

Research Article

Agricultural Engineering., 47(2) (2024) .259-277

ISSN (E): 2588-526X

DOI: 10.22055/agen.2024.46896.1727

ISSN (P): 2588-5944

Analyzing the efficiency of biodiesel production through exergy analysis of transesterification

M. Karimi^{1*}, R. Mohammadigol² and R. Rahimi³

1. Assistant Professor, Department of Biosystem Mechanics Engineering, Arak University, Arak, Iran
2. Assistant Professor, Department of Biosystem Mechanics Engineering, Arak University, Arak, Iran
3. Assistant Professor, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 12 May 2024 Accepted: 20 June 2024 *Corresponding Author: m-karimi@araku.ac.ir

Abstract

Introduction: Biodiesel is viewed as a promising alternative to fossil fuels due to its favorable chemical properties and environmental benefits. Research has shifted towards producing biodiesel from non-edible oils and waste cooking oils to avoid food scarcity issues. The high cost of production is a major challenge, with raw materials accounting for 75% of the total cost. Sustainability depends on low-cost feedstocks like waste cooking oil. Exergy analysis is a useful tool for optimizing biodiesel production by reducing energy and resource consumption and increasing production yield. The study focuses on the exergy flow of transesterification of waste cooking canola oil, with parameters like methanol:oil ratio, catalyst concentration, and temperature being evaluated.

Materials and Methods: Waste cooking oil (WCO) was used in the present study, with physicochemical properties including density, viscosity, free fatty acid content, and acid value measured. Biodiesel production using a two-step catalyzed method was carried out, with the first step being esterification to remove high water and FFA content in the waste cooking oil. The second step involved transesterification using different methanol:oil ratios, catalyst concentrations, and reaction temperatures. The FAME content of the samples was analyzed using gas chromatography and an equation was provided to calculate the FAME content of the biodiesel samples. In the process of transesterification of WCO, four balance equations were used to analyze exergy. Mass, energy, and entropy input and output must be balanced, with a portion of exergy input being destroyed. The mass exergy component is divided into physical, chemical, potential, and kinetic exergy. The overall exergy of a mixture of substances was calculated by considering physical and chemical exergy. Mixing in the transesterification process is irreversible, with potential work being wasted. Exergy transfer by heat flow and workflow was calculated using specific equations. An exergy conversion coefficient was used to estimate the chemical exergy content of fuels. Dead state conditions were considered for calculating exergy efficiency in the transesterification process.

Results and Discussion: The GC analysis of transesterification conversion products from a standard sample showed that the main components in WCO-derived biodiesel were methyl salicylate, methyl palmitate, methyl stearate, methyl oleate, methyl linoleate, and methyl oleate. The efficiency of the transesterification process under specific conditions was determined to be 90.23% with an exergy efficiency of 91.73%. Exergy analysis revealed that the exergy embodied in biodiesel was higher than that in WCO, but a portion of WCO's exergy was consumed in the production of biodiesel. The study also highlighted ways to reduce energy loss and material waste in the transesterification process, emphasizing the importance of recycling and reusing waste materials to improve overall resource efficiency. The experiment variables of methanol:oil molar ratio, KOH concentration, and reaction temperature were investigated in the transesterification process for biodiesel production. A higher methanol:oil molar ratio of 6:1 was recommended for maximum yield when using pure oil with low FFA and water content. Increasing the ratio from 4:1 to 8:1 resulted in higher

biodiesel yield and exergy efficiency. However, further increasing the ratio to 12:1 led to decreased efficiency. The KOH concentration and reaction temperature also had significant impacts on biodiesel yield and exergy efficiency. Higher catalyst concentration and reaction temperature increased exergy destruction, while a temperature increase from 45°C to 55°C improved efficiency and yield. The study suggested that careful optimization of these variables is essential for maximizing biodiesel production and minimizing exergy losses.

Conclusions: Exergy analysis is a valuable tool for assessing the environmental impacts of products, processes, or activities by quantifying energy and material usage and waste generation within a comprehensive framework. It also allows for estimating the resource requirements for processes such as transesterification in the production of renewable resources like biodiesel. In this study, the exergy flow in the transesterification of waste cooking oil was evaluated, with a focus on the impact of variables such as methanol:oil ratio, potassium hydroxide concentration, and reaction temperature on biodiesel yield, exergy efficiency, and exergy destruction. Experimental data was collected and used for exergy calculations, revealing that maximum biodiesel yield and exergy efficiency were achieved at specific conditions. Excess methanol or potassium hydroxide led to decreased efficiency and increased exergy loss in the process. Lower temperatures also resulted in higher exergy loss due to reduced conversion efficiency. Understanding the effects of these variables can help improve exergy efficiency and economic performance in commercial biodiesel production. Exergy analysis can also be used to evaluate environmental performance and aid in the development of environmental policies and resource management strategies.

Keywords: *Exergy, Biodiesel, Transesterification, Waste, Vegetable oil, Thermodynamic analysis*

بررسی بازده تولید بیودیزل با تحلیل تجربی اکسرژی و اکنش ترانس استریفیکاسیون

محمود کریمی^{۱*}، رضا محمدی گل^۲ و روح اله رحیمی^۳

- ۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه اراک، اراک، ایران
 ۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه اراک، اراک، ایران
 ۳- استادیار پژوهشی، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۳	<p>برای کاهش مصرف مواد و انرژی و ارتقای استفاده از منابع تجدیدپذیر مانند سوخت های زیستی، نیاز به اندازه گیری جریان مواد و انرژی اهمیت بیشتری پیدا می کند. تحلیل جریان اکسرژی به عنوان یک ابزار ارزیابی زیست محیطی برای محاسبه پسماندها، تعیین بازده اکسرژی، ارزیابی جایگزین ها و منابع انرژی مختلف، در تعیین سیاست های اقتصادی و زیست محیطی بسیار موثر است. این پژوهش فرآیند ترانس استریفیکاسیون پسماند روغن خوراکی را برای تولید بیودیزل با تمرکز بر کاهش مصرف مواد و انرژی و ارتقای بازده انرژی و اکسرژی بررسی می کند. اجرای واکنش ترانس استریفیکاسیون در شرایط مختلف جرم و انرژی انجام شد و تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی برای اندازه گیری ورودی و خروجی اکسرژی فرآیند تولید مورد استفاده قرار گرفت. ارزیابی تأثیر متغیرهای آزمایشی از جمله نسبت مولی متانول به روغن، غلظت هیدروکسید پتاسیم و دمای واکنش بر بازده اکسرژی و اتلاف اکسرژی در ترانس استریفیکاسیون صورت گرفت. بیشترین بازده اکسرژی (۹۱/۷ درصد) و حداقل اتلاف اکسرژی (۴/۳۲ MJ) به ازای یک کیلوگرم تولید بیودیزل با نسبت مولی متانول به روغن ۸:۱، غلظت هیدروکسید پتاسیم ۱ درصد وزنی و دمای واکنش ۵۵°C حاصل شد. تحلیل اکسرژی و اکنش ترانس استریفیکاسیون نشان داد که استفاده بیش از حد پیهنه متانول و کاتالیست در فرآیند تولید بیودیزل باعث افزایش اتلاف اکسرژی به دلیل تولید و هدررفت مواد پسماند شده که این امر باعث کاهش بازده اکسرژی شده است.</p>
پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۰۳/۳۱	
<p>کلمات کلیدی: اکسرژی، بیودیزل، ترانس استریفیکاسیون، پسماند، روغن گیاهی، تحلیل ترمودینامیکی</p>	
* عهده دار مکاتبات	
Email: m-karimi@araku.ac.ir	

مقدمه

مانند غیرسمی بودن، تجزیه پذیری زیستی و خنثی بودن کربن به عنوان یک سوخت جایگزین برای سوخت های فسیلی مورد توجه قرار گرفته است (۵۰، ۲۰، ۲۵، ۲۶

بیودیزل به دست آمده از منابع تجدیدپذیر به دلیل خواص شیمیایی مناسب و همچنین مزایای زیست محیطی

اکسرژی و افزایش بازده تولید بیودیزل به طور همزمان بهبود یابد.

اکسرژی یک خاصیت ترمودینامیکی است که حداکثر کار ممکن را که می توان از یک منبع استخراج کرد، در صورتی که آن منبع به طور کامل (از نظر حرارتی، مکانیکی و شیمیایی) با محیط در حال تعادل باشد، تعیین می کند. بر خلاف انرژی، اکسرژی یک کمیت ثابت نیست. در هر فرآیند واقعی، مقداری اکسرژی از بین می رود (۵۴، ۱۷ و ۲۲). فرآیندی که از نظر ترمودینامیکی کارآمدتر باشد، اکسرژی کمتری را از بین می برد و فرآیندی که مقادیر زیادی اکسرژی را از بین می برد، باید برای بهبود احتمالی مورد بررسی قرار گیرد (۵). تعیین مقدار اکسرژی تخریب شده در یک فرایند به دو دلیل اصلی مفید است. اول، شناسایی یک معیار عملکرد، مانند بازده اکسرژی، برای یک فرایند است. بسته به خروجی مورد نظر فرایند (به عنوان مثال، کار شفت^۳، یا محصول با خلوص بالا)، بازده اکسرژی ممکن است متفاوت تعریف شود (۴۴ و ۱۴). با این حال، تمام تعاریف به معنای مقایسه مقدار اکسرژی ورودی به فرایند تولید با مقدار اکسرژی خروجی از فرایند است. دلیل دوم برای ردیابی تخریب اکسرژی، تجزیه و تحلیل عملکرد داخلی یک فرایند است (۸). این نه تنها شامل یافتن بازده اکسرژی فرایند، بلکه شامل شناسایی مکان‌هایی در فرایند هم می شود که تخریب اکسرژی در آن‌ها رخ می دهد (۳۳، ۱۳ و ۴۱).

ردیابی تخریب اکسرژی و تجزیه و تحلیل کارایی اکسرژی کمک می کند تا از طریق بهینه سازی فرآیند، پایداری فرایند تولید بهبود یابد. به جز کارایی تبدیل (عملکرد بیودیزل)، کارایی اکسرژی در یک فرایند می تواند باعث کاهش مصرف انرژی و منابع و همچنین افزایش تولید بهینه شود. در حالی که در تحقیقات گذشته، کارهای ارزشمندی در مورد تجزیه و تحلیل اکسرژی

(۲۷). به دلیل برخی محدودیت‌ها در مورد نسل اول سوخت‌های زیستی مانند مسائل مربوط به غذا در مقابل سوخت، تحقیقات بر روی تولید بیودیزل از روغن‌های غیرخوراکی، روغن‌های خوراکی پسماند^۱ (۳۱) و سایر منابع اولیه مانند جلبک (۱۶، ۳۲ و ۳۱)، ریزجلبک (۷، ۱۸ و ۳۶)، جاتروفا (۱۲ و ۴۵)، روغن گریس (۳۴) و روغن ماهوا (۲) صورت گرفته است.

بیودیزل از طریق واکنش استریفیکاسیون اسیدهای چرب یا ترانس استریفیکاسیون تری گلیسیریدها با الکل‌های زنجیره کوتاه مانند متانول و اتانول تولید می شود (۲۹ و ۲۸). متانول بیشتر به دلیل قیمت پایین آن در مقایسه با سایر الکل‌ها استفاده می شود، بنابراین بیودیزل معمولاً به متیل استرهای اسید چرب^۲ اشاره می کند. با این حال، یکی از موانع عمده برای کاربرد گسترده بیودیزل، هزینه بالای آن در مقایسه با دیزل فسیلی است (۵۵). گزارش شده است که هزینه مواد اولیه حدود ۷۵ درصد از کل هزینه تولید بیودیزل است (۵۴). بنابراین، پایداری تولید بیودیزل به مواد اولیه کم هزینه مانند روغن خوراکی پسماند برای کاهش هزینه کلی تولید بیودیزل بستگی دارد (۱۷).

یکی از ابعاد تولید پایدار که بر روی سایر ابعاد آن یعنی اقتصادی، زیست محیطی، و اجتماعی تاثیر می گذارد، بعد فنی می باشد (۲۳). در راستای تولید بیودیزل پایدار، بازده عملکرد، انرژی، و اکسرژی مهم است. معیارهای مبتنی بر اکسرژی شاخص بسیار خوبی را برای بهبود فرایند تولید ارائه می دهند، زیرا آنها جریان مواد و انرژی یک فرآیند را هم از لحاظ کمیت و هم از لحاظ کیفیت مورد ارزیابی قرار می دهند (۵، ۴۴ و ۲۱). به هر حال، غیر از بازده انرژی و اکسرژی، عملکرد تولید نیز مهم است؛ چرا که هدف اصلی این فرآیند تولید بیودیزل می باشد. بنابراین فرایند باید از لحاظ کاهش تخریب

1- Waste cooking oil

2- Fatty acid methyl ester

3- Shaft work

تولید بیودیزل با استفاده از روش کاتالیز دو مرحله ای

واکنش کاتالیزور اسیدی به نام استریفیکاسیون به عنوان اولین گام برای حذف محتوای بالای آب و اسید چرب آزاد در روغن گیاهی پسماند و جلوگیری از اتلاف روغن از طریق صابون سازی ضروری بود. برای این منظور، ۵۰۰ گرم روغن پسماند، ۰/۸ گرم اسید سولفوریک و ۱۰۰ میلی لیتر متانول در یک همزن صفحه داغ مغناطیسی با کنترل کننده دما، به مدت یک ساعت مخلوط شدند. دور همزن و دمای واکنش به ترتیب در ۴۰۰ rpm و ۵۵ °C ثابت نگه داشته شد. پس از تکمیل واکنش، مخلوط به مدت ۱ ساعت ته نشین شد تا دو فاز مایع مجزا ایجاد شود. متانول اضافی در فاز بالا با استفاده از کیف جداسازی حذف شد. فاز باقیمانده حاوی متیل استر و تری گلیسرید واکنش نداد و همچنین کمتر از ۴ درصد وزنی اسیدهای چرب آزاد از واکنش استریفیکاسیون جمع آوری شد تا در مرحله دوم یک واکنش کاتالیز شده قلیایی به نام ترانس استریفیکاسیون، مورد استفاده قرار گیرد.

نسبت مولی متانول به روغن در سه سطح ۴:۱، ۸:۱ و ۱۲:۱، غلظت کاتالیزور (هیدروکسید پتاسیم) در روغن در سه سطح ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی و دمای واکنش در سه سطح ۴۵، ۵۰ و ۵۵ درجه سلسیوس به عنوان متغیرهای آزمایشی ترانس استریفیکاسیون در نظر گرفته شدند. آزمایش ها بر اساس آزمایش تک عاملی انجام شد، بدین معنی که برای بررسی هر متغیر، دو متغیر دیگر در نقطه مرکز ثابت بودند و فقط متغیر مورد نظر تغییر می کرد (جدول ۲). بدین ترتیب تأثیر همه متغیرها بر تبدیل واکنش، بازده اکسرژی و تخریب اکسرژی بررسی شد. هر نمونه حاوی ۱۰۰ گرم از مخلوط تهیه شده در مرحله اول به اضافه مقادیر تعیین شده متانول و هیدروکسید پتاسیم به مدت یک ساعت در دمای واکنش تعیین شده هم زده شد. سپس مخلوط واکنش حفظ شد و اجازه داده شد تا ته نشین شود و به دو فاز جدا شود: بیودیزل خام در

واحد های تولید بیودیزل صورت گرفته است (۴۰، ۹ و ۴۲)، اما یک خلا در دانش در زمینه تاثیرات جریان انرژی و منابع بر بازده اکسرژی و تخریب اکسرژی واکنش ترانس استریفیکاسیون با استفاده از داده های تجربی وجود دارد. ارزیابی جریان اکسرژی ترانس استریفیکاسیون (واکنش اصلی در فرآیند تولید بیودیزل) اطلاعات ارزنده ای برای مدیریت پسماند و بهینه سازی فرآیند از نظر انرژی و منابع در اختیار محققان و تولید کنندگان قرار می دهد. بازده اکسرژی به عنوان یک ابزار مفید، نسبت اکسرژی ورودی به خروجی ترانس استریفیکاسیون را اندازه گیری می کند که می تواند از دو طریق مصرف بهینه ورودی ها و کاهش ضایعات در خروجی ها بهینه شود. هدف از تحقیق حاضر، بررسی بازده تولید بیودیزل حاصل از پسماند روغن کانولای پخت و پز با تحلیل اکسرژی واکنش ترانس استریفیکاسیون می باشد. اثر پارامترهای تجربی شامل نسبت مولی متانول به روغن، غلظت کاتالیزور (هیدروکسید پتاسیم) و دمای واکنش بر جریان اکسرژی ترانس استریفیکاسیون پسماند روغن خوراکی مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش ها

پسماند روغن کانولای پخت و پز جمع آوری و در ظرف شیشه ای در دمای اتاق نگهداری شد. خواص فیزیکوشیمیایی روغن خوراکی پسماند شامل چگالی، گرانیوی، محتوای اسید چرب آزاد و مقدار pH به ترتیب 0.906 g/cm^3 ، 51.3 cP ، 5.68% و 11.16 بود. چگالی و ویسکوزیته روغن به ترتیب توسط پیکنومتر و ویسکومتر اندازه گیری شد، در حالی که محتوای اسید چرب آزاد و مقادیر اسید با تیتراسیون اسید-باز تعیین شد. متانول، هیدروکسید پتاسیم (۹۷٪)، اسید فسفریک، متیل سالیسیلات، متیل پالمیتات، متیل استئارات، متیل اولئات، متیل لینولئات و متیل لینولئات موجودی آزمایشگاهی بودند یا از Sigma-Aldrich خریداری شدند.

تجزیه و تحلیل اکسرژی

چهار معادله تعادل باید در فرآیند ترانس استریفیکاسیون روغن خوراکی پسماند برای یک حالت پایدار کلی (بدون انباشتگی) اعمال شود تا بتوان اثر متقابل کار و گرما را پیدا کرد. ورودی و خروجی جرم همیشه با توجه به اصل بقای جرم که در معادله (۲) ارائه شده است متعادل است. انرژی ورودی و خروجی نیز بر اساس قانون اول ترمودینامیک یا اصل بقای انرژی که توسط معادله (۳) ارائه شده است متعادل می شوند. طبق قانون دوم ترمودینامیک، در فرآیندهای واقعی آنتروپی افزایش می یابد، همانطور که با معادله (۴) تعریف می شود. در نهایت بخشی از اکسرژی ورودی همیشه مطابق با معادله (۵) از بین می رود.

$$\sum_i (\dot{m}_i)_{in} = \sum_i (\dot{m}_i)_{out} \quad (2)$$

$$\sum_i (\dot{m}_i \times h_i)_{in} = \sum_i (\dot{m}_i \times h_i)_{out} + \dot{Q} - \dot{W} \quad (3)$$

$$\sum_i (\dot{m}_i \times s_i)_{in} = \sum_i (\dot{m}_i \times s_i)_{out} + \sum_i \frac{\dot{Q}_i}{T_i} = \dot{S}_{gen} \quad (4)$$

$$\dot{e}_{mass,in} - \dot{e}_{mass,out} + \dot{e}_{heat} - \dot{e}_{work} = \dot{e}_{loss} \quad (5)$$

که در آن \dot{m}_i نرخ تغییرات جرم ماده i در مقادیر ورودی به سیستم، \dot{m}_i مقادیر خروجی از سیستم، h آنتالپی، s آنتروپی، \dot{e}_{mass} نرخ تغییرات اکسرژی ماده، \dot{e}_{heat} نرخ تغییرات اکسرژی گرما، \dot{e}_{work} نرخ تغییرات اکسرژی کار و \dot{e}_{loss} نرخ تغییرات اکسرژی تخریب شده می باشد.

مولفه اکسرژی جرمی به چهار جزء خاص شامل اکسرژی شیمیایی، فیزیکی، پتانسیل و جنبشی تقسیم می شود که در معادله (۶) بیان می شود.

$$\dot{e}_{mass} = \dot{e}_{phy} + \dot{e}_{ch} + \dot{e}_{pot} + \dot{e}_{kin} \quad (6)$$

که در آن \dot{e}_{phy} نرخ تغییرات اکسرژی فیزیکی ماده، \dot{e}_{ch} نرخ تغییرات اکسرژی شیمیایی ماده، \dot{e}_{pot} نرخ

بالا و گلیسرول در قسمت پایین. متانول باقیمانده تحت خلاء (1 ± 10 میلی متر جیوه) در دمای 50 درجه سلسیوس با تبخیرساز چرخشی بازیابی شد و سپس بیودیزل خام با 10 درصد وزنی آب در دمای 80 درجه سلسیوس شسته شد تا صابونی که در زمان واکنش تشکیل شده بود، خارج شود. سپس بیودیزل خام مرطوب تحت خلاء (1 ± 5 میلی متر جیوه) در دمای 90 درجه سلسیوس به مدت یک ساعت با استفاده از یک تبخیرکننده چرخشی برای تهیه بیودیزل خالص خشک شد.

اندازه گیری مقدار بیودیزل

محتویات متیل استرهای اسید چرب در نمونه های آزمایشی توسط کروماتوگرافی گازی (Shimadzu GC-2010)، مجهز به آشکارساز یونیزاسیون شعله هیدروژن (FID) اندازه گیری شد. جداسازی بر روی یک ستون مویرگی DB-1HT (30 متر \times 0.25 میلی متر) انجام شد. سامانه کروماتوگرافی گازی بر اساس غلظت های مختلف متیل سالیسیلات، متیل پالمیتات، متیل استئارات، متیل اولئات، متیل لینولئات و متیل اولئات کالیبره شد.

در طول زمان آنالیز، دمای ورودی نمونه 370 °C و دمای آشکارساز 375 °C بود. دمای ستون به طور منظم افزایش یافت. دمای ستون ابتدا به مدت 2 دقیقه در 150 درجه سلسیوس حفظ شد، سپس با سرعت 10 درجه در دقیقه به 360 درجه سلسیوس افزایش یافت و در نهایت به مدت 10 دقیقه در دمای 360 درجه سلسیوس حفظ شد. نیتروژن در فشار پیش ستون 100 کیلو پاسکال به عنوان گاز حامل استفاده شد (11 و 35). محتوای FAME نمونه ها با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد:

$$X(\%) = \frac{m_{FAME}}{m_{CB}} \times 100\% \quad (1)$$

که در آن X محتوای FAME است، m_{FAME} وزن FAME محاسبه شده با روش کالیبراسیون داخلی (kg)، و m_{CB} وزن بیودیزل خام (kg)، است (11 ، 35).

$$RT_0 \sum_i \left(n_i \ln \left(\frac{n_i}{\sum_i n_i} \right) \right)$$

که در آن Ex اکسرژی کلی مخلوطی از مواد است، n_i تعداد مول های ماده i است، ε_i^0 اکسرژی مولی استاندارد ماده خالص i، R ثابت گاز مولی، T_0 دمای محیط، T دمای ماده i، P_i فشاری است که ماده i به طور برگشت پذیر در دمای ثابت T_0 به سمت حالت حجم V_0 در فشار P_0 در تعادل با اتمسفر منبسط می شود، P_0 فشار اتمسفر، و $C_{p,i}^{mean}$ ظرفیت گرمایی مولی ماده i است. چهار عبارت مختلف این معادله به ترتیب اکسرژی شیمیایی، اکسرژی فشار برای مواد گازی، اکسرژی حرارتی ناشی از تغییر دما و اکسرژی اختلاط ناشی از تغییر غلظت مواد را نشان می دهد (۴).

اختلاط در ترانس استریفیکاسیون روغن پسماند یک فرآیند برگشت ناپذیر است که در آن تمام پتانسیل کاری هدر می رود. اگر بتوان اختلاط را به صورت برگشت پذیر انجام داد، اتلاف اکسرژی صورت نمی گیرد. به هر حال، تفکیک مواد اولیه بعد از اختلاط به صورت خود به خودی امکان پذیر نیست که نشان دهنده برگشت ناپذیر بودن فرآیند است و بنابراین واکنش با اتلاف اکسرژی مواجه است. اگر اکسرژی را معادل کار قرار دهیم، حداکثر مقدار کار تولید شده در فرآیند با اختلاف محتویات اکسرژی جریان ورودی و خروجی برابر می باشد. مجموع اکسرژی شیمیایی یک مخلوط برابر است با مجموع اکسرژی شیمیایی تمام اجزای مخلوط علاوه بر تلفات اکسرژی در فرآیند اختلاط. بر اساس تعادل اکسرژی، انتقال اکسرژی توسط جریان گرما در دمای T و اکسرژی با جریان کار به ترتیب با معادله (۱۰) و (۱۱) محاسبه شد (۶).

$$\dot{e}_{heat} = \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \times \dot{Q} \quad (10)$$

$$\dot{e}_{work} = \dot{W} \quad (11)$$

معمولاً ضریب تبدیل اکسرژی برای تعیین منابع انرژی بر حسب واحد اکسرژی (ژول) تعریف می شود.

تغییرات اکسرژی پتانسیل و \dot{e}_{kin} نرخ تغییرات اکسرژی جنبشی می باشد.

در شرایط تحقیق حاضر، اکسرژی پتانسیل و جنبشی ناچیز است و از سهم آنها در تعادل کل اکسرژی چشم پوشی می شود. اکسرژی فیزیکی به دما، آنتالپی و آنتروپی بستگی دارد، همانطور که در معادله (۷) نشان داده شده است.

$$\dot{e}_{phy} = (\dot{h} - \dot{h}_0) - T_0 \times (\dot{s} - \dot{s}_0) \quad (7)$$

که در آن \dot{h} نرخ تغییرات آنتالپی در شرایط آزمایش، \dot{h}_0 نرخ تغییرات آنتالپی در شرایط مرجع، T_0 دمای مرجع (K) (۲۹۳)، \dot{s} نرخ تغییرات آنتروپی در شرایط آزمایش و \dot{s}_0 نرخ تغییرات آنتروپی در شرایط مرجع می باشد.

اکسرژی شیمیایی استاندارد بسیاری از ترکیبات را می توان در گزارشات زارگوت و همکاران^۱ (۱۹۹۸) و آیرس و آیرس (۱۹۹۹) یافت (۵۱، ۳ و ۳۸). هنگامی که در دسترس نباشد، محتوای اکسرژی شیمیایی هر ماده خالص را می توان با معادله تقریبی (۸) محاسبه کرد که تابعی از اکسرژی شیمیایی هر ترکیب عنصری، تعداد اتم های هر عنصر موجود در جریان و انرژی آزاد گیبس برای تشکیل ترکیب است (۵۱، ۳ و ۳۸).

$$e_{ch}^0 = \Delta G_f^0 + \sum_i n_{elem} \times e_{ch,i}^0 \quad (8)$$

که در آن e_{ch}^0 اکسرژی شیمیایی ماده است، ΔG_f^0 نشان دهنده انرژی آزاد گیبس استاندارد تشکیل ماده و $e_{ch,i}^0$ اکسرژی شیمیایی i^{th} عنصر خالص ماده است. اکسرژی مواد با تشکیل یک بخش فیزیکی و یک بخش شیمیایی تعیین می شود. با در نظر گرفتن اکسرژی فیزیکی و شیمیایی، اکسرژی کلی مخلوطی از مواد E به صورت معادله (۹) بیان می شود (۴):

$$Ex = \sum_i n_i \varepsilon_i^0 + RT_0 \sum_i n_i \ln \frac{P_i}{P_0} + \sum_i n_i C_{p,i}^{mean} \left(T - T_0 - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right) + \quad (9)$$

واکنش ۵۵ درجه سانتیگراد) فهرست می کند. تخریب اکسرژی داخلی، که با کم کردن کل اکسرژی خروجی (Exout) از کل اکسرژی ورودی (Exin) برای عملیات محاسبه می شود، اجتناب ناپذیر است (۴۶، ۱).

تخریب اکسرژی خارجی قابل اجتناب که می تواند از طریق پیشرفت های فناوری یا منابع انرژی جایگزین به حداقل برسد، معادل اکسرژی کل تمام جریان های پسماند تولید شده در طول فرآیند تولید است. موازنه جرم و جریان های اکسرژی ترانس استریفیکاسیون تحت شرایط مرجع در شکل ۲ نشان داده شده است. ورودی های اولیه برای واکنش ترانس استریفیکاسیون، روغن خوراکی پسماند و متانول بودند، در حالی که خروجی های اصلی متیل استرهای اسید چرب یا بیودیزل، گلیسرول، متانول و روغن پسماند باقیمانده در واکنش بود. محتوای اکسرژی بیودیزل $38/8 \text{ MJ/kg}$ محتوای اکسرژی روغن پسماند $36/7 \text{ MJ/kg}$ می باشد (۲۱). با این حال، نمودار جریان در شکل ۲ نشان می دهد که $1/06$ مگاژول اکسرژی روغن خوراکی پسماند در فرآیند ترانس استریفیکاسیون برای تولید ۱ مگا ژول بیودیزل مصرف شده است.

بازده تبدیل (بازده تولید بیودیزل) در ترانس استریفیکاسیون تحت شرایط ذکر شده $90/23$ درصد با بازده اکسرژی $91/73$ درصد تعیین شد که با تنظیمات فرآیند مانند بهینه سازی متغیرهای واکنش، کاهش محتوای اسیدهای چرب آزاد، آب و ناخالصی های موجود در روغن پسماند می توان آن را بیشتر بهبود بخشید. پس از روغن پسماند، متانول به عنوان بیشترین اکسرژی در بین ورودی ها شناخته شد. برای تولید ۱ مگاژول بیودیزل، 168 کیلوژول اکسرژی از طریق متانول استفاده شد، در حالی که بخش قابل توجهی از آن که معادل 111 کیلوژول اکسرژی بود بدون واکنش در مخلوط آزمایش باقی ماند. هشتاد درصد متانول باقیمانده بازیافت شد و 20 درصد آن به عنوان ضایعات در نظر

از این ضریب می توان برای تخمین میزان اکسرژی شیمیایی سوخت ها با توجه به ارزش حرارتی یا آنتالپی آنها استفاده کرد. ضریب اکسرژی برق $1/00$ در نظر گرفته شده است، که نشان می دهد که ۱ کیلوژول انرژی الکتریکی مربوط به جریان اکسرژی ۱ کیلوژول است (۱۹).

یک موازنه جرم کلی در سراسر ترانس استریفیکاسیون روغن پسماند انجام شد و سپس خواص ترمودینامیکی مورد نیاز برای ایجاد تعادل اکسرژی به دست آمد (۴۰). اکسرژی های شیمیایی و فیزیکی ورودی و خروجی برای فرآیند تعریف شده ترانس استریفیکاسیون روغن پسماند محاسبه شد. اکسرژی برای هر ترکیب، مخلوط و کاربرد تعیین شد. شرایط حالت مرجع 298 K و $101/325 \text{ kPa}$ برای بازده اکسرژی هر آزمایش مربوط به ترانس استریفیکاسیون با استفاده از معادله (۱۲) محاسبه شد:

$$\eta = 1 - \left(\frac{e_{loss}}{e_{input}} \right) \quad (12)$$

نتایج و بحث

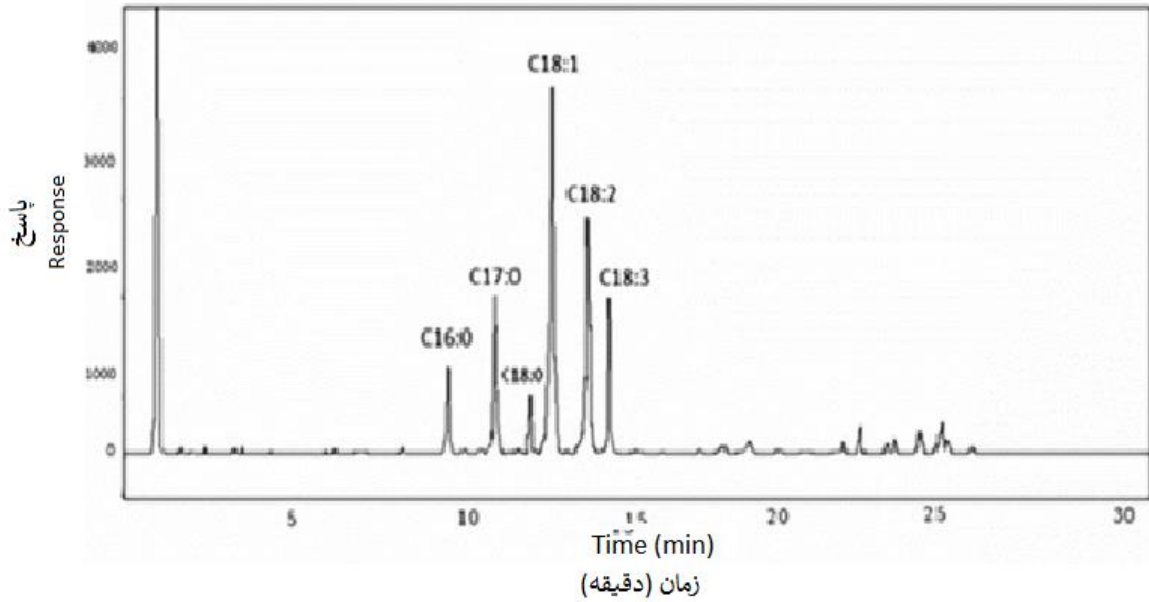
تجزیه و تحلیل کروماتوگرافی گازی بر روی محصولات حاصل از تبدیل ترانس استریفیکاسیون از یک نمونه استاندارد در شکل ۱ نمایش داده شده است. نتایج نشان داد که اجزای اصلی در بیودیزل حاصل از روغن پسماند شامل متیل سالیسیلات، متیل پالمیتات، متیل استئارات، متیل اولئات، متیل لینولئات و متیل اولئات بودند. سپس با استفاده از نسبت نواحی زیر پیک هر متیل استر به استاندارد داخلی و غلظت استاندارد، مقادیر متیل استرها اندازه گیری شدند.

شناسایی هدررفت مواد و اتلاف اکسرژی

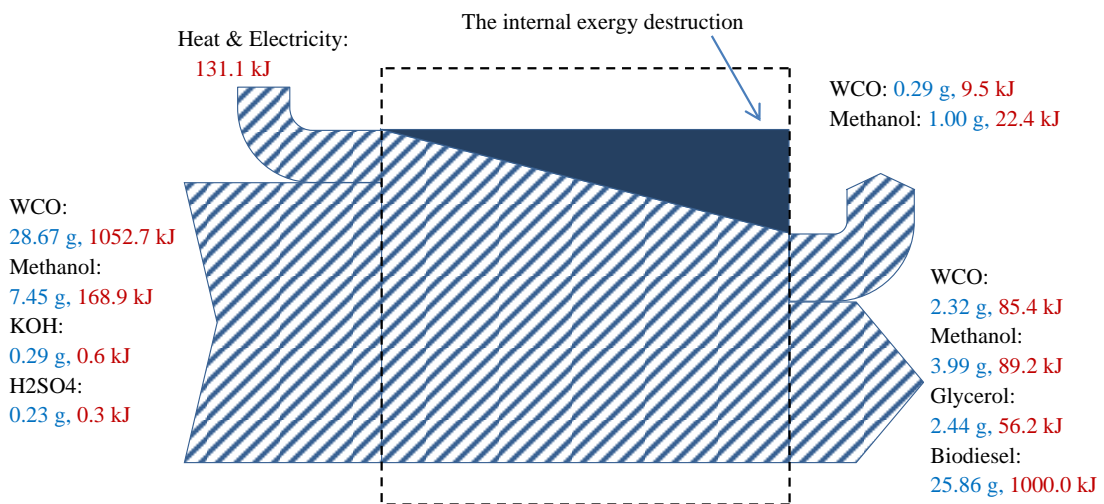
جدول ۱ اکسرژی شیمیایی ورودی ها، خروجی ها و ضایعات را در ترانس استریفیکاسیون روغن پسماند تحت شرایط مرجع یا شاهد (نسبت مولی متانول به روغن $8:1$ ، غلظت هیدروکسید پتاسیم 1 درصد وزنی و دمای

سولفوریک و هیدروکسید پتاسیم اثرات زیست محیطی قابل توجهی دارند، اما اکسرژی این کاتالیزورهای شیمیایی مصرف شده در استریفیکاسیون تقریباً ناچیز بود.

گرفته شد. گرما و برق برای هم زدن با مصرف ۱۳۱ کیلوژول اکسرژی به ازای هر ۱ مگا ژول تولید بیودیزل در جایگاه سوم در میان ورودی های اکسرژی قرار گرفت. در حالی که کاتالیزورهای شیمیایی مانند اسید



شکل (۱) کروماتوگرام گازی بیودیزل مشتق شده از روغن خوراکی پسماند
Figure (1) The GC chromatogram of WCO-derived biodiesel



شکل (۲) نمودار جریان جرم و اکسرژی ساده شده برای ترانس استریفیکاسیون روغن خوراکی پسماند (WCO)
Figure (2) The simplified mass and exergy flow diagram for the transesterification of WCO

کریمی و همکاران: بررسی بازده تولید بیودیزل با...

جدول (۱) اکسرژی شیمیایی مواد اصلی در ترانس استریفیکاسیون
Table (1) Chemical exergy of major substances in the transesterification

اگسرژی شیمیایی Chemical Exergy (kJ)	جرم مولی Molecular mass (g/mol)	جرم mass (g)	اگسرژی شیمیایی استاندارد Standard chemical exergy (kJ/mol)	مواد Substance
				ورودی Input
3672.13	974.5	100	35785	روغن خوراکی پسماند WCO
1.33	98	0.8	163.4	اسید سولفوریک Sulfuric acid
1.91	56	1	107	هیدروکسید پتاسیم Potassium hydroxide
589.43	32	26.26	718	متانول Methanol
4264.81				جمع Total
				خروجی Output
3487.77	324	90.23	12524	بیودیزل Biodiesel
196.24	92.1	8.54	2114	گلیسرول Glycerol
311.58	32	13.88	718	متانول Methanol
297.64	974.5	8.10	35785	روغن خوراکی پسماند WCO
4293.25				جمع Total
				ضایعات Waste
33.04	974.5	1.01	31785	روغن خوراکی پسماند WCO
77.89	32	3.47	718	متانول Methanol
110.94				جمع Total

نسبت داد. کریمی و همکاران^۱ (۲۱) همچنین بازده اکسرژی ۸۰٪ را برای ترانس استریفیکاسیون روغن پسماند با استفاده از لیپاز تثبیت شده گزارش کردند، که

در مقایسه با سایر تحقیقات، بازده اکسرژی ۹۰ درصد برای ترانس استریفیکاسیون روغن پالم توسط ولاسکوز و همکاران (۴۷) گزارش شد که اعتبار نتایج تحقیق حاضر را افزایش می‌دهد. تفاوت جزئی بازده اکسرژی را می‌توان به تفاوت در مواد اولیه، غلظت مواد و شرایط فرآیند

اکسرژی آن اندازه گیری کرد که اساساً معیاری برای کیفیت انرژی آن است. از طریق فرآیند ترانس استریفیکاسیون، کیفیت روغن خوراکی پسماند از محتوای اکسرژی $36/7$ MJ/kg به $38/8$ MJ/kg زمانی که به بیودیزل تبدیل می شود، بهبود می یابد. با محاسبه اکسرژی مواد، می توان ارزش محصولات جانبی و مواد پسماند را بهتر درک کرد و سیستم های بازیافت کارآمدتری طراحی کرد (۱۹).

تأثیر متغیرهای آزمایش بر جریان اکسرژی

نسبت استوکیومتری متانول به تری گلیسیرید در ترانس استریفیکاسیون ۳ به ۱ است. با این حال، متانول اضافی برای هدایت ترانس استریفیکاسیون تری گلیسیرید مورد نیاز است که منجر به افزایش بازده بیودیزل می شود. اگر از روغن خالص با محتوای کم اسیدهای چرب آزاد و آب به عنوان ماده اولیه در ترانس استریفیکاسیون کاتالیز شده قلیایی استفاده شود، نسبت مولی متانول به روغن برای دستیابی به حداکثر بازده ممکن ۶ به ۱ می باشد. غلظت بالای اسیدهای چرب آزاد و آب در روغن، ترانس استریفیکاسیون با کاتالیزور قلیایی را به سمت صابونی شدن سوق می دهد و بازده بیودیزل را کاهش می دهد و همچنین مشکلات اساسی برای جداسازی و خالص سازی محصول در پایین دست ایجاد می کند. کاتالیزور اسیدی یک جایگزین تجاری مناسب برای تبدیل مواد اولیه تری گلیسیرید با غلظت بالای اسیدهای چرب آزاد و آب مانند روغن پسماند می باشد.

تفاوت این دو نوع کاتالیزور در این است که سرعت واکنش ترانس استریفیکاسیون با کاتالیزور اسیدی کاهش می یابد و نسبت مولی متانول به روغن ۳۰ به ۱ و حتی ۵۰ به ۱، برای تحمیل واکنش به تولید متیل استرهای اسید چرب مورد نیاز است (۴۳، ۱۵). فرآیند واکنش در تحقیق حاضر شامل هر دو کاتالیزور اسیدی و قلیایی در مراحل جداگانه بود. پس از کاهش محتوای اسیدهای چرب آزاد و آب از طریق استریفیکاسیون روغن پسماند به کمک

این تفاوت قابل توجه با تحقیق حاضر به کاتالیزور مورد استفاده در ترانس استریفیکاسیون نسبت داده می شود. تثبیت لیپاز بر روی مواد نانو باعث تخریب قابل توجه اکسرژی و در نتیجه کاهش بازده اکسرژی شده است.

برای تولید ۱ مگاژول بیودیزل، فرآیند ترانس استریفیکاسیون شامل ۹۱ کیلوژول افت اکسرژی داخلی، با سهم $6/7$ درصد از کل ورودی اکسرژی بود. کل تخریب اکسرژی، شامل تلفات داخلی و خارجی، 123 کیلوژول با سهم $9/1$ درصد از کل ورودی اکسرژی، متناسب به اتلاف حرارت و مواد واکنش نداده تعیین شد. به طور کلی، اتلاف اکسرژی مرتبط با اتلاف گرما را نیز می توان از طریق استفاده مجدد از گرمای حین فرآیند به حداقل رساند که منجر به کاهش عرضه انرژی و بهبود بازده اکسرژی می شود. مواد واکنش نداده را می توان برای استفاده مجدد در فرآیند، بازیابی و ذخیره کرد تا مصرف مواد را کاهش داد. به بیان دیگر از طریق بازیافت پسماندهای فرآیند می توان از اتلاف اکسرژی خارجی جلوگیری کرد، که باعث افزایش بازده تبدیل و بازده اکسرژی خواهد شد. به عنوان مثال، اسیدهای چرب آزاد اولیه واکنش نداده را می توان برای اسیدی کردن فاز گلیسرول در ترانس استریفیکاسیون استفاده کرد و سپس در پیش استریفیکاسیون برای افزایش بازده تبدیل به متیل استرهای اسید چرب استفاده مجدد کرد (۱۹). انتخاب های فناوری همچنین می توانند به طور قابل توجهی بر بازده اکسرژی و اتلاف اکسرژی تأثیر بگذارند و متعاقباً بر شاخص تجدیدپذیری فرآیند ترانس استریفیکاسیون تأثیر گذارند.

تبدیل روغن خوراکی پسماند به بیودیزل امکان بازیافت و استفاده مجدد از مواد زائد دارای محتوای انرژی بالا را فراهم می کند. با استفاده از روغن خوراکی پسماند به عنوان سوخت، به ایجاد یک منبع انرژی پایدار و در عین حال کاهش انتشار مواد مضر در محیط کمک شده است. کیفیت یک ماده را می توان با محتوای

کریمی و همکاران: بررسی بازده تولید بیودیزل با...

کاهش کل تخریب اکسرژی ترانس استریفیکاسیون شد (شکل ۳). افزایش بازده بیودیزل از نظر عددی بیشتر از راندمان اکسرژی بود. در نسبت مولی متانول به روغن ۴:۱، اگرچه بازده بیودیزل بسیار پایین بود ولی بازده اکسرژی افت شدیدی نداشت. با توجه به اینکه ورودی جرم و متعاقباً اکسرژی شیمیایی مرتبط با متانول در نسبت مولی متانول به روغن ۴:۱ کمتر از نسبت ۸:۱ بود، ورودی اکسرژی کم توانست تا حدی کاهش خروجی اکسرژی

کاتالیزور اسیدی در مرحله اول، ترانس استریفیکاسیون با کاتالیزور قلیایی برای تبدیل عمده تری از تری گلیسیرید با اعمال متغیرهای آزمایش در مرحله دوم انجام شد.

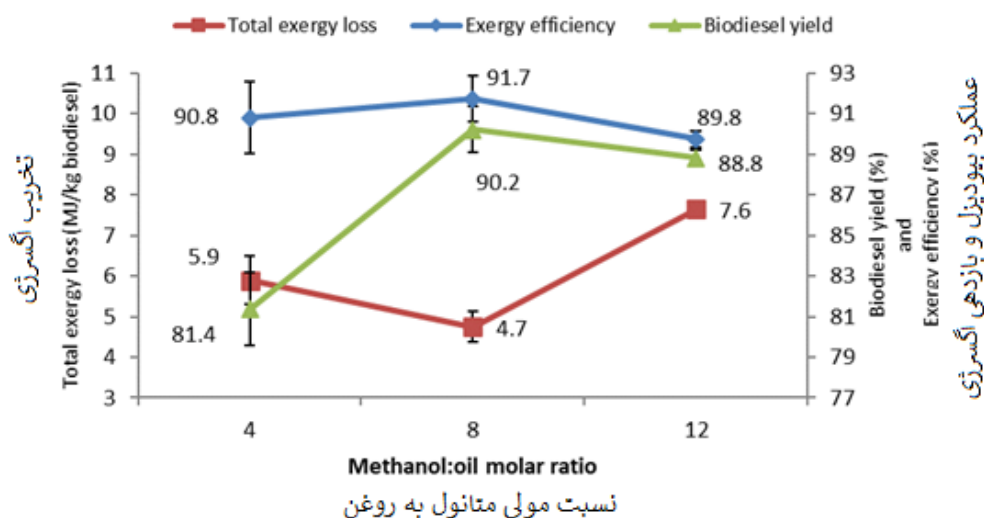
سه سطح ۴:۱، ۸:۱، ۱۲:۱ برای نسبت مولی متانول به روغن در ترانس استریفیکاسیون با کاتالیزور قلیایی اعمال شد و بازده بیودیزل همراه با نتایج آنالیز اکسرژی در جدول ۲ ارائه شده است.

افزایش نسبت مولی متانول به روغن از ۴:۱ تا ۸:۱ باعث افزایش بازده اکسرژی و بازده تولید بیودیزل و

جدول (۲) بازده بیودیزل و نتایج جریان اکسرژی برای یک کیلوگرم تولید بیودیزل در ترانس استری در نقاط طراحی

Table (2) Biodiesel yield and the results of exergy flow for one kg biodiesel production in the transesterification at the design points

اتلاف اکسرژی بیرونی	اتلاف اکسرژی درونی	اکسرژی خروجی	اکسرژی ورودی	عملکرد Yield (%)	دما Temperature (°C)	کاتالیست Catalyst (%.wt)	متانول به روغن Methanol:oil (mol/mol)
External exergy loss (MJ)	Internal exergy loss (MJ)	Output exergy (MJ)	Input exergy (MJ)				
2.41	3.49	42.99	48.89	81.37	55	1	4
2.67	2.08	47.60	52.34	90.23	55	1	8
4.73	2.92	48.03	55.67	88.81	55	1	12
3.56	3.22	45.56	52.34	83.25	55	2	8
4.29	4.15	43.89	52.34	78.38	55	3	8
4.66	3.51	43.48	51.65	75.56	45	1	8
4.04	3.28	44.68	51.99	79.74	50	1	8

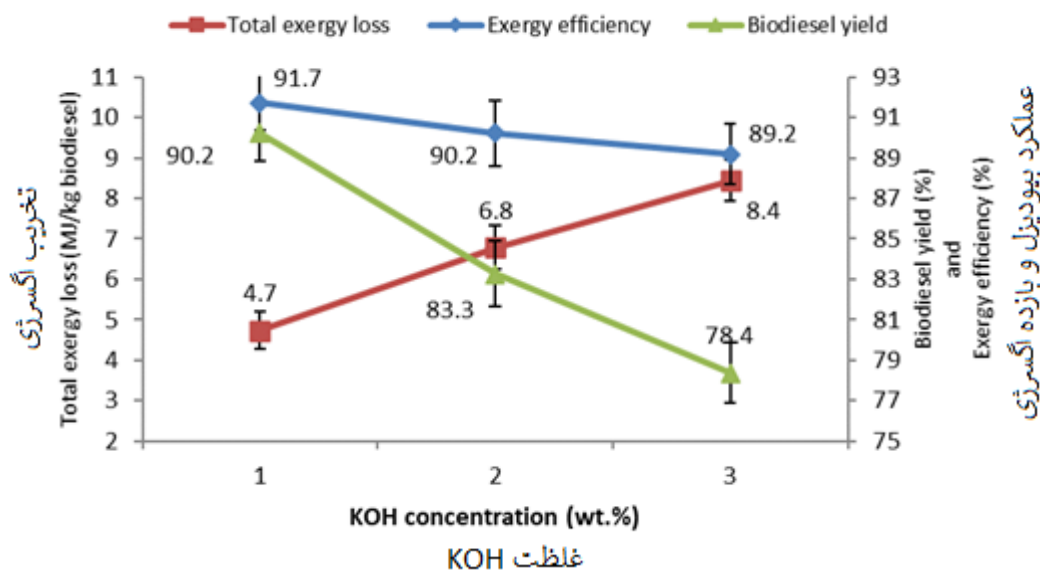


شکل (۳) تأثیر نسبت مولی متانول: روغن بر بازده بیودیزل، بازده اکسرژی و از دست دادن کل اکسرژی ترانس استریفیکاسیون
Figure (3) Effect of methanol:oil molar ratio on biodiesel yield, exergy efficiency and total exergy loss of the transesterification

بود. اگرچه بازده تولید بیودیزل در غلظت بالای متانول بیشتر از غلظت پایین آن بود، اما بازده اکسرژی در غلظت بالای متانول کمتر از غلظت پایین آن بود، چرا که جرم ورودی زیاد (اکسرژی شیمیایی) در غلظت بالای متانول باعث اتلاف قابل توجهی اکسرژی از طریق افزایش ضایعات فرآیند شد. از یک سو نسبت استوکیومتری متانول به تری گلیسیرید در ترانس استریفیکاسیون ۳:۱ است و از سوی دیگر همانطور که در بالا ذکر شد، ۲۰ درصد از مواد واکنش نداده به عنوان ضایعات فرآیند در نظر گرفته شده است. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که ۲۰ درصد متانول اضافی نسبت استوکیومتری به عنوان ضایعات به صورت اتلاف اکسرژی اتفاق افتاد (با نادیده گرفتن اتلاف اکسرژی برای بازیابی و خالص سازی ۸۰٪).

را جبران کند و بنابراین از افت شدید بازده اکسرژی جلوگیری کرد. علاوه بر این، تری گلیسیریدهای واکنش نداده قابل بازیافت و استفاده مجدد بودند و تنها ۲۰ درصد آن به عنوان اتلاف تعیین شد، که به عنوان اتلاف اکسرژی خارجی در نظر گرفته شد. بنابراین، تا زمانی که کاهش بازده بیودیزل به کاهش ورودی جرم نسبت داده شود، انتظار می رود که بازده اکسرژی در مقایسه با بازده تبدیل (بازده تولید بیودیزل) کاهش قابل توجهی نداشته باشد.

با افزایش نسبت مولی متانول به روغن از ۸:۱ به ۱۲:۱ بازده اکسرژی و بازده بیودیزل هر دو کاهش یافتند. غلظت بالای متانول اثر منفی بر بازده تبدیل داشت که همانند غلظت پایین متانول (۴:۱) قابل توجه نبود؛ اما کاهش بازده اکسرژی ترانس استریفیکاسیون در غلظت بالای متانول (۱۲:۱) شدید تر از غلظت پایین آن (۴:۱)



شکل (۴) اثر غلظت KOH بر بازده بیودیزل، بازده اکسرژی و از دست دادن کل اکسرژی ترانس استریفیکاسیون
Figure (4) Effect of KOH concentration on biodiesel yield, exergy efficiency and total exergy loss of the transesterification

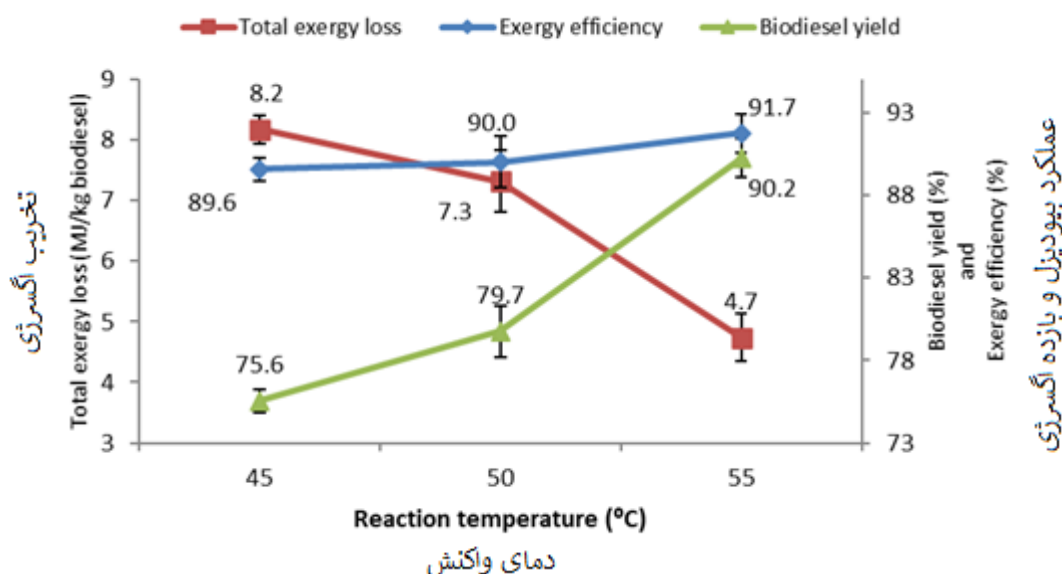
وزنی به ۳ درصد وزنی، بازده تولید بیودیزل و بازده اکسرژی به طور پیوسته کاهش یافت. مجموع تلفات اکسرژی در ترانس استریفیکاسیون با غلظت های کاتالیست ۱ درصد وزنی و ۳ درصد وزنی به ترتیب MJ ۴/۷ و ۸/۴ در هر کیلوگرم تولید بیودیزل تعیین شد.

شکل ۴ اثر غلظت کاتالیزور هیدروکسید پتاسیم را بر بازده تولید بیودیزل، بازده اکسرژی و اتلاف کل اکسرژی در نسبت مولی متانول به روغن ۸:۱ و دمای واکنش ۵۵ درجه سلسیوس نشان می دهد. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می شود، با افزایش غلظت کاتالیست از ۱ درصد

یافت. مجموع تخریب اکسرژی در ترانس استریفیکاسیون روغن پسماند در دمای 45°C و 55°C به ترتیب 8.2 MJ و 4.7 MJ در هر کیلوگرم تولید بیودیزل تعیین شد. افزایش دمای واکنش از 45°C به 55°C توانست به طور قابل توجهی بازده تبدیل را افزایش دهد و در نتیجه بازده بیودیزل را از 75 درصد به 90 درصد افزایش دهد. اگرچه اکسرژی ورودی با افزایش دما افزایش یافت، اما افزایش قابل توجه در اکسرژی خروجی مرتبط با بازده بالای بیودیزل (90%) بر افزایش اکسرژی ورودی ناشی از افزایش دما غلبه کرده و منجر به افزایش بازده اکسرژی شده است.

افزایش قابل توجه تخریب اکسرژی به کاهش شدید بازده تولید بیودیزل در غلظت بالای کاتالیزور نسبت داده می شود. اکسرژی جرمی موجود در هیدروکسید پتاسیم قابل توجه نیست، اما اثر آن بر فرآیند تبدیل می تواند به طور قابل توجهی بر بازده اکسرژی تأثیر بگذارد. غلظت بالای هیدروکسید پتاسیم واکنش را به سمت صابونی شدن منحرف کرد و منجر به کاهش بازده بیودیزل شد.

بسته به خصوصیات روغن و کاتالیزور، ترانس استریفیکاسیون می تواند در دماهای مختلف رخ دهد. ترانس استریفیکاسیون می تواند در دمای محیط باشد (۴۸)، یا حتی در دمایی نزدیک به دمای جوش متانول (۳۶ و ۳۷) انجام شود. شکل ۵ اثر دمای واکنش را بر بازده تولید بیودیزل، بازده اکسرژی و اتلاف کل اکسرژی در نسبت مولی متانول به روغن $8:1$ و غلظت هیدروکسید پتاسیم 1 درصد وزنی نشان می دهد. بازده اکسرژی و بازده تولید بیودیزل با افزایش دما از 45°C به 55°C افزایش



شکل (۵) تأثیر دمای واکنش بر بازده بیودیزل، بازده اکسرژی و از دست دادن کل اکسرژی ترانس استریفیکاسیون
Figure (5) The effect of the reaction temperature on biodiesel yield, exergy efficiency and total exergy loss of the transesterification

بازده اکسرژی و متعاقباً عملکرد اقتصادی در تولید تجاری بیودیزل از طریق به حداقل رساندن اتلاف اکسرژی فرآیند کمک کند.

نتیجه گیری

تجزیه و تحلیل اکسرژی ابزاری برای ارزیابی اثرات زیست محیطی مرتبط با محصولات و فرآیندها با شناسایی کردن و کمی کردن انرژی و مواد مورد استفاده و ضایعات منتشر شده به محیط زیست در یک چارچوب جامع فراهم می کند. تحقیق حاضر جریان اکسرژی را در فرآیند ترانس استریفیکاسیون روغن خوراکی پسماند مورد تجزیه و تحلیل قرار داده است، و اثرات متغیرهای آزمایش، از جمله نسبت مولی متانول به روغن، غلظت هیدروکسید پتاسیم و دمای واکنش، بر بازده تولید بیودیزل، بازده اکسرژی و تخریب اکسرژی ارزیابی کرده است. داده‌های مورد نیاز از طریق انجام آزمایش‌ها در آزمایشگاه جمع آوری شد و مستقیماً برای استفاده در محاسبات اکسرژی مورد استفاده قرار گرفت. حداکثر بازده تولید بیودیزل و بازده اکسرژی به ترتیب ۹۰/۲ درصد و ۹۱/۷ درصد تعیین شد که در نسبت مولی متانول به روغن ۸:۱، غلظت هیدروکسید پتاسیم ۱ درصد وزنی و دمای واکنش ۵۵°C به دست آمد. در همان نقطه بهینه، کل تلفات اکسرژی در فرآیند ترانس استریفیکاسیون ۴/۷ مگا ژول به ازای هر کیلوگرم تولید بیودیزل محاسبه شد. افزایش متانول از مقدار بهینه به طور قابل توجهی بازده اکسرژی را از طریق افزایش ضایعات مواد کاهش داد. اتلاف اکسرژی در ترانس استریفیکاسیون همچنین از طریق غلظت بیش از حد هیدروکسید پتاسیم در واکنش افزایش یافت و واکنش را به سمت صابونی شدن سوق داد. دمای پایین تر از نقطه بهینه باعث افزایش اتلاف کل اکسرژی ترانس استریفیکاسیون از طریق کاهش قابل توجه در راندمان تبدیل شد. تجزیه و تحلیل اکسرژی همچنین می تواند برای ارزیابی عملکرد زیست محیطی فرآیند مورد بررسی و در نتیجه برای کمک به سایر ابزارهای ارزیابی زیست محیطی مانند ارزیابی چرخه زیست (۳۹ و ۵۲) و سیاست های زیست محیطی و اقتصادی مرتبط با استفاده از منابع به کار رود. دانش دقیق از اثرات متغیرها در ترانس استریفیکاسیون بر جریان اکسرژی می تواند به ما در بهبود

References

1. Ayres, R.U. and Ayres, W. 1999. Accounting for resources 2: the life cycle of materials. UK and Lyme MA: Edward Elgar, Cheltenham.
2. Bahadur, S., Goyal, P., Sudhakar, K. and Prakash Bijarniya, J. 2015. A comparative study of ultrasonic and conventional methods of biodiesel production from mahua oil. *Biofuels*, 6(1-2): 107-113.
3. Blanco-Marigorta, A., Suárez-Medina, J. and Vera-Castellano, A. 2013. Exergetic analysis of a biodiesel production process from *Jatropha curcas*. *Applied Energy*, 101: 218-225.
4. Brockway, P.E., Steinberger, J.K., Barrett, J.R. and Foxon, T.J. 2015. Understanding China's past and future energy demand: An exergy efficiency and decomposition analysis. *Applied Energy*, 155: 892-903.
5. Caliskan, H., Tat, M.E. and Hepbasli, A. 2010. A review on exergetic analysis and assessment of various types of engines. *International Journal of Exergy*, 7(3): 287-310.
6. Chen, Y., Xiao, B., Chang, J., Fu, Y., Lv, P. and Wang, X. 2009. Synthesis of biodiesel from waste cooking oil using immobilized lipase in fixed bed reactor. *Energy Conversion and Management*, 50(3): 668-673.
7. Chisti, Y. and Yan, J. 2011. Energy from algae: Current status and future trends: Algal biofuels A status report. *Applied Energy*, 88(10): 3277-3279.
8. Demirel, Y., Matzen, M., Winters, C. and Gao, X. 2015. Capturing and using CO₂ as feedstock with chemical looping and hydrothermal technologies. *International Journal of Energy Research*, 39(8): 1011-1047.
9. Dilmac, O.F. and Ozkan, S.K. 2008. Energy and exergy analyses of a steam reforming process for hydrogen production. *International Journal of Exergy*, 5(2): 241-248.
10. Felizardo, P. 2006. Production of biodiesel from waste frying oils. *Waste Management*, 26(5): 487-494.
11. Font de Mora, E., Torres, C. and Valero, A. 2012. Assessment of biodiesel energy sustainability using the exergy return on investment concept. *Energy*, 45(1): 474-480.
12. Ganapathy, T., Murugesan, K. and Gakkhar, R.P. 2009. Performance optimization of *Jatropha* biodiesel engine model using Taguchi approach. *Applied Energy*, 86(11): 2476-2486.
13. Hoang, V.-N. and Alauddin, M. 2011. Analysis of agricultural sustainability: A review of exergy methodologies and their application in OECD countries. *International Journal of Energy Research*, 35(6): 459-476.
14. Jafarmadar, S., Tasoujiazar, R. and Jalilpour, B. 2014. Exergy analysis in a low heat rejection IDI diesel engine by three dimensional modeling. *International Journal of Energy Research*, 38(6): 791-803.
15. Jaimes, W., Acevedo, P. and Kafarov, V. 2010. Exergy analysis of palm oil biodiesel production. *Chem Eng*, 21: 1345-1350.
16. Karatay, S.E. and D'Ánmez, G. 2010. Microbial oil production from thermophile cyanobacteria for biodiesel production. *Applied Energy*, 88(11): 3632-3635.
17. Karimi, M. 2016. Immobilization of lipase onto mesoporous magnetic nanoparticles for enzymatic synthesis of biodiesel. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 8: 182-188.

18. Karimi, M. 2017. Exergy-based optimization of direct conversion of microalgae biomass to biodiesel. *Journal of Cleaner Production*.
19. Karimi, M., Keyhani, A., Akram, A., Rahman, M., Jenkins, B. and Stroeve, P. 2013. Hybrid response surface methodology-genetic algorithm optimization of ultrasound-assisted transesterification of waste oil catalysed by immobilized lipase on mesoporous silica/iron oxide magnetic core-shell nanoparticles. *Environmental Technology*, 34(13): 2201-2211.
20. Karimi, M., Jenkins, B. and Stroeve, P. 2014. Ultrasound irradiation in the production of ethanol from biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40: 400-421.
21. Karimi, M., Jenkins, B. and Pieter, S. 2016. Multi-objective optimization of transesterification in biodiesel production catalyzed by immobilized lipase. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*.
22. Kheiralipour K. 2022. *Sustainable Production: Definitions, Aspects, Elements*. Nova Science Publishers, New York, USA.
23. Kheiralipour, K. 2020. *Environmental Life Cycle Assessment*. Ilam University Publication, Ilam, Iran.
24. Kheiralipour, K., Khoobakht, M. and Karimi, M. 2024. Effect of biodiesel on environmental impacts of diesel mechanical power generation by life cycle assessment. *Energy* 289: 129948.
25. Khoobakht, G., Akram, A., Karimi, M. and Najafi, G. 2016. Exergy and energy analysis of combustion of blended levels of biodiesel, ethanol and diesel fuel in a DI diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 99: 720-729.4.
26. Khoobakht, G., Najafi, G., Karimi, M. and Akram, A. 2016. Optimization of operating factors and blended levels of diesel, biodiesel and ethanol fuels to minimize exhaust emissions of diesel engine using response surface methodology. *Applied Thermal Engineering*, 99: 1006-1017.
27. Khoobakht, G., Kheiralipour, K. and Karimi, M. 2021. Optimization of Chlamydomonas alga biodiesel percentage for reducing exhaust emission of diesel engine. *Process Safety and Environmental Protection*, 152: 25-36.
28. Khoobakht, G., Kheiralipour, K., Rasouli, H., Rafiee, M., Hadipour, M. and Karimi, M. 2020. Experimental exergy analysis of transesterification in biodiesel production. *Energy*, 196: 117092.
29. Khoobakht, G., Kheiralipour, K., Yuan, W., Seifi, M.R. and Karimi, M. 2020. Desirability function approach for optimization of enzymatic transesterification catalyzed by lipase immobilized on mesoporous magnetic nanoparticles. *Renewable Energy*, 158: 253-262.
30. Khoobakht, G., Kheiralipour, K., Karimi, M. 2022. The effects of biodiesel and bioethanol on the performance and emission characteristics of diesel engines. *International Journal of Renewable Energy Resources*, 12 (1): 1-23.
31. Khoobakht, G.M., Karimi, M., Kheiralipour, K. 2019. Effects of biodiesel-ethanol-diesel blends on the performance indicators of a diesel engine: A study by response surface modeling. *Applied Thermal Engineering*. 148(5):1385-1394.
32. Khoobakht, M., Soleymani, M. Kheiralipour, K. and Karimi, M. 2024. Predicting performance characteristics of an engine fueled by algal biodiesel-diesel using response surface methodology. *Renewable Energy Research and Applications*, 5(2): 269-279.
33. Kusumaningtyas, R.D., Purwono, S. Rochmadi, R. and Budiman, A. 2014. Graphical exergy analysis of reactive distillation column for biodiesel production. *International Journal of Exergy*, 15(4): 447-467.
34. Montefrio, M.J., Xinwen, T. and Obbard, J.P. 2009. Recovery and pre-treatment of fats, oil and grease from grease interceptors for biodiesel production. *Applied Energy*, 87(10): 3155-3161.

35. Morosuk, T., Tsatsaronis, G. and Koroneos, C. 2016. Environmental impact reduction using exergy-based methods. *Journal of Cleaner Production*, 118: 118-123.
36. Ofari-Boateng, C., Keat, T.L. and JitKang, L. 2012. Sustainability assessment of microalgal biodiesel production processes: an exergetic analysis approach with Aspen Plus. *International Journal of Exergy*, 10(4): 400-416.
37. Ofori-Boateng, C., Keat, T.L. and JitKang, L. 2010. Feasibility study of microalgal and jatropha biodiesel production plants: Exergy analysis approach. *Applied Thermal Engineering*, 36(0): 141-151.
38. Peralta-Ruiz, Y., González-Delgado, A.-D. and Kafarov, V. 2013. Evaluation of alternatives for microalgae oil extraction based on exergy analysis. *Applied Energy*, 101: 226-236.
39. Pierre, P. 1998. *A to Z of Thermodynamics*. Oxford Oxford University Press.
40. Ranjan, A. and Moholkar, V.S. 2012. Biobutanol: science, engineering, and economics. *International Journal of Energy Research*, 36(3): 277-323.
41. Said, Z., Saidur, R. and Rahim, N.A. 2016. Energy and exergy analysis of a flat plate solar collector using different sizes of aluminium oxide based nanofluid. *Journal of Cleaner Production*, 133: 518-530.
42. Sakthivel, G. 2013. A hybrid multi-criteria decision support system for selection of optimum fuel blend. *International Journal of Exergy*, 12(4): 463-490.
43. Sato, N. 2004. *Chemical energy and exergy: an introduction to chemical thermodynamics for engineers*. Elsevier.
44. Shukla, K., Rangnekar, S. and Sudhakar, K. 2015. A comparative study of exergetic performance of amorphous and polycrystalline solar PV modules. *International Journal of Exergy*, 17(4): 433-455.
45. Sudhakar, K., Rajesh, M. and Premalatha, M. 2012. Carbon mitigation potential of Jatropha Biodiesel in Indian context. *Energy Procedia*, 14: 1421-1426.
46. Szargut, J. 1989. Chemical exergies of the elements. *Applied Energy*, 32(4): 269-286.
47. Szargut, J., Morris, D.R. and Steward, F.R. 1988. *Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes*. New York: Hemisphere Publishing Corporation.
48. Talens, L., Villalba, G. and Gabarrell, X. 2007. Exergy analysis applied to biodiesel production. *Resources, Conservation and Recycling*, 51(2): 397-407.
49. Tomasevic, A.V. and Siler-Marinkovic, S.S. 2003. Methanolysis of used frying oil. *Fuel Processing Technology*, 81(1): 1-6.
50. Torkian, Boldaji, M., Ebrahimzadeh, R., Kheiralipour, K., Borghei, A. M. 2011. Effect of some BED blends on the equivalence ratio, exhaust oxygen fraction and water and oil temperature of a diesel engine. *Biomass and Bioenergy*, 35: 4099-4106.
51. Vatani, A., Mehrpooya, M. and Palizdar, A. 2014. Energy and exergy analyses of five conventional liquefied natural gas processes. *International Journal of Energy Research*, 38(14): 1843-1863.
52. Velásquez-Arredondo, H., Junior, S.D.O. and Benjumea, P. 2012. Exergy efficiency analysis of chemical and biochemical stages involved in liquid biofuels production processes. *Energy*, 41(1): 138-145.
53. Wang, Y., Ou, P.L.S. and Zhang, Z. 2007. Preparation of biodiesel from waste cooking oil via two-step catalyzed process. *Energy Conversion and Management*, 48(1): 184-188.

54. Xue, F. 2008. Studies on lipid production by *Rhodotorula glutinis* fermentation using monosodium glutamate wastewater as culture medium. *Bioresource technology*, 99(13): 5923-5927.
55. Zhang, Y., Dube, M., McLean, D. and Kates, M. 2003. Biodiesel production from waste cooking oil: 2. Economic assessment and sensitivity analysis. *Bioresource technology*, 90(3): 229-240.
56. Zhang, Y., McLean, M.A. and Kates, M. 2003. Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. *Bioresource Technology*, 89(1): 1-16.