۱۷۸	معنی‌دار در سطح پنج درصد
عملکرد تولید	خطای آزمایشی	۶	۰/۰۲	۰/۰۰۳		
بیودیزل	کل	۸	۰/۰۸۲			
	تیمار	۲	۰/۰۸۱	۰/۰۴	۱۲/۲۱۲	معنی دار در سطح یک درصد
بازده انرژی	خطای آزمایشی	۶	۰/۰۲	۰/۰۰۳		
	کل	۸	۰/۱			

تاثیر زمان واکنش ترانس استریفیکاسیون بر راندمان انرژی تولید بیودیزل

با توجه به میزان انرژی ورودی هر یک از نهاده ها و انرژی خروجی ستانده ها در تیمارهای مربوط به زمان های واکنش ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه سهم انرژی مصرفی مربوط به پسماند روغن خوراکی شامل ۷۸٪، ۷۳٪ و ۷۳٪ از کل انرژی های ورودی در واکنش بدست آمد. همان‌طور که مشخص شد در همه تیمارهای مربوط به زمان واکنش بیش‌ترین سهم انرژی های ورودی مربوط به انرژی پسماند روغن خوراکی می‌باشد. افزایش زمان واکنش از ۶۰ به ۹۰ دقیقه باعث کاهش ۷ درصدی عملکرد واکنش شد که همین امر باعث افزایش انرژی ورودی به ازای تولید یک لیتر بیودیزل می شود. بنابراین برای تولید یک لیتر بیودیزل می بایست مقدار بیشتری پسماند روغن خوراکی مصرف کرد. به عبارت دیگر نهاده انرژی پسماند روغن خوراکی تقریبا هماهنگ با افزایش انرژی ورودی برای تولید یک لیتر بیودیزل افزایش می‌یابد و بنابراین سهم انرژی پسماند روغن خوراکی تقریبا ثابت ماند. بنابراین به دلیل کوچک بودن سهم انرژی الکتریسیته در فرایند تولید بیودیزل، افزایش زمان واکنش تاثیر معنی داری بر سهم انرژی پسماند روغن خوراکی نداشت.

با توجه به جدول ۱ عملکرد تولید بیودیزل در مدت زمان های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه به ترتیب ۶۴٪، ۹۵٪ و ۹۳٪ به دست آمد. همان‌طور که مشخص شد زمان واکنش یک مشخصه مهم برای واکنش ترانس استریفیکاسیون محسوب می‌شود. برای دست‌یابی به یک عملکرد قابل قبول نیاز است که مدت زمان کافی متانول و تری گلیسرید تحت اختلاط قرار بگیرد. با توجه به جدول ۱ در تولید بیودیزل راندمان مصرف انرژی برای زمان‌های واکنش ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه به ترتیب ۶۱٪، ۸۸٪ و ۸۵٪ برآورد شده است، بدین معنی که بازای ۱ مگاژول نهاده برای تولید بیودیزل، به ترتیب ۰/۶۱، ۰/۸۸ و ۰/۸۵ مگاژول ستانده تولید می‌شود. همان-طور که در جدول ۱ و شکل ۳ نشان داده شده است با افزایش زمان واکنش از ۳۰ به ۹۰ دقیقه مشخصه‌های عملکرد تولید بیودیزل و بازده انرژی ابتدا روند صعودی و سپس روند نزولی داشت و در زمان ۶۰ دقیقه به بالاترین سطح خود رسید بنابراین زمان واکنش ۶۰ دقیقه بیش‌ترین راندمان مصرف انرژی را در مقایسه با دیگر زمان های واکنش در این تحقیق داشته است. زمان واکنش ۶۰ دقیقه بیشترین عملکرد را نیز به خود اختصاص داد. بنابراین یک مقدار بهینه از زمان واکنش ترانس استریفیکاسیون اگرچه باعث افزایش انرژی مصرفی الکتریسیته شده است ولی به دلیل آن‌که عملکرد واکنش را به نسبت بیش-تری افزایش داده است باعث شده که در نهایت راندمان انرژی افزایش یابد. به هرحال افزایش زمان واکنش از حد بهینه نه تنها باعث کاهش عملکرد شد بلکه راندمان انرژی را نیز کاهش داد.

جدول ۶ تجزیه واریانس عملکرد تولید بیودیزل و راندمان مصرف انرژی برای زمان های واکنش ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه نشان می دهد. با توجه به جدول بین سطوح مختلف عملکرد و بازده انرژی اختلاف معنی داری در سطح یک درصد وجود دارد و با آزمون دانکن مشخص شد که بین هر یک از این سطوح اختلاف معنی داری وجود دارد.

جدول ۳- تجزیه واریانس عملکرد تولید بیودیزل و راندمان مصرف انرژی برای زمان های واکنش ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه

Table 3- Analysis of variance biodiesel production performance and energy efficiency for response times of 30, 60 and 90 minutes.

عامل	منابع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F	P-Values
	تیمار	۲	۰/۱۳۱	۰/۰۶۶	۳۶/۵	معنی دار در سطح یک درصد
عملکرد تولید	خطای آزمایشی	۶	۰/۰۱۱	۰/۰۰۲		
بیودیزل	کل	۸	۰/۱۴۲			
	تیمار	۲	۰/۱۸۱	۰/۰۹	۵۶/۴۳۸	معنی دار در سطح یک درصد
بازده انرژی	خطای آزمایشی	۶	۰/۰۱	۰/۰۰۲		
	کل	۸	۰/۱۹			

تاثیر دمای واکنش ترانس استریفیکاسیون بر راندمان انرژی تولید بیودیزل

با توجه به جدول ۱ و شکل ۲ عملکرد تولید بیودیزل در دماهای واکنش ۴۰°C، ۵۰°C و ۶۰°C به ترتیب ۷۲٪، ۸۳٪ و ۹۵٪ به دست آمد. واکنش بین متانول و تری گلیسرید یک واکنش گرماگیر است و برای شکستن پیوندهای تری گلیسرید و تبدیل آن به استرهای اسید چرب نیاز به گرما می باشد. نتایج به‌دست آمده ثابت می‌کند که هر چه دمای واکنش بالاتر باشد پیوندهای تری گلیسرید آسان تر و سریع‌تر شکسته می‌شوند به طوری‌که عملکرد واکنش از ۷۲٪ به ۹۵٪ افزایش یافت. به هر حال افزایش بیش از حد بهینه ممکن است باعث کاهش عملکرد واکنش شود زیرا دمای واکنش بالاتر واکنش صابون سازی از تری‌گلیسرید را نیز تسریع می‌کند همچنین در تولید بیودیزل راندمان مصرف انرژی برای دما های واکنش ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۶۷٪، ۷۸٪ و ۹۱٪ برآورد شد یعنی بازای ۱ مگاژول نهاده برای تولید بیودیزل، به ترتیب ۰/۶۷، ۰/۷۸ و ۰/۹۱ مگاژول ستانده تولید می‌شود. بنابراین دمای واکنش ۶۰ درجه سلسیوس بیش‌ترین راندمان مصرف انرژی را در مقایسه با دیگر دماهای واکنش در این تحقیق داشته است. دمای واکنش ۶۰ درجه سلسیوس بیش‌ترین عملکرد را نیز به خود اختصاص داد. بنابراین یک مقدار بهینه از دمای واکنش ترانس استریفیکاسیون اگرچه باعث افزایش انرژی مصرفی الکتریسیته شده است ولی به دلیل آنکه عملکرد واکنش را به نسبت بیش‌تری افزایش داده است باعث شده که در نهایت راندمان انرژی افزایش یابد. به هرحال افزایش دمای واکنش از حد بهینه نه تنها باعث کاهش عملکرد می‌شود بلکه می‌تواند راندمان انرژی را نیز کاهش دهد. در دماهای واکنش ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درجه سلسیوس سهم انرژی مصرفی مربوط به پسماند روغن خوراکی شامل ۷۷٪، ۷۵٪ و ۷۳٪ از کل انرژی های ورودی در واکنش می‌باشد.

جدول ۳ تجزیه واریانس عملکرد تولید بیودیزل و راندمان مصرف انرژی برای دماهای واکنش ۴۰°C، ۵۰°C و ۶۰°C نشان می-دهد. با توجه به جدول بین سطوح مختلف عملکرد و بازده انرژی اختلاف معنی داری در سطح یک درصد وجود دارد و با آزمون دانکن مشخص شد که بین هر یک از این سطوح اختلاف معنی-داری وجود دارد.

جدول ۳- تجزیه واریانس عملکرد تولید بیودیزل و راندمان مصرف انرژی برای دماهای واکنش ۴۰°C، ۵۰°C و ۶۰°C

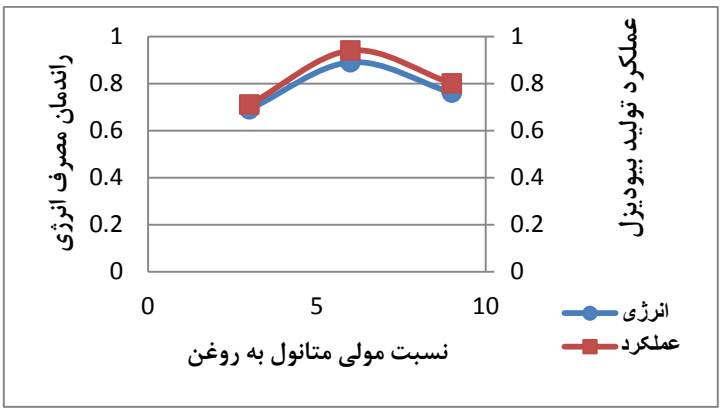
Table 8. Analysis of variance biodiesel production performance and energy efficiency for reaction temperatures 40° C, 50° C and 60° C

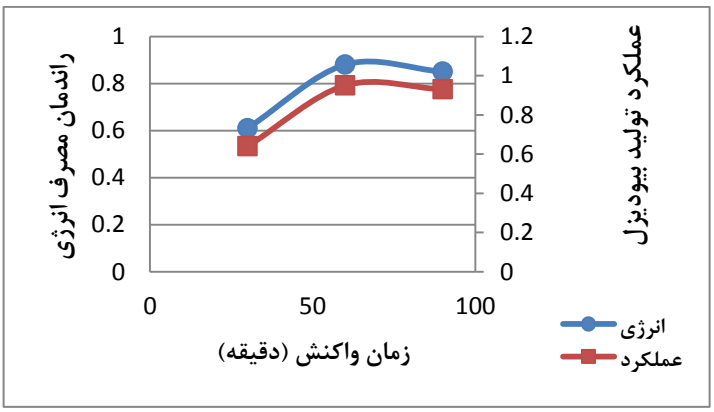
عامل	منابع تغییر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F	P-Values
	تیمار	۲	۰/۰۸۷	۰/۰۴۳	۱۶/۶۵۴	معنی دار در سطح یک درصد
عملکرد تولید	خطای آزمایشی	۶	۰/۰۱۶	۰/۰۰۳		
بیودیزل	کل	۸	۰/۱۰۲			
	تیمار	۲	۰/۰۷۹	۰/۰۴	۴/۵۶۳	معنی دار نیست
بازده انرژی	خطای آزمایشی	۶	۰/۰۵۲	۰/۰۰۹		
	کل	۸	۰/۱۳۲			

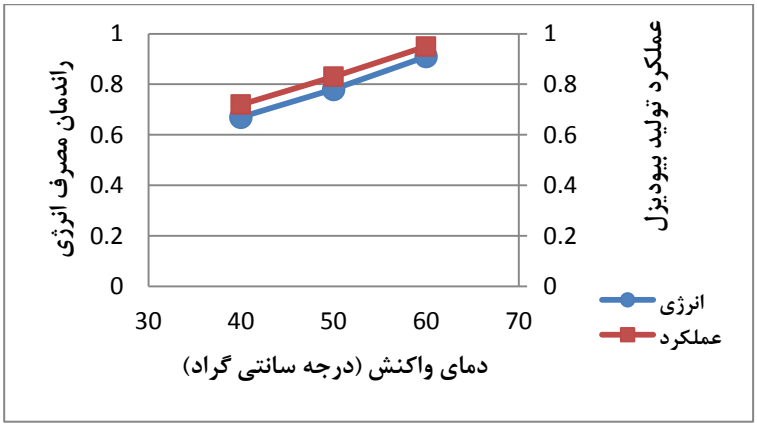
تحلیل حساسیت

شکل ۲ رابطه بین نسبت مولی متانول به روغن (۳:۱، ۶:۱ و ۹:۱) و عملکرد تولید بیودیزل و راندمان مصرف انرژی را نشان می دهد. با توجه به شکل با افزایش نسبت مولی متانول به روغن، عملکرد تولید بیودیزل و بازده انرژی تا نسبت ۶:۱ افزایش و سپس در نسبت های بالاتر کاهش پیدا کرده است. بطوری که عملکرد تولید بیودیزل و بازده انرژی به ازای یک درصد افزایش در میزان نسبت مولی الکل به روغن کم‌تر از یک درصد افزایش یا کاهش پیدا می کند و نشان می دهد که درصد تغییرات عملکرد تولید بیودیزل و بازده انرژی به درصد تغییرات نسبت مولی الکل به روغن در دامنه تغییرات نسبت مولی متانول به روغن کشش ناپذیر است.

همچنین با افزایش زمان واکنش عملکرد و راندمان مصرف انرژی ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا کرده است و درصد تغییرات راندمان مصرف انرژی و عملکرد تولید بیودیزل نسبت به درصد تغییرات زمان واکنش کشش ناپذیر می باشد یعنی به ازای یک درصد افزایش یا کاهش در میزان زمان واکنش، عملکرد و بازده انرژی کم‌تر از یک درصد افزایش یا کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۳ بین راندمان مصرف انرژی و عملکرد تولید بیودیزل یک رابطه مستقیم وجود دارد. به‌طوری‌که با افزایش دمای واکنش این دو مشخصه افزایش پیدا کرد و درصد تغییرات عملکرد و بازده انرژی به درصد تغییرات دمای واکنش در دامنه تغییرات این آزمایش کشش ناپذیر بود.







شکل ۲- تاثیر نسبت مولی متانول به روغن، زمان و دمای واکنش بر راندمان مصرف انرژی و عملکرد تولید بیودیزل

Fig 2- Effect of molar ratio of methanol to oil, reaction time and temperature on energy efficiency and performance of biodiesel production

به‌طور کلی با توجه به شکل ۲ و مقایسه درصد تغییرات عملکرد تولید به درصد تغییرات متغیرهای مستقل می توان به این نتیجه رسید که حساسیت عملکرد تولید به دمای استفاده شده در واکنش (در قسمت صعودی و نزولی نمودار) در مقایسه با دیگر متغیرها بیش‌تر بوده است به گونه‌ای که افزایش یا کاهش یک واحد دما در واکنش، عملکرد تولید بیودیزل را در مقایسه با دیگر متغیرها بیش‌تر افزایش می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت که دمای واکنش تاثیر بیش‌تری بر روی عملکرد تولید بیودیزل دارد و از اهمیت بیش‌تری بر خوردار است.

نتیجه گیری

نسبت مولی متانول به روغن ۶:۱، زمان واکنش ۶۰ دقیقه و دمای واکنش ۶۰ درجه سلسیوس به ترتیب به عنوان بهترین نسبت مولی، مدت زمان و دمای عملکرد واکنش انتخاب شد. نسبت مولی متانول به روغن ۶:۱ بیش‌ترین راندمان مصرف انرژی را در مقایسه با دیگر نسبت های مورد آزمایش در این تحقیق داشته است همچنین هر چه نسبت مولی متانول به روغن افزایش یافت سهم انرژی این نهاده از کل انرژی مصرفی بیش‌تر شد. زمان واکنش ۶۰ دقیقه بیش‌ترین راندمان مصرف انرژی را در مقایسه با دیگر زمان های واکنش در این تحقیق داشت و دمای واکنش ۶۰ درجه سلسیوس بیش‌ترین راندمان مصرف انرژی را در مقایسه با دیگر دماهای واکنش در این تحقیق داشت و افزایش دمای واکنش از حد بهینه نه تنها باعث کاهش عملکرد شد بلکه راندمان انرژی را نیز کاهش داد.

منابع

1- Sancho Araujo, V.K.W., Hamacher, S., Scavarda, L.F., 2010. Economic assessment of biodiesel production from waste frying oils. Bioresource Technology 101, 4415–4422.

2- Ghobadian, B., Rahimi, H. Biofuels-Past, Peresent and Future Perspective, the 4th International Iran and Russia Conference, Shahre kord, Iran, September, 2004.

3- Dantas, M.B., Almeida, A.A.F., Conceic¸ ão, M.M., Fernandes Jr., V.J., Santos, I.M.G., Silva, F.C., Soledade, L.E.B., Souza, A.G. 2007. CHARACTERIZATION AND

KINETIC COMPENSATION EFFECT OF CORN BIODIESEL. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 87, 847–851.

4- Ma, F. and Hanna, M.A. 1999. Biodiesel production: a review. Bioresource Technology 70, 1-15.

5- Meher, L.C., Vidya Sagar, D., Naik, S.N. 2006. Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 10, 248–268.

6- Ceccon, C. and R. Giovanardi, 2002. Energy balance of four systems hn north eastern Italy. Italy Journal Agron, VOL.6. pp 73-78.

7- Sprules, F.J. 1950. Production of fatty esters. Google Patents.

8- Singh, S.P., Singh, D. 2010. Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14,200–216.

9- Leung, D.Y.C., Guo, Y., 2006. Transesterification of neat and used frying oil: optimization for biodiesel production. Fuel Process Technology 87, 883–890.

10- Zhang, Y., Dube, M.A., McLean, D.D., Kates, M. 2003. Biodiesel production from waste cooking oil: 2. Economic assessment and sensitivity analysis. Bioresour Technol 90, 229–240.

11- Freedman, B., Butterfield, R.O., Pryde, E.H., 1986. Transesterification kinetics of soybean oil. Journal of American Oil Chemist' Society 63, 1375–1380.

12- Alamu, O.J., Waheed, M.A., Jekayinfa, S.O., 2007. Biodiesel production from Nigerian palm kernel oil: effect of KOH concentration on yield. Energy for Sustainable Development 11, 77–82.

13- Eevera, T., Rajendran, K., Saradha, S., 2009. Biodiesel production process optimization and characterization to assess the suitability of the product for varied environmental conditions. Renewable Energy 34, 762–765.

14- Ma, F., Clements, L.D., Hanna, M.A., 1998. The effects of catalyst, free fatty acids, and water on transesterification of beef tallow. Transactions of the American Society of Agricaltural Engineers 41, 1261–1264.

15- Gui, M.M., Lee, K.T., Bhatia, S., 2008. Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiesel feedstock. Energy 33, 1646–1653.

16- Mohammadshirazi, A., Akram, A., Rafiee, S., Mousavi Avval, S.H., Bagheri, E., 2012. An analysis of energy use and relation between energy inputs and yield in tangerine production. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 4515–4521.