

## خصوصیت و تبادل استری روغن بادام تلخ برای تولید بیودیزل

در مقاله حاضر، تولید بیودیزل با استفاده از روغن بادام تلخ (BAO) در یک واکنش تبادل استری کاتالیزور شده با هیدروکسید پتاسیم مورد بررسی قرار گرفت. BAO از منابع موجود در ایران بدست آمد و خواص فیزیکی و شیمیایی آن شامل مقدار ید، مقدار اسید، دانسیته، ویسکوزیته سینماتیک، ترکیب اسید چرب و وزن مولکولی تعیین شد. مقدار پائین اسید BAO (0.24 میلی گرم / g KOH) نشان دهنده این است که نیازی به پیش تیمار نفت خام با اسید وجود ندارد. تجزیه و تحلیل محتوای اسید چرب نشان داد که سهم اسید های چرب غیر اشباع در BAO بسیار بالا است (84.7 wt%). اثر پارامترهای مختلف از جمله نسبت مولی متانول به روغن (3 تا 11 مول بر مول)، غلظت هیدروکسید پتاسیم (0/1 تا 1/7 % وزنی/وزنی) و دمای واکنش (30-70 درجه سانتیگراد) بر تولید بیودیزل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این پارامترها فاکتورهای مهمی در واکنش تبادل استری بودند. خصوصیات سوخت بیودیزل شامل مقدار ید، مقدار اسید، دانسیته، ویسکوزیته سینماتیک، مقدار صابونی شدن، عدد ستان، نقطه اشتعال، نقطه ابری، نقطه ی ریزش و خصوصیات تقطیر اندازه گیری شد. خواص با مقادیر سوخت دیزل، استاندارد EN 14214 و استاندارد ASTM 6751 مقایسه شد و توافق قابل قبولی مشاهده شد.

### 1. مقدمه

سوخت های فسیلی به عنوان منابع انرژی برای هر کشوری اهمیت حیاتی دارند. منابع محدودی از این سوخت ها وجود دارد و بنابراین تحقیق در مورد سوخت های جایگزین تجدید پذیر نیاز ضروری و در حال افزایش است. یکی از این منابع انرژی تجدیدپذیر، بیودیزل است که شامل مونو آلکیل استرهای اسیدهای چرب بلند زنجیر است [1]. علاوه بر تجدید پذیر بودن، بیودیزل دارای مزایای دیگری نیز می باشد؛ مانند داشتن خواص سوختی نزدیک به دیزل نفتی [2]، کاهش تنظیم شده انتشار آلاینده های هوا [3،4]، کاهش انتشار گازهای گلخانه [5]، همراه با عدم سمیت، ایمن بودن برای محیط زیست و زیست تخریب پذیر بودن [6]

چندین راه برای تولید بیودیزل وجود دارد. از میان آنها، تبادل استری شایع ترین است [7،8]. تبادل استری یک واکنش روغن با الکل در حضور کاتالیزورهای مناسب مانند کاتالیزورهای اسیدی یا قلیایی است [9،10]. متانول به دلیل خواص و هزینه کم آن، متداول ترین الکل است [11]. کاتالیزورهای قلیایی مانند هیدروکسید پتاسیم در فرایند تبادل استری موثر هستند [12] هزینه بالای بیودیزل مانع عمده تجاری سازی آن است [13،14]. محققان دریافته اند که بخش اصلی (85 تا 95 درصد) هزینه کلی تولید بیودیزل هزینه مواد خام است [15]. بنابراین، تولید بیودیزل از مواد کم هزینه، مانند روغن غیر خوراکی ضروری است. علاوه بر این، اکثر محصولات غیر خوراکی روغن زراعی به خوبی در زمین های زراعی رشد می کنند، می توانند خشکی و شرایط خشک را تحمل کنند و نیازی به مراقبت های شدید ندارند [16].

بسیاری از مطالعات بر روی تولید بیودیزل از روغن های غیر خوراکی مانند روغن کرچک *Jatropha* [17-19]، روغن دانه کرانجی [20،17]، روغن دانه نارنج [21]، روغن دانه لاستیک [22،23] روغن کرچک [24] و روغن *mahua* انجام شده است [25،26]. به طور کلی تأثیر چند متغیر اجرایی بر واکنش تبادل استری بررسی و ویژگیهای سوختی بیودیزل های تولید شده از روغنهای غیر خوراکی تعیین شده است به طوری که این روغن ها منابع مناسبی برای تولید بیودیزل هستند. با این حال، روغن های غیر خوراکی دیگری نیز وجود دارد که تا کنون به عنوان یک ماده خام برای تولید بیودیزل مورد بررسی قرار نگرفته است. روغن بادام تلخ (BAO) یکی از این روغن هاست. درخت بادام (*Prunus dulcis*)، که متعلق به خانواده *Rosaceae* است، بومی منطقه اقلیمی مدیترانه خاورمیانه است. اما انسانها آن را به دیگر مناطق جهان گسترش دادند به طوری که در اروپا، آسیا و شمال آفریقا، و اخیراً نیز در کالیفرنیا کشت شده است. ایتالیا، اسپانیا، مراکش، فرانسه، یونان و ایران کشور اصلی هستند که بادام تولید می کنند.

درخت بادام تا ارتفاع بین 3 تا 8 متر با یک تنه تا قطر 30 سانتیمتر رشد می کند. انواع مختلف بادام را می توان به دو گروه وسیع دسته بندی نمود: یعنی بادام شیرین (با گل های سفید) و بادام تلخ (با گل های صورتی) [27]. راندمان روغن بادام تلخ که از دانه های درخت بادام از طریق یک فرآیند فشرده سازی به دست می آید، حدود 40-45 درصد است. روغن بادام تلخ دارای رنگ زرد رنگ و طعم تلخ است. میوه بادام تلخ حاوی آمیگدالین و آنزیم است که آن را به

گلوکز، بنزالدئید و اسید هیدروسیانیک تجزیه می کند که میوه غیر خوراکی دارد [28]. در این کار، ترکیب اسید چرب و دیگر خواص فیزیکی و شیمیایی روغن بادام تلخ ایرانی تعیین شد. هدف اصلی این تحقیق، بررسی تولید بیودیزل از روغن بادام تلخ با تبادل استری کاتالیزور شده با KOH بود. اثر سه پارامتر مهم از جمله نسبت مولی متانول به روغن، غلظت کاتالیزور و دمای واکنش بر راندمان محصول، خلوص و راندمان بیودیزل مورد بررسی قرار گرفت.

## 2. مواد و روش ها

### 2.1 مواد

روغن بادام تلخ خام از شرکت کیمیا پک که یک شرکت محلی در تهران است تهیه شد. انواع مختلف متیل استر که به عنوان استاندارد در تعیین کروماتوگرافی مورد استفاده قرار گرفت از شرکت مواد شیمیایی Japan, Wako خریداری شد. تمام مواد شیمیایی و حلال های دیگر که از مرک آلمان تهیه شده در طول سنتز، تجزیه و تحلیل بیودیزل مورد استفاده قرار گرفتند: متانول با خلوص 99.5٪، پودر هیدروکسید پتاسیم با خلوص 85٪، پودر سولفات منگنز با خلوص 98٪، نرمال هگزان با خلوص 99٪ و اسید هیدروکلریک با خلوص 37٪.

### 2.2 روش تجربی

واکنش تبادل استری در یک راکتور دسته ای 500 میلی لیتری انجام شد که به ترمومتر، کندانسور و سیستم های همزن مغناطیسی مجهز شده است. راکتور حاوی 50 گرم روغن بادام تلخ در یک حمام آب گرم شده توسط یک صفحه داغ، قرار داده شد. BAO هم زده شد و تا دمای مناسب گرم شد. مقدار تعریف شده کاتالیزور که قبلا در متانول حل شده بود به BAO اضافه شد، واکنش آغاز شد و 60 دقیقه ادامه یافت.

پس از اینکه واکنش به پایان رسید، گرمایش و هم زدن متوقف شد و مخلوط واکنش به یک کیف جداکننده منتقل شد و برای جدا کردن دو فاز متفاوت از جمله فاز اتر (بیودیزل) و فاز گلیسرول به مدت 1 ساعت ثابت قرار گرفت. تقریباً 10 دقیقه طول کشید تا جدایی این فاز انجام شود، اما لایه بیودیزل شفاف بود. پس از 1 ساعت، فاز شفاف استر ظاهر شد و جداسازی کامل شد. واکنش بیشتر ممکن است در طول زمان ته نشینی رخ دهد، اما این فرآیند به دلیل دمای پایین، فقدان هم زدن و حضور مقدار کم کاتالیزور و متانول، آهسته است. با این حال گفته می شود که حتی

زمان ته نشینی بیشتر برای جداسازی مطلوب است [8،29]. فاز گلیسرول که در لایه پایین تر تشکیل شده بود، جدا شد. فاز استر (بیودیزل) با 35 میلی لیتر آب مقطر داغ شسته شد و سپس با 35 میلی لیتر اسید سدیم کلراید 0.5 درصد برای خنثی کردن کاتالیزور باقی مانده و تجزیه صابون هایی که در طی واکنش تبادل استری تشکیل شدند شستشو داده دشد. در نهایت، آن را با 35 میلی لیتر آب مقطر داغ شستشو دادند. شستشوی های متوالی ناخالصی هایی مانند کاتالیزور باقی مانده، متانول، گلیسرول و صابون را از بین می برد. سپس فاز استر با استفاده از سولفات منگنز خشک شد و تحت شرایط خلاء برای حذف بلورهای سولفات منگنز فیلتر شد. محصول نهایی برای تعیین راندمان محصول مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس با استفاده از GC برای محاسبه خلوص بیودیزل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

### 2.3 روش های تجزیه ای

مقادیر یو BAO و بیودیزل بر اساس روش های موثق AOCs Cd 1c-85 و Cd 1-25 [30] تعیین شد. مقادیر اسیدی BAO و بیودیزل به ترتیب با روش های موثق AOCs Ca 5a-40 و Cd 3d-63 [30] بدست آمد. دانسیته های BAO و بیودیزل با استفاده از یک دانسیومتر DMA 38 از Anton Paar، آلمان اندازه گیری شد. ویسکوزیته سینماتیک BAO و بیودیزل بر اساس روش ASTM D445 تعیین شد [31]. مقدار صابونی شدن بیودیزل بر اساس روش موثق AOCs Cd 3-25 [30] اندازه گیری شد. سایر خواص بیودیزل، از جمله عدد ستان، نقطه اشتعال، نقطه ابری، نقطه ریزش و ویژگی تقطیر به ترتیب بر طبق ASTM D976، ASTM D93، ASTM D2500، ASTM D97 و ASTM D86 [31] بدست آمد. ترکیب اسید چرب BAO با استفاده از کروماتوگرافی گازی بر اساس روش موثق AOCs Ce 2-66 [30] بدست آمد. میانگین وزن مولکولی BAO بر اساس تجزیه و تحلیل اسید های چرب و با استفاده از معادله زیر محاسبه شد

$$MW_{oil} = 3 \times \sum (MW_i \times x_i) + 38 \quad (1)$$

که در آن  $MW_{oil}$  نشانه وزن مولکولی BAO،  $MW_i$  و  $x_i$  به ترتیب برای وزن مولکولی و کسر جرمی اسید چرب I تعریف می شود. ترکیب متیل استر اسید چرب نمونه های بیودیزل خالص با استفاده از کروماتوگرافی گازی

GC PERCHROM PR2100 مجهز به ستون مویرگی (50 میلیمتر  $\times$  201  $\times$  میلی متر و 0.50 لیتر) با فاز ثابت HP-PONA و آشکارساز یونیزاسیون شعله ای تعیین شد. هلیوم با سرعت جریان 0/6 میلی لیتر در دقیقه به عنوان گاز حامل استفاده می شود. دمای ستون GC به مدت 5 دقیقه در دمای 120 درجه سانتیگراد تنظیم و با سرعت 4 درجه سانتیگراد در دقیقه تا 225 درجه سانتیگراد افزایش یافت و در مدت زمان 20 دقیقه در دمای 225 درجه نگهداری شد. درجه حرارت انژکتور و آشکارساز هر دو در 250 درجه سانتیگراد تنظیم شد. برای تجزیه و تحلیل بیودیزل، 0/3 گرم از نمونه بیودیزل تصفیه شده در 5 میلی لیتر نیتروژن حل شد و 1 میکرو لیتر از محلول به داخل GC تزریق شد. در این تحقیق، نتایج حاصل از راندمان محصول، خلوص بیودیزل و راندمان بیودیزل گزارش شده است که به ترتیب با استفاده از معادلات (2) و (3) محاسبه شده است.

$$\text{Product yield} = \frac{m_{\text{product}}}{m_{\text{BAO}}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Biodiesel yield} = \frac{m_{\text{product}} \times \text{purity of biodiesel}}{m_{\text{BAO}}} \quad (3)$$

که در آن  $m_{\text{product}}$  نشانه محصول نهایی پس از فرایند خالص سازی،  $m_{\text{BAO}}$  جرم مورد استفاده BAO برای هر آزمایش (50 گرم) می باشد و خلوص بیودیزل با تجزیه و تحلیل GC بدست می آید.

### 3. نتایج و بحث

#### 3.1. خواص روغن بادام تلخ

خواص فیزیکی و شیمیایی روغن بادام تلخ شامل مقدار ید، مقدار اسید، دانسیته، ویسکوزیته سینماتیک، ترکیب اسید چرب و میانگین وزن مولکولی در مقایسه با سایر روغن ها (جدول 1) ارائه شده است. مقدار ید BAO 81/60 میلی گرم I2 در گرم بود که کمتر از روغن دانه بادام زمینی است. این مقدار برای روغن های دیگر در دسترس نیست. مقدار اسید BAO برابر با 0/24 میلی گرم KOH / g بود که کمتر از روغن mahua و روغن کلزا است اما نزدیک به مقادیر اسیدی دانه های بادام زمینی، پنبه دانه، روغن سویا و کلزا می باشد. برای روغن های با مقدار اسید کمتر از 2 میلی گرم KOH / g [26] هیچ گونه پیش تیمار با اسید لازم نیست. دانسیته BAO نسبتاً نزدیک به مقدار اندازه

گیری شده برای روغن های دانه سویا، کلزا و دانه کتان است. ویسکوزیته سینماتیک BAO کاملاً مشابه روغن کلزا بود و دانسیته آن نسبتاً پایین تر از روغن کلزا بود اما بالاتر از روغن های mahua و روغن بادام زمینی بود. با این حال، بسیار پایین تر از ویسکوزیته های روغن سویا و پنبه دانه است.

**Table 1**  
Properties of the BAO in comparison with the other oils.

| Property                                 | BAO<br>[this study] | Peanut seed<br>oil [8,11] | Canola<br>oil [13] | Cottonseed<br>oil [20] | Rapeseed<br>oil [20] | Soybean<br>oil [20] | Mahua<br>oil [21] |
|--|---------------------|---------------------------|--------------------|------------------------|----------------------|---------------------|-------------------|
| Iodine value (mg I <sub>2</sub> /g)      | 81.60               | 123.22                    | NA <sup>a</sup>    | NA                     | NA                   | NA                  | NA                |
| Acid value (mg KOH/g)                    | 0.24                | 0.20                      | <0.5               | 0.11                   | 1.14                 | 0.2                 | 38.0              |
| Density at 15 °C (g/cm <sup>3</sup> )    | 0.921               | 0.888                     | NA                 | 912                    | 914                  | 920                 | 960               |
| Viscosity at 40 °C (mm <sup>2</sup> /s)  | 34.98               | 22.72                     | 35.3               | 50                     | 39.5                 | 65                  | 24.58             |
| Fatty acid composition (wt.%)            |                     |                           |                    |                        |                      |                     |                   |
| Myristic acid (C14:0)                    | 0.1                 | NA                        | 0.1                | NA                     | NA                   | NA                  | NA                |
| Palmitic acid (C16:0)                    | 10.3                | 11.38                     | 5.5                | 11.67                  | 3.49                 | 11.75               | 16.0–28.2         |
| Stearic acid (C18:0)                     | 3.9                 | 2.39                      | 2.2                | 0.89                   | 0.85                 | 3.15                | 20.0–25.1         |
| Oleic acid (C18:1)                       | 33.9                | 48.28                     | 55                 | 13.27                  | 64.4                 | 23.26               | 41.0–51.0         |
| Linoleic acid (C18:2)                    | 46.0                | 31.95                     | 24                 | 57.51                  | 22.3                 | 55.53               | 8.9–13.7          |
| Linolenic acid (C18:3)                   | 4.8                 | 0.93                      | 8.8                | 0                      | 8.23                 | 6.31                | NA                |
| Arachidic acid (C20:0)                   | 0.2                 | 1.32                      | 0.7                | NA                     | NA                   | NA                  | 0.0–3.3           |
| Molecular weight, M <sub>w</sub> (g/mol) | 866                 | NA                        | 882                | NA                     | NA                   | NA                  | NA                |

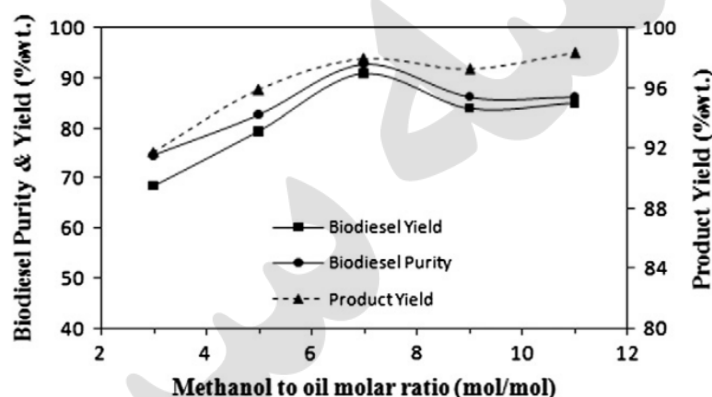
<sup>a</sup> Not available.

تجزیه و تحلیل ترکیبات اسید چرب نشان داد که سهم اسیدهای چرب اشباع نشده در روغن بادام تلخ حاوی 33.9٪ اسید اولئیک، 46.0٪ اسید لینولئیک و 4.8٪ اسید لینولینیک 84.7 wt٪ است. اسیدهای چرب اشباع شامل 14/5٪ کل اسیدهای چرب است که به طور عمده از اسید پالمیتیک و اسید استئاریک تشکیل شده است. باقیمانده ترکیب اسید چرب (0.8٪) که حاوی سایر اجزاء در مقادیر کم هستند تعیین نشد. محتوای بالای اسیدهای چرب غیر اشباع می تواند به علت افزایش محتوای متیل استرهای اسید چرب اشباع موجب کاهش نقطه ابری، عدد ستان و پایداری بیودیزل تولید شده می گردد [22].

### 3.2. اثر نسبت مولی متانول به روغن در تولید بیودیزل

نسبت مولی متانول به روغن یکی از مهمترین متغیرهایی است که بر واکنش تبادل استری اثر می گذارد [32–34]. اثر این پارامتر بر راندمان محصول، خلوص بیودیزل و راندمان بیودیزل در شکل 1 نشان داده شده است. آزمایش ها در محدوده نسبت مولی متانول به روغن 3: 1–11: 1 انجام شد، در حالی که متغیرهای دیگر مانند غلظت KOH و دمای واکنش به ترتیب برابر با 0.9 و w / w و 50 درجه سلسیوس بود. نسبت مولی استوکیومتری الکل به تری گلیسیرید 3: 1 است. اما تبادل استری یک واکنش برگشت پذیر است و مقدار اضافی الکل معمولاً برای جابجایی

تبادل به نفع تولید آلکیل استر استفاده می شود. مشاهده شد که با افزایش نسبت مولی متانول به روغن از 3:1 به 7:1، راندمان محصول از 91.8 به 97.2 افزایش یافت در حالی که خلوص و راندمان بیودیزل از 74/6 به 92/7 و از 68/4 به 90.9 افزایش یافته است. بنابراین اثر نسبت مولی متانول به روغن روی خلوص و راندمان بیودیزل بیشتر از اثر آن بر راندمان محصول است. افزایش بیشتر در این نسبت تاثیر کمی بر راندمان محصول داشت. با این حال، با افزایش نسبت مولی از 7:1 به 11:1، خلوص و راندمان بیودیزل کاهش می یابد.



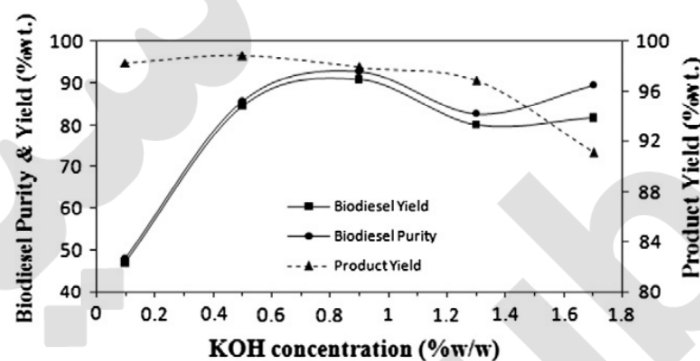
شکل 1: اثر نسبت مولی متانول به روغن بر راندمان محصول و راندمان بیودیزل (غلظت 0.9 w / w % KOH و دمای واکنش 50 C).

این کاهش ممکن است به کیفیت جداسازی فاز قبل از آنالیز مرتبط باشد. با استفاده از مقدار بیش از حد متانول، با افزایش حلالیت گلیسرول منجر به مشکلاتی در جداسازی گلیسرول از فاز بیودیزل می شود. گلیسرول باقی مانده در فاز بیودیزل باعث برگشت واکنش تعادلی به عقب و بازسازی استرها و گلیسرول به مونو گلیسیرید می شود تا خلوص بیودیزل و در نتیجه راندمان بیودیزل کاهش یابد [34-36].

### 3.3 تأثیر غلظت KOH

غلظت کاتالیزور یکی دیگر از متغیرهای مهم است که بر واکنش تبادل استری [32-34] در کنار واکنش های هیدرولیز و صابونی شدن واکنش اثر می گذارد [37]. اثر هیدروکسید پتاسیم بر راندمان محصول، خلوص بیودیزل و راندمان بیودیزل در شکل 2 نشان داده شده است. آزمایش ها با استفاده از غلظت KOH در محدوده 1-7-1.7 w / w (بر اساس وزن BAO) انجام شد، در حالی که نسبت مولی متانول به روغن و دمای واکنش به ترتیب 7 و mol / mol و

50 درجه سانتیگراد بود. همانطور که در شکل نشان داده شده است، هنگامی که غلظت KOH از 0.1 %w/w استفاده شد، راندمان بیودیزل 47.1% w/w بود. مقادیر ناکافی هیدروکسید پتاسیم منجر به تبدیل ناقص روغن به استرها شد تا خلوص بیودیزل 47.9% باشد. با افزایش غلظت KOH از 0/1 تا 0/9 w/w، راندمان محصول تقریباً ثابت باقی ماند اما خلوص و راندمان بیودیزل افزایش یافت. با افزایش غلظت KOH 0/9 وزنی/وزنی، راندمان بیودیزل به حداکثر مقدار 90/8 w/w رسید. افزایش بیشتر غلظت هیدروکسید پتاسیم منجر به کاهش راندمان محصول، خلوص بیودیزل و راندمان بیودیزل گردید. با این حال، اثر مقدار بیش از حد کاتالیزور بر خلوص بیودیزل کمتر از راندمان محصول و راندمان بیودیزل بود. هنگامی که از مقدار بیش از حد کاتالیزور استفاده می شود، میزان صابون های ایجاد شده توسط واکنش صابونی سازی افزایش می یابد.



بر راندمان محصول و راندمان بیودیزل (نسبت مولی متانول به روغن 7 مول / مول و KOH شکل 2: اثر غلظت دمای واکنش 50 درجه سانتیگراد).

صابونها محلولیت متیل استر در گلیسرول را افزایش می دهد و امولسیون استر و گلیسرول را ایجاد می کند که باعث جداسازی استرها می شود [36,38,39]. بنابراین، تلفات استر افزایش می یابد و در نتیجه راندمان محصول و تولید بیودیزل کاهش می یابد. در این مطالعه، به علت کمبود اسید چرب آزاد (0.24 میلی گرم / g KOH)، صابون تشکیل شده به طور کلی قابل توجه نیست. با این حال، همانطور که در بالا ذکر شد، استفاده از کاتالیزور اضافی مقدار صابون تشکیل شده را افزایش داد.

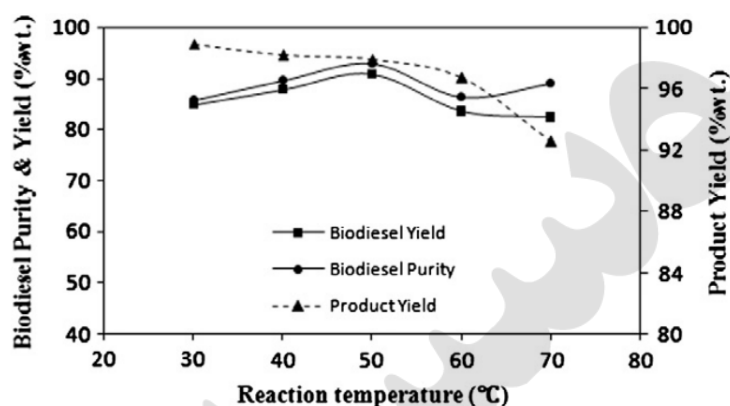
### 3.4. اثر دمای واکنش



اثر دمای واکنش بر راندمان محصول، خلوص بیودیزل و راندمان بیودیزل در شکل 3 نشان داده شده است. آزمایش‌ها با استفاده از دمای واکنش در محدوده 30-70 درجه سانتیگراد انجام شد، در حالی که نسبت مولی متانول به روغن و غلظت هیدروکسید پتاسیم به ترتیب در 7 مول /مول و 0/9 وزنی/وزنی بودند. هنگامی که دمای واکنش از 30 تا 50 درجه سانتیگراد افزایش یافت، تغییرات کمی در راندمان محصول رخ داد. با این وجود، با افزایش درجه حرارت از 50 تا 70 درجه سانتیگراد راندمان محصول کاهش می‌یابد. هنگامی که دمای واکنش از 30 تا 50 درجه سانتیگراد افزایش می‌یابد خلوص و راندمان بیودیزل افزایش می‌یابد. حداکثر راندمان بیودیزل در دمای 50 درجه سانتیگراد بدست آمد. افزایش بیشتر دما (از 50 تا 70 درجه سانتیگراد) سبب کاهش خلوص و راندمان بیودیزل شد. با این حال، کاهش راندمان بیودیزل از خلوص بیودیزل بیشتر بود. در دماهای بالاتر، واکنش صابونی شدن تری گلیسیریدها توسط کاتالیزور قلیایی بسیار سریعتر از تبادل استری است. علاوه بر این، علی‌رغم استفاده از سیستم تغلیظ در آزمایشات، تعداد زیادی حباب توسط تبخیر متانول تولید شده که مانع از واکنش الکلیز شده و اتلاف متانول در دمای بالاتر افزایش می‌یابد. بنابراین، راندمان محصول، خلوص بیودیزل و بنابراین راندمان بیودیزل کاهش یافت [17,37,39].

### 3.5 خواص بیودیزل

خواص فیزیکی و شیمیایی بیودیزل تولید شده از جمله مقدار ید، مقدار اسید، دانسیته، ویسکوزیته سینماتیک، میزان صابونی شدن، عدد ستان، نقطه اشتعال، نقطه ابر، نقطه ذوب و تقطیر در جدول 2 ارائه شده است. خواص با استانداردهای سوخت دیزل، EN 14214 و ASTM 6751 مقایسه شد. مقایسه این اتصالات مناسب با دیزل نفت نشان داد که مقادیر چگالی و ویسکوزیته سینماتیک بیودیزل نسبتاً به دیزل نفت نزدیک است. دمای اشتعال بیودیزل 170 درجه سانتیگراد است که مقدار بالایی دارد که نسبت به سوخت دیزل در حمل و نقل دارای ایمنی بالاتری است. با این حال، نقاط ابری و نقاط ریزش بیودیزل به میزان قابل توجهی از دیزل نفتی بالاتر بود. بنابراین، بیودیزل برای فصل زمستان کمتر استفاده می‌شود. همانطور که در جدول نشان داده شده است



شکل 3: اثر دمای واکنش بر راندمان محصول و راندمان بیودیزل (نسبت مولی متانول به روغن 7 mol / mol و غلظت 0.9 w / w% KOH).

جدول 2

خواص فیزیکی و شیمیایی بیودیزل BAO.

| Property                                | BAO biodiesel [this study] | Petroleum diesel [35] | EN 14214  | ASTM 6751-02 |
|---|----------------------------|-----------------------|-----------|--------------|
| Iodine value (mg I <sub>2</sub> /g)     | 117.29                     |                       | <120      |              |
| Acid value (mg KOH/g)                   | 0.44                       |                       | <0.50     | <0.80        |
| Density at 15 °C (g/cm <sup>3</sup> )   | 0.887                      | 0.847                 | 0.86–0.90 | 0.87–0.90    |
| Viscosity at 40 °C (mm <sup>2</sup> /s) | 4.68                       | 2.39                  | 3.5–5.0   | 1.9–6.0      |
| Saponification value                    | 185.35                     |                       |           |              |
| Cetane number                           | 44.6                       | 46                    | >51       | >47          |
| Flash point (°C)                        | 173                        | 85                    | >120      | >130         |
| Cloud point (°C)                        | 10                         | -19                   |           | -3 to 12     |
| Pour point (°C)                         | -3                         | -23                   |           | -15 to 10    |
| Distillation (°C)                       |                            |                       |           |              |
| 10%                                     | 320                        |                       |           |              |
| 20%                                     | 322                        |                       |           |              |
| 30%                                     | 324                        |                       |           |              |
| 40%                                     | 325                        |                       |           |              |
| 50%                                     | 326                        | 258                   |           |              |
| 60%                                     | 327                        |                       |           |              |

خواص بیودیزل تولید شده، بجز عدد ستان، مطابق با استانداردهای EN 14214 و ASTM 6751 بیودیزل است. با این حال، عدد ستان کمتر از حد استاندارد بود. این مقدار برای عدد ستان به دلیل ترکیب اسید چرب BAO معقول است، که عمدتاً شامل اسید پالمیتیک 10.3 درصد وزنی، اسید اولئیک 33.9 درصد وزنی و اسید لینولئیک 46.0 درصد وزنی می باشد. عدد ستان متیل پالمیتات، متیل اولئات و متیل لینئولات به ترتیب 85.9، 59.3 و 38.2 است

[40]. همانطور که قبلا در بخش 3.1 ذکر شد، مقدار بالای اسیدهای چرب اشباع نشده می تواند عدد ستان را کاهش دهد.

#### 4. نتیجه گیری

مشخصه روغن بادام تلخ ایرانی تایید کرد که خواص شیمیایی و فیزیکی آن با برخی از روغنهای گیاهی مشابه است. مقدار اسید BAO برابر با 0.24 میلی گرم KOH / g بود که نشان می داد پیش تیمار نفت خام با اسید نیازی نیست. ترکیب اسید چرب BAO نشان داد که سهم اسید های چرب غیر اشباع در روغن بادام تلخ بسیار بالا است (84.7 wt%). تبادل استری روغن بادام تلخ با استفاده از کاتالیزور متانول و هیدروکسید پتاسیم برای تولید بیودیزل انجام شد. اثر نسبت مولی متانول به روغن، غلظت هیدروکسید پتاسیم و دمای واکنش بر راندمان محصول، خلوص بیودیزل و عملکرد بیودیزل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این پارامترها در واکنش تبادل استری عامل مهمی است. راندمان بالای محصول (97.9% وزنی) با راندمان بالای بیودیزل (90.8 wt%) در نسبت مولی متانول به روغن 7.0 مول/مول، غلظت هیدروکسید پتاسیم 0/9 وزنی وزنی و دمای 50 درجه سانتی گراد بدست آمد. خواص اندازه گیری شده بیودیزل، بجز عدد ستان، مطابق با استانداردهای EN 14214 و ASTM 6751 بود. کاهش عدد ستان بیودیزل تولید شده می تواند با اختلاط آن با پتروشیمی حل شود.