



مقایسه واکنش ترانس استریفیکاسیون به روش‌های مرسوم، فراصوت و ریزموج

محمد خوب بخت*

استادیار، گروه مهندسی کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران gol.m1360@yahoo.com

چکیده

از آنجا که سوخت‌های فسیلی جهان در حال اتمام است، تلاش‌های زیادی در کشورهای مختلف دنیا برای استفاده از سوخت‌های تجدیدپذیر صورت گرفته است. یکی از این سوخت‌های تجدیدپذیر بیودیزل است که به عنوان جانشینی برای گازوییل شناخته شده است. این سوخت از واکنش روغن‌های گیاهی، حیوانی و روغن‌های پسماند خوراکی با الکل به دست می‌آید. در حالت مرسوم از یک همزن برای اختلاط این دو مایع ناهمگن استفاده می‌شود که این امر باعث کاهش زمان واکنش و افزایش تولید محصول خواهد شد. با این حال پژوهشگران پدیده‌های جدیدی به نام پرتودهی فراصوت و ریزموج را به منظور اختلاط دو مایع ناهمگن معرفی کردند که معتقدند اختلاط بهتر و تشکیل امولسیون مناسب‌تر از مزیت‌های این ابزار جدید به شمار می‌آید. در این تحقیق واکنش ترانس استریفیکاسیون به روش‌های مرسوم، فراصوت و ریزموج مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که انرژی مصرفی برای تولید هر لیتر بیودیزل در روش‌های فراصوت، ریزموج و مرسوم به ترتیب ۳۳/۷۳، ۳۵/۷۵ و ۳۴/۳۹ مگاژول به دست آمد همچنین در تولید بیودیزل راندمان مصرف انرژی برای روش‌های فراصوت، ریزموج و مرسوم به ترتیب به ترتیب ۱/۴۹، ۱/۳۷ و ۱/۳۲ برآورد شد.

کلمات کلیدی: بیودیزل، فراصوت، ریزموج

نویسنده مسئول: gol.m1360@yahoo.com



مقایسه واکنش ترانس استریفیکاسیون به روش‌های مرسوم، فراصوت و ریزموج

مقدمه

انرژی به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تولید و همچنین به عنوان یکی از ضروری‌ترین محصولات نهایی، از نظر اقتصادی و محیط‌زیستی دارای اثرات قابل توجهی می‌باشد و به عنوان یکی از اصلی‌ترین ارکان توسعه کشورها محسوب می‌گردد. از طرف دیگر مصرف انرژی‌های فسیلی به کاهش و در نهایت اتمام منابع و ذخایر آن‌ها منجر می‌گردد. همچنین مصرف انرژی، به خصوص سوخت‌های فسیلی، مهم‌ترین عامل آلودگی هوا و تغییرات آب و هوایی می‌باشد. به همین دلیل استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر و پاک در فرآیند توسعه اقتصادی و بحث‌های پیرامون محیط‌زیست به عنوان یک هدف مهم در توسعه پایدار مدنظر بوده است. این امر با شناسایی و مطالعه منابع انرژی‌های نو و تجدید پذیر و بررسی روش‌ها و تکنولوژی‌های تولید و کاربرد این منابع امکان‌پذیر می‌باشد.

کمبود سوخت‌های فسیلی، آلاینده‌گی بالای حاصل از سوختن آن‌ها و همچنین هزینه رو به رشدشان باعث شده که منابع بیوماس به عنوان یک منبع انرژی مطلوب مورد توجه محققان قرار گیرد (Sensoz et al., 2000). دانشمندان معتقدند که ذخایر نفت و گاز موجود کمتر از چند دهه دیگر به پایان خواهد رسید. بنابراین با افزایش تقاضای انرژی و کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی، سوخت بیودیزل به عنوان اولین گزینه انتخاب برای جایگزینی سوخت دیزل شناخته شده است (Dowaki et al., 2007; Gonc et al., 2007). 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 زیرساخت‌های مربوط به ذخیره و توزیع سوخت دیزل برای سوخت بیودیزل نیز کاملاً قابل استفاده می‌باشد (Tan et al., 1999). گذشته از آن، خصوصیات دیگر بیودیزل چون بازده انرژی بالا، تجدیدپذیری و همچنین مقدار بسیار کم گوگرد در مقایسه با سوخت دیزل باعث شده که این نوع سوخت، طرفداران جهانی پیدا کند (Pinto et al., 2005).

بیودیزل از نقطه نظر علم شیمی ترکیبی از اسیدهای چرب استرهای مونو-الکیل^۱ می‌باشد. بیودیزل به طور معمول از روش ترانس استریفیکاسیون^۲ تولید می‌شود که از واکنش دادن تری گلیسرید^۳ (ترکیبات اصلی روغن و چربی) با الکل‌های زنجیره کوتاه مثل متانول و اتانول به دست می‌آید (Dantas et al., 2007). در حال حاضر بیودیزل تجاری معمولاً با استفاده از کاتالیزورهای همگن بازی مثل هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم تولید می‌شود (Kulkarni and Dalai, 2006; Felizardo et al., 2006). مزایای این کاتالیزورها از جمله توانایی سرعت بخشیدن به واکنش در فشار اتمسفر بدون نیاز به دمای خیلی بالا، عملکرد بالا در یک مدت زمان نسبتاً کوتاه و در دسترس و به صرفه بودن از لحاظ اقتصادی باعث شده که معمولاً در صنعت مورد استفاده قرار بگیرند (Lotero et al., 2005).

واکنش یک تری گلیسرید با الکل در حضور لیپاز تثبیت شده تنها در منطقه سطحی بین دو مایع ناهمگن رخ می‌دهد (Hanh et al., 2008). در حالت مرسوم از یک همزن برای اختلاط این دو مایع ناهمگن استفاده می‌شود که این امر باعث کاهش زمان واکنش و افزایش تولید محصول خواهد شد. با این حال پژوهشگران فناوری جدیدی به نام پرتودهی فراصوت^۴ را به منظور اختلاط دو مایع ناهمگن معرفی کردند که معتقدند اختلاط بهتر و تشکیل امولسیون مناسب‌تر از مزیت‌های این ابزار جدید به شمار می‌آید

1 Fatty acids mono-alkyl esters

2 Transesterification

3 Triglyceride

4 Ultrasonic irradiation

(Bispo et al., 2005). پرتودهی فراصوت در سیستمهای ناهمگن با فروپاشاندن حباب‌های مستقر در حفره‌های موجود در مایعات باعث درهم آمیختن مخلوط ناهمگن، پاشیدن فاز مرزی بین دو مایع و تشکیل یک امولسیون مناسب می‌شود که این امر واکنش بین دو فاز ناهمگن را به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد (Bispo et al., 2005). به‌رحال استفاده از پرتوهای فراصوت در فرآیندهای شیمیایی، انتقال جرم و واکنش میان فازهای ناهمگن را شدت داده که این امر باعث کوتاه‌تر شدن زمان واکنش، بیشتر شدن ظرفیت تولید و کمتر شدن هزینه تولید در بلندمدت خواهد شد (Stavarache et al., 2005). فرآیند ترانس استریفیکاسیون تحت تأثیر پارامترهای مختلفی قرار دارد که از مهم‌ترین‌های آن‌ها می‌توان به نسبت مولی الکل به روغن، غلظت ماده کاتالیزور در واکنش، دما و زمان واکنش اشاره کرد (Tan et al., 2010; Leung et al., 2009).

خوشبختانه در ایران تحقیقات قابل توجهی در زمینه تولید بیودیزل انجام شده است. فرآیند تبدیل بسیاری از روغن‌های گیاهی مثل ذرت، آفتابگردان، سویا، کلزا و روغن پسماند به بیودیزل توسط محققان کشور مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین تأثیر سوخت بیودیزل بر توان و گشتاور موتور به همراه آلاینده‌گی آن با سوخت دیزل مورد مقایسه قرار گرفته است (باقر پور و همکاران ۱۳۸۹; Ghobadian and Khatamifar, 2006).

روغن‌های گیاهی، ماده اولیه بسیار مطلوبی برای تولید بیودیزل محسوب می‌شود چرا که آن‌ها در طبیعت تجدید پذیر، در سطوح گسترده قابل تولید و همچنین دوست دار محیط‌زیست نیز می‌باشند (Patil and Deng, 2009). روغن‌های گیاهی شامل روغن‌های خوراکی و غیر خوراکی می‌باشند. بیشتر از ۹۵ درصد از ماده اولیه تولید بیودیزل را روغن‌های خوراکی شامل می‌شوند؛ زیرا تولید این محصولات در بسیاری از مناطق در شرایط محیطی مختلف با تولید بالا امکان‌پذیر بوده و گذشته از آن خصوصیات این روغن‌ها در مقایسه با دیگر روغن‌ها و چربی‌ها به خصوصیات سوخت دیزل شباهت بیشتری دارد (Gui et al., 2008). اما استفاده از روغن‌های خوراکی جهت تولید بیودیزل باعث بروز مشکلاتی از قبیل رقابت با بازار مصرف خوراکی روغن‌های گیاهی و افزایش قیمت آن خواهد شد (Kansedo et al., 2009). اغلب یک انتقاد اساسی به استفاده از بیودیزل به‌خصوص به تولیدکننده‌های بزرگ گرفته می‌شود این است که بیودیزل می‌تواند مسیر تولید محصولات کشاورزی را به سمت خودش منحرف کند. بحث اصلی بر سر این است که برنامه‌های تولید محصولات کشاورزی برای انرژی با برنامه‌های تولید محصولات برای غذا در رقابت هستند و در نتیجه این رقابت کمبود مواد غذایی و افزایش قیمت آن‌ها را به دنبال خواهد داشت. این انتقادها به دنبال افزایش قیمت غذا در دنیا و به‌منظور کاهش انحراف محصولات کشاورزی به سمت تولید انرژی به مصوبه‌های قانونی تبدیل شدند. به‌منظور رفع این انتقاد اساسی و همچنین کاهش هزینه ماده خام اولیه پسماند روغن خوراکی می‌تواند گزینه خوبی باشد (Enweremadu and Mbarawa, 2009).

روغن‌های گیاهی پتانسیل بسیار خوبی برای جایگزینی سوخت‌های فسیلی در آینده نزدیک دارند. روغن‌های گیاهی و چربی‌های حیوانی استرهای کربوکسیلیک مشتق شده از گلیسرین‌های الکلی می‌باشند که به عنوان تری‌گلیسیرید شناخته می‌شوند. این اسیدهای چرب دارای تفاوت‌هایی از لحاظ طول زنجیره کربنی، تعداد، جهت و موقعیت پیوندهای دوگانه در این زنجیره‌ها می‌باشند. روغن‌های گیاهی اغلب دارای اسیدهای چرب آزاد، فسفولیپیدها، استرولها، آب، مواد بودار و سایر ناخالصی‌ها می‌باشند. امکان استفاده مستقیم سوختی از روغن‌های گیاهی به دلیل ویسکوزیته بسیار بالا در بسیاری از موتورهای دیزل موجود وجود ندارد. به‌منظور به‌کارگیری مستقیم این ترکیبات به عنوان منبع انرژی در موتورهای درون‌سوز و دارا بودن شرایط احتراق مناسب، لازم است تا ساختار مولکولی این ترکیبات به اجزاء ساده‌تری از طریق واکنش‌های ترانس‌استریفیکاسیون 1، رقیق‌سازی 2، پیرولیز 3 و میکروامولسیون 4 شکسته شده و متعادل گردد. از این میان، روش ترانس‌استریفیکاسیون رایج‌ترین و بهترین روش در

تولید سوختی پاک‌تر و سازگارتر با محیط‌زیست می‌باشد. تبدیل شیمیایی روغن به استر چرب متناظر آن ترانساستریفیکاسیون نامیده می‌شود.

مواد و روش‌ها

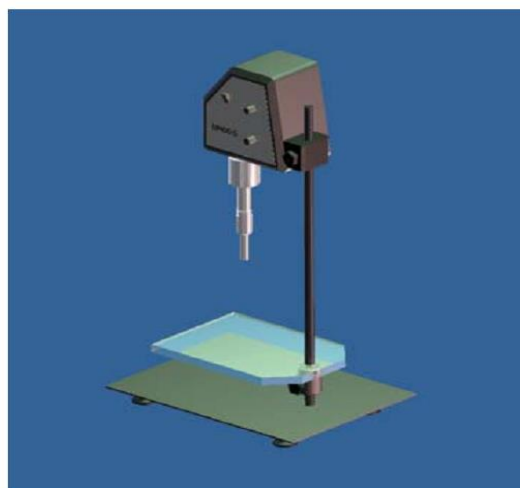
زمانی که روغن، الکل و هیدروکسیدپتاسیم در یک مخزن واکنش، تحت اختلاط قرار گیرد واکنش ترانس استریفیکاسیون آغاز خواهد شد. در این پایان‌نامه ترانس استریفیکاسیون به ۳ روش زیر انجام خواهد شد. برای تولید بیودیزل در مرحله‌ی ترانس- استریفیکاسیون، واکنش تری گلیسیرید (روغن) با الکل تنها در منطقه سطحی بین دو مایع ناهمگن رخ می‌دهد (Hanh et al., 2008).

روش مرسوم

در حالت مرسوم^۱ 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 ترانس استریفیکاسیون آغاز خواهد شد. در این پروژه 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، کنترل‌کننده و نمایشگر دور همزن می‌باشد. در این روش عمل اختلاط توسط یک همزن انجام می‌شود.

روش فراصوت

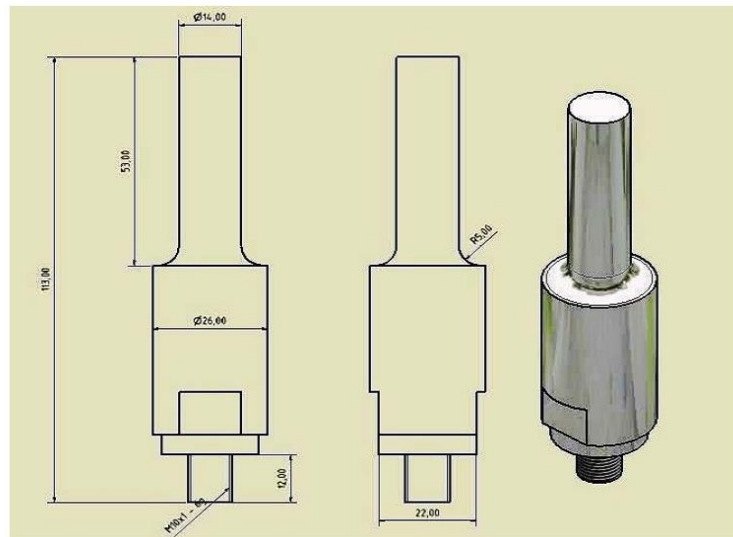
در این پژوهش از یک دستگاه منبع فراصوت مدل UP400S، ساخت شرکت Hielscher آلمان به عنوان منبع تولیدکننده امواج فراصوت استفاده شد. این دستگاه دارای توان بیشینه ۴۰۰ وات در فرکانس ثابت ۲۴ کیلوهرتز می‌باشد. همچنین این دستگاه قابلیت تنظیم پالس ارتعاش میله و شدت دامنه ارتعاشی می‌باشد. در شکل ۱ شماتیک این دستگاه نشان داده شده است.



شکل ۱- شماتیک منبع فراصوت

برای انتقال امواج فراصوت به محیط مایع از پروب (هورن) استفاده می‌شود که به صورت عمومی از تیتانیوم یا آلایژ آلومینیوم ساخته می‌شود. به همین علت، هورن از نظر شیمیایی بای خنثی باشد، در مقابل پدیده کاویتاسیون مقاوم باشد و باید بازده بیشینه در

انتقال امواج فراصوت داشته باشد. همچنین می‌تواند دامنه امواج فراصوت را تقویت کند. تقویت دامنه فراصوت بسته به نوع طراحی (یا جرم) هورن، متفاوت خواهد بود. در این پژوهش از پروب میله‌ای از جنس تیتانیوم با قطر ۱۴ میلی‌متر و طول کلی ۱۱۳ میلی‌متر و ضریب تقویت ۱/۸۵ استفاده شده است. شکل شماتیک این پروب همراه با اندازه‌گذاری در شکل شماره ۲ قابل مشاهده است.



شکل ۲- شماتیک پروب مورد استفاده.

روش ریز موج

به طیفی از امواج الکترومغناطیس که مابین امواج رادیویی و فرسوخ قرار دارند، ریزموج یا مایکروویو گفته شده و اغلب شامل فرکانس‌های بین ۳۰۰ M Hz تا ۳۰۰ G Hz (به ترتیب با طول موج ۱ متر تا ۱ میلی‌متر) می‌شود. از دیدگاه مهندسی، خواص دی‌الکتریکی مهم‌ترین خصوصیات فیزیکی در رابطه با حرارت‌دهی مایکروویو می‌باشد. از جمله خواص الکتریکی مهم می‌توان به ثابت دی‌الکتریک نسبی و افت دی‌الکتریک نسبی اشاره کرد. ثابت دی‌الکتریک نسبی توانایی ماده را در انباشت انرژی الکتریکی بیان می‌کند و افت دی‌الکتریک نسبی نیز به توانایی ماده برای تلف کردن انرژی الکتریکی اشاره دارد. این خواص معیاری از قابلیت عایق‌کنندگی الکتریکی ماده هستند. برخی از مواد عایق‌های بسیار ضعیفی هستند و هنگامی که در یک میدان امواج ریزموج قرار می‌گیرند، بخش زیادی از انرژی را جذب می‌کنند و در نتیجه گرمایش آن‌ها به‌طور آنی خواهد بود (Kappe and Stadler, 2005).

به‌طورکلی هدف از این مطالعه تحلیل نهاده انرژی در تولید بیودیزل از پسماند روغن‌های خوراکی به‌روش‌های مرسوم، فراصوت و ریز موج می‌باشد. داده‌های انرژی توسط دستگاه تولید بیودیزل به روش ترانس استریفیکاسیون در ظرفیت صد لیتری صورت گرفت. مواد مورد استفاده در این پژوهش روغن پسماند، متانول و هیدروکسید پتاسیم خواهد بود.

نتایج و بحث

مقایسه واکنش ترانس استریفیکاسیون به‌روش‌های مرسوم، فراصوت و ریزموج

در این تحقیق تولید بیودیزل با استفاده از سه روش مرسوم، فراصوت و ریزموج از جنبه انرژی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. بیشترین عملکرد تولید و راندمان انرژی در روش مرسوم در تیمار مربوط به نسبت مولی متانول به روغن ۶:۱، زمان واکنش ۶۰ دقیقه و دمای واکنش ۶۰ درجه سلسیوس برآورد شد. این تیمار به عنوان بهترین تیمار روش مرسوم تولید بیودیزل با روش‌های نوین استفاده از پرتودهی فراصوت و ریز موج در واکنش ترانس استریفیکاسیون مقایسه می‌شود.

پرتودهی فراصوت در واکنش ترانس استریفیکاسیون

در روش استفاده از پرتودهی فراصوت نسبت مولی متانول به پسماند روغن خوراکی ۶:۱، غلظت هیدروکسید پتاسیم ۱٪، زمان واکنش ۱۵ دقیقه و دمای واکنش ۶۰ درجه سلسیوس انتخاب شد. بقیه مراحل تولید شبیه به روش مرسوم بود. عملکرد تبدیل تری گلیسرید به استرهای اسید چرب ۹۹٪ برآورد شد.

واکنش‌های ترانس استریفیکاسیون دربرگیرنده‌ی واکنش بین روغن و الکل در حضور کاتالیزور می‌باشد. روغن و متیل الکل مایعات مخلوط نشدنی هستند و وقتی در مخزن واکنش داده می‌شوند، دو لایه‌ی جداگانه تشکیل می‌دهند. واکنش ترانس استریفیکاسیون به صورت تجاری نیاز به همزنی مکانیکی پیوسته در دوره زمانی طولانی دارد، به این دلیل که واکنش بین الکل و روغن تنها در محل تماس واقع بین دو مایع (در مقیاس مولکولی) قابل انجام است. وقتی این مخلوط تحت امواج فرا صوت قرار گیرد، امواج فرا صوت در محل تماس کاویتاسیون ایجاد می‌کنند. در نتیجه، امولسیون‌ی از روغن و الکل شکل گرفته که سطح وسیعی را برای انجام واکنش فراهم می‌کند. مشاهده شده که زمان انجام واکنش به اندازه معنی داری کاهش پیدا می‌کند (Chand et al., 2).

امواج فراصوت زمانی که وارد مخلوط واکنش می‌شود با ایجاد اختلاف فشار در مایع میکرو حباب‌هایی تولید می‌کند. میکرو حباب‌های تشکیل شده با استفاده از نیروی امواج فراصوت ایجاد فشار در محیط اطراف خود کرده و شروع به بزرگ شدن می‌کند. بعد از رسیدن به یک اندازه‌ی بحرانی یک فروپاشی ناگهانی برای میکرو حباب‌ها اتفاق می‌افتد که منجر به میکرو اختلاط محیط اطرافش می‌شود. از آنجایی که این عمل اختلاط در سطح میکرو اتفاق می‌افتد موجب تسریع شدن واکنش‌ها می‌شود (Bang and Suslick, 2010; Thompson and Doraiswamy, 1999).

استفاده از ریزموج در واکنش ترانس استریفیکاسیون

در روش استفاده از ریز موج در واکنش ترانس استریفیکاسیون نسبت مولی متانول به پسماند روغن خوراکی ۶:۱، غلظت هیدروکسید پتاسیم ۱٪، زمان واکنش ۳ دقیقه انتخاب شد. بقیه مراحل تولید شبیه به روش مرسوم بود. عملکرد تبدیل تری گلیسرید به استرهای اسید چرب ۹۴٪ برآورد شد. چون متانول ماده‌ای قطبی است، هنگامی که در معرض ریز موج قرار می‌گیرد مولکول‌های آن با سرعت زیاد شروع به چرخش می‌کند (ساز و کار چرخش دو قطبی) و در نتیجه می‌توان گفت به نوعی همزنی مولکولی همراه با تولید حرارت به وجود می‌آید که تأثیر بسزایی در انجام واکنش دارد. همچنین با توجه به اینکه کاتالیزور مورد استفاده (KOH) نیز قابلیت تبدیل شدن به یون‌های با بار مثبت و منفی را دارا می‌باشد، به صورت خودکار از سازوکار رسانش یونی نیز در تولید حرارت بهره جسته می‌شود. این دو سازوکار توأمان موجب کاهش مدت زمان انجام واکنش گردیده‌اند.

برایچه و همکاران (1999) واکنش ترانس استریفیکاسیون را با استفاده از متانول و روغن خوراکی تجاری و با حضور کاتالیزورهای مختلف (سدیم متیلات، بورکرباید، سولفوریک اسید و NaOH) انجام دادند. مطالعه آن‌ها در هر دو حالت ناپیوسته و پیوسته انجام شده و آن‌ها توانسته‌اند به درصد تبدیل بیش از 95 درصد دست یابند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده افزایش سرعت تولید

بیودیزل یعنی کاهش مدت زمان واکنش ترانس استریفیکاسیون است. آن‌ها توانستند با استفاده از کاتالیزور هیدروکسید سدیم و در مدت زمان 2 دقیقه به بازده بیش از 98 درصد دست یابند (Breccia et al., 1999).
راندمان انرژی در فرایند تولید بیودیزل به روش‌های مرسوم، فراصوت و ریزموج
میزان انرژی ورودی هر یک از نهاده‌ها و انرژی خروجی ستانده‌ها در روش‌های مرسوم، فراصوت و ریزموج مورد استفاده در واکنش ترانس استریفیکاسیون در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- الگوی انرژی برای تولید بیودیزل در به روش‌های فراصوت، ریزموج و مرسوم

مرسوم		ریزموج				فراصوت			واحد	مقدار نهاده‌ها و ستانده‌ها
درصد انرژی (%)	کل انرژی (MJ L ⁻¹)	مقدار به ازای ۱ لیتر بیودیزل (L)	درصد انرژی (%)	کل انرژی (MJ L ⁻¹)	مقدار به ازای ۱ لیتر بیودیزل (L)	درصد انرژی (%)	کل انرژی (MJ L ⁻¹)	مقدار به ازای ۱ لیتر بیودیزل (L)		
										نهاده‌ها
۱/۰۲۶	۰/۳۵۳	۰/۱۸	۰/۲۶۹	۰/۰۹۸	۰/۰۵	۰/۲۹۰	۰/۰۹۸	۰/۰۵	(h)	نیروی کارگری
۷۳/۴۲۲	۲۵/۲۵	۱/۰۱	۷۲/۸۰۲	۲۶/۵	۱/۰۶	۷۴/۸۵۹	۲۵/۲۵	۱/۰۱	(L)	پسماند روغن خوراکی
۲۱/۵۳۹	۷/۴۰۷	۰/۲۲	۲۲/۲	۸/۰۸۱	۰/۲۴	۲۱/۹۶۱	۷/۴۰۷	۰/۲۲	(L)	الکل (متانول)
۰/۸۶۷	۰/۲۹۸	۰/۰۱۵	۰/۹۸۲	۰/۳۵۸	۰/۰۱۸	۰/۸۸۴	۰/۲۹۸	۰/۰۱۵	(kg)	کاتالیست (KOH)
۱/۷۶۹	۰/۶۰۸	۰/۰۵۱	۰/۲۶۲	۰/۰۹۵	۰/۰۰۸	۰/۶۰۱	۰/۲۰۳	۰/۰۱۷	(kWh)	الکتریسیته
۱/۳۹۲	۰/۴۷۹	۰/۰۰۷	۱/۶۹۱	۰/۶۱۶	۰/۰۰۹	۱/۴۱۹	۰/۴۷۹	۰/۰۰۷	(h)	ماشین
	۳۴/۳۹۵			۳۵/۷۴۷			۳۳/۷۳۵			جمع انرژی نهاده‌ها
										ستانده
۸۲/۳۰۲	۳۷/۲۵	۱	۷۵/۹۵۸	۳۷/۲۵	۱	۷۴/۰۱۱	۳۷/۲۵	۱	(L)	بیودیزل
۶/۱۴۹	۲/۷۸۳	۰/۱۱	۶/۱۹۱	۳/۰۳۶	۰/۱۲	۵/۵۲۹	۲/۷۸۳	۰/۱۱	(L)	گلیسرید
۵/۹۵۱	۲/۶۹۴	۰/۰۸	۴/۸۰۶	۲/۳۵۷	۰/۰۷	۶/۶۹۰	۳/۳۶۷	۰/۱	(L)	اضافات الکل
۰/۰۰۰۰۶۶۳	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۰۳	۰۰۰۰۶ ۰/۱	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۰۳	۰۰۰۰۳ ۰/۹	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۲	(L)	آب
۲/۳۶۲	۱/۰۶۹	۰/۰۲۴	۲/۰۸۹	۱/۰۲۵	۰/۰۲۳	۲/۳۹۰	۱/۲۰۳	۰/۰۲۷	(L)	صابون
۲/۰۵۷	۰/۹۳۱	۰/۰۱۴	۱/۳۵۵	۰/۶۶۵	۰/۰۱	۹/۲۴۷	۴/۶۵۴	۰/۰۷	(L)	مونوگلیسرید
۱/۱۸۹	۰/۵۳۸	۰/۰۰۸	۹/۶۰۱	۴/۷۰۸	۰/۰۷	۲/۱۳۸	۱/۰۷۶	۰/۰۱۶	(L)	دی گلیسرید
	۴۵/۲۶۵			۴۹/۰۴۱			۵۰/۳۳۳			جمع انرژی ستانده‌ها

انرژی مصرفی برای تولید هر لیتر بیودیزل در روش‌های فراصوت، ریزموج و مرسوم به ترتیب ۳۳/۷۳، ۳۵/۷۵ و ۳۴/۳۹ مگاژول بوده است. در روش‌های فراصوت، ریزموج و مرسوم سهم انرژی مصرفی مربوط به پسماند روغن خوراکی شامل ۷۵٪، ۷۳٪ و ۷۴٪ از کل انرژی‌های ورودی در واکنش می‌باشد. همان‌طور که مشخص شد در همه روش‌های فراصوت، ریزموج و مرسوم بیشترین سهم انرژی‌های ورودی مربوط به انرژی پسماند روغن خوراکی می‌باشد. در مقایسه روش‌های مذکور، سهم انرژی مربوط به پسماند روغن خوراکی برای روش فراصوت بیشتر بود. عملکرد واکنش در روش پرتودهی فراصوت در روش استفاده از ریزموج

۵٪ بیشتر بود در حالی که سهم انرژی پسماند روغن خوراکی در این روش ۲٪ بیشتر از روش استفاده از ریزموج در واکنش ترانس استریفیکاسیون بود.

نتیجه گیری

بیشترین عملکرد تولید و راندمان انرژی در روش مرسوم در تیمار مربوط به نسبت مولی متانول به روغن ۱:۶، زمان واکنش ۶۰ دقیقه و دمای واکنش ۶۰ درجه سلسیوس برآورد شد. عملکرد تبدیل تری گلیسرید به استرهای اسید چرب در روش پرتو دهی فراصوت و ریزموج به ترتیب ۹۹٪ و ۹۴٪ برآورد شد. انرژی مصرفی برای تولید هر لیتر بیودیزل در روش‌های فراصوت، ریزموج و مرسوم به ترتیب ۳۳/۷۳، ۳۵/۷۵ و ۳۴/۳۹ مگاژول بوده است. در تولید بیودیزل راندمان مصرف انرژی برای روش‌های فراصوت، ریزموج و مرسوم به ترتیب به ترتیب ۱/۴۹، ۱/۳۷ و ۱/۳۲ برآورد شده است.

منابع

۱. باقر پور، ح. قبادیان، ب. توکلی هاشجین، ت. محمدی، ع. فیض اله نژاد، م. زنوزی، ع. ۱۳۸۹. بهینه‌سازی پارامترهای تأثیرگذار در تولید سوخت بیودیزل با استفاده از روش ترانس استریفیکاسیون. مجله مهندسی بیوسیستم ایران، ۴۱: ۳۷-۴۳.

- Bang, J.H., Suslick, K.S. Applications of Ultrasound to the Synthesis of Nanostructured Materials. *Adv. Mater.* 22: 1039–1059.
- Bispo, M.S., da Boa Morte, E.S., Korn, M.G.A., Teixeira, L.S.G., Korn, M., Costa, A.C.S. 2005. Determination of Pb in river water samples by inductively coupled plasma optical emission spectrometry after ultrasound-assisted
- Breccia, A., Esposito, B., Fratadocchi, G.B. and Fini, A. 1999. Reaction between methanol and commercial seed oils under microwave irradiation. *Journal of microwave power and electromagnetic energy* 34, 2-7.
- Dantas, M.B., Almeida, A.A.F., Conceição, 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.
- Dantas, M.B., Almeida, A.A.F., Conceição, 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.
- Enweremadu, C.C., Mbarawa, M.M. 2009. Technical aspects of production and analysis of biodiesel from used cooking oil—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13: 2205–2224.
- Felizardo, P., Neiva Correia, M.J., Raposo, I., Mendes, J.F., Berkemeier, R., Bordado, J.M. 2006. Production of biodiesel from waste frying oils. *Waste Manage*, 26:487–94.
- Flint, E.B. and Suslick, K.S. 1991. The temperature of cavitation. *Science* 253, 1397.
- Ghobadian, B., Khatamifar, M. 2006. Biodiesel Fuel Production Using Transesterification of Waste Vegetable Oils. *Journal of Engine Research*, 8&9: 24-35.
- Gonc, L.C. alves Filho, G.A. Micke, J. 2007. Development and validation of a fast method for determination of free glycerol in biodiesel by capillary electrophoresis. *Journal of Chromatography A*, 1154: 477-480.



12. Gui, M.M., Lee, K.T., Bhatia, S. 2008. Edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiesel feedstock. *Energy*, 33:1646–53.
13. Hanh, H.D., Dong, N.T., Starvarache, C., Okitsu, K., Maeda, Y., Nishimura, R. 2008. Methanolysis of triolein by lowfrequency ultrasonic irradiation. *Energ. Convers.Manage* 49, 276–280.
14. Hanh, H.D., Dong, N.T., Starvarache, C., Okitsu, K., Maeda, Y., Nishimura, R. 2008. Methanolysis of triolein by lowfrequency ultrasonic irradiation. *Energ. Convers.Manage*. 49:276–80.
15. Kansedo, J., Lee, K.T., Bhatia, S. 2009. Cerbera odollam (sea mango) oil as a promising non-edible feedstock for biodiesel production. *Fuel*, 88:1148–50.
16. Kappe, C.O. and Stadler A. 2005. *Microwave in Organic and Medicinal Chemistry*, Wiley-VCH.
17. Kulkarni, M.G., Dalai, A.K. 2006. Waste cooking oil — an economical source for biodiesel: a review. *Ind Eng Chem Res*, 45:2901–13.
18. Leung, D.Y.C., Wu, X., Leung, M.K.H. 2009. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy*, 11:220–233.
19. Lotero, E., Liu, Y., Lopez, D.E., Suwannakarn, K., Bruce, D.A., Goodwin, J.R. 2005. Synthesis of biodiesel via acid catalysis. *Ind Eng Chem Res*, 44:5353–63.
20. Patil, P.D., Deng, S. 2009. Optimization of biodiesel production from edible and nonedible vegetable oils. *Fuel*, 88:1302–6.
21. Pinto, A.C., Guarieiro, L.L.N., Rezende, M.J.C., Ribeiro, N.M., Torres, E.A., Lopes, W.A., Pereira, P.A.P., de Andrade, J.B. 2005. Biodiesel: An Overview. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 16: 1313-1335.
22. Sensoz, S., Angin, D., Yorgun, S. 2000. Influence of particle size on the pyrolysis of rapeseed (*Brassica napus L.*): fuel properties of bio-oil. *Biomass Bioenergy*, 19:271–9.
23. Thompson, L.H., Doraiswamy, L.K. 1999. Sonochemistry: Science and Engineering. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 38: 1215-1249.
24. Stavarache, C., Vinatoru, M., Nishimura, R., Maeda, Y. 2005. Fatty acids methyl esters from vegetable oil by means of ultrasonic energy. *Ultrason. Sonochem.*12:367–72.
25. Tan, M.E., Van Gerpen, J.H. 1999. Kinematic viscosity of biodiesel and its blends with diesel fuel. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 76: 1511-1513.
26. Tan, T., Lu, J., Nie, K., Deng, L., Wang, F. 2010. Biodiesel production with immobilized lipase: A review. *Biotechnology Advances*, 28: 628–634.