

شبیه‌سازی تولید بیودیزل به روش انتقال استری تری‌گلیسرید در یک راکتور غشائی

حسین بیکی^{1*}، منوچهر منوچهریان‌فرد²

¹ استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان، قوچان، خراسان رضوی، ایران
² دانشجوی کارشناسی ارشد، گرایش طراحی فرآیندها، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان

قوچان، خراسان رضوی، ایران

دریافت: 94/5/22 پذیرش: 95/2/22

چکیده

در این پژوهش تولید بیودیزل در یک راکتور غشائی در شرایط پایا شبیه‌سازی شده است. به دلیل مزایای فرآیند انتقال استری، تولید بیودیزل از این روش مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نوع واکنش، شرایط دما ثابت فرض شده است و معادلات جزء مولی حاصله به روش رانگ کاتای مرتبه 4 حل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که سرعت سمت لوله بر درصد تبدیل راکتور تاثیرگذارتر از سرعت سمت پوسته می‌باشد. کاهش 75٪ در سرعت متوسط سمت لوله و کاهش 50٪ در سرعت متوسط سمت پوسته سبب افزایش 3/8 برابری در درصد تبدیل تری‌گلیسرید می‌شود. همچنین طول‌های کمتر از 6 m برای راکتور غشائی، بهینه برای تولید محصول با خلوص بالا می‌باشند.

کلمات کلیدی: بیودیزل، راکتور غشائی، انتقال استری، شبیه‌سازی

مقدمه

از معضلات امروزه انرژی در جهان می‌توان به محدودیت ذخایر فسیلی، نگرانی‌های زیست محیطی، رشد جمعیت و افزایش میزان مصرف اشاره کرد از این رو بیشتر کشورها به اهمیت و نقش منابع مختلف انرژی، به ویژه انرژی‌های تجدیدپذیر و نو در تأمین نیازهای حال و آینده پی برده و در توسعه بهره‌برداری از این منابع، تحقیقات وسیع و سرمایه‌گذاری‌های اصولی می‌کنند [1]. در ایران نیز با توجه به نیاز روزافزون به منابع انرژی و کم شدن منابع انرژی فسیلی، ضرورت سالم نگه داشتن محیط‌زیست، کاهش آلودگی هوا، محدودیت‌های برق رسانی و تأمین سوخت برای نقاط و روستاهای دورافتاده و مواردی از این دست، استفاده

* hbeiki@qiet.ac.ir



از انرژی‌های نو و سوخت‌های جایگزین مورد توجه قرار گرفته است. از انرژی‌های نو می‌توان به استفاده از انرژی باد، انرژی خورشید، انرژی‌های داخل زمین و انرژی هسته‌ای اشاره نمود و سوخت‌های جایگزینی از قبیل دی‌متیل‌تر، بیوگاز و بیودیزل می‌توانند جایگاه ویژه‌ای داشته باشند [2 و 3].

به طور کلی یکی از منابع انرژی تجدیدشونده زیست‌توده است. هر ارگانیسم زنده‌ای که انرژی خورشید را جذب نموده و در خود به صورت کلروفیل ذخیره کند زیست‌توده نامیده می‌شود. زیست‌توده تنها منبع انرژی تجدیدپذیر است که قابلیت تبدیل شدن به سوخت‌های جامد، مایع و گاز را دارد. زیست‌توده چهارمین منبع انرژی جهان است و حدود 14% از نیازهای انرژی جهان را تأمین می‌کند [1]. در سال 2000 بیش از 10% عرضه انرژی جهان از منابع زیست‌توده بوده است [1، 4-6].

بیودیزل

بیودیزل (منو اکیل استر اسیدهای چرب¹) یک سوخت پاک جایگزین است که از منابع طبیعی قابل تجدید مانند روغن‌های گیاهی، روغن‌های پسماند و جلبک‌ها تولید می‌شود. در حال حاضر سوخت دیزل بخش عمده تأمین نیرو محرکه خودروهای جاده‌ای و به طور کلی موتورهای دیزل را بر عهده دارد. موتورهای دیزل را می‌توان به عنوان یکی از عوامل مهم ایجاد کننده آلودگی زیست‌محیطی نیز به‌شمار آورد. ذرات معلق و هیدروکربن‌های نسوخته که از آگزوز خودروهای دیزلی خارج می‌شوند، سمی و سرطان‌زا هستند و تهدیدی برای سلامتی انسان‌ها به‌شمار می‌روند. از طرفی نتایج مثبت استفاده از بیودیزل در کاهش سمیت و آلودگی هوا از سوی ارگان‌ها و سازمان‌های معتبر جهانی تایید شده است [7]. از اینرو استفاده از بیودیزل به عنوان سوخت جایگزین مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از بیودیزل در موتورهای هیدروکربن‌های نسوخته، منواکسید کربن و ذرات معلق می‌شود. از آنجا که در این سوخت ترکیبات گوگرد و آروماتیک وجود ندارد، اجزاء حاوی سولفات از بین می‌رود و موجب افزایش طول عمر موتور می‌شود. همچنین در ساختمان مولکولی بیودیزل 10% اکسیژن وجود دارد که باعث کاهش آلاینده‌های خروجی از آگزوز موتور می‌شود. استفاده از بیودیزل به جای گازوئیل موجب صرفه‌جویی اقتصادی، کاهش آلودگی محیط‌زیست و کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی می‌گردد. بیودیزل خاصیت تجزیه پذیری دارد و به طبیعت بر می‌گردد. این سوخت در قیاس با گازوئیل حاصل از نفت خام عدد ستان بالاتری دارد که این باعث کاهش پوسیدگی و افزایش عمر مفید سیستم سوخت رسانی می‌شود. همچنین آلودگی کمتری نسبت به دیزل پالایشگاهی دارد. خصوصیات بیودیزل در مقایسه با دیزل پالایشگاهی 2 در جدول (1) ارائه شده است. دیزل پالایشگاهی شماره 2 که آن را به صورت مخفف D2 نیز نمایش می‌دهند، سوخت موتور دیزل حاوی هیدروکربن‌های 10 تا 20 عدد کربن است [3].

¹Mono Alkyl Ester of Fatty Acids

جدول 1. خصوصیات بیودیزل در مقایسه با سوخت D2 [7, 3]

سوخت D2	بیودیزل	خصوصیات
0/84-0/86	0/87-0/89	دانسیته ($\frac{kg}{L}$)
47-55	46-70	عدد ستان
256-265	262-289	نقطه ابری شدن ¹ (K)
237-243	258-286	نقطه ریزش ² (K)
325-350	408-423	نقطه اشتعال ³ (K)
0/04-0/01	0/0000-0/0024	سولفور (wt%)
0/06-0/01	0/002-0/01	خاکستر (wt%)
28-38	0	آروماتیک (vol%)
45/3-46/7	39/3-39/8	ارزش حرارتی ($\frac{MJ}{kg}$)

با توجه به جدول (1) نقطه ابری شدن و نقطه ریزش بیودیزل به ترتیب 24°C و 43°C بیشتر از نقطه ابری شدن و ریزش سوخت دیزل پالایشگاهی است. این موضوع باعث محدودیت در استفاده از بیودیزل در شرایط آب و هوای سرد می شود. بنابراین می توان نتیجه گرفت از این سوخت در مناطق سردسیر نمی توان استفاده نمود.

بیودیزل به روش های رقیق سازی، پیرولیز⁴، میکرومولسیون⁵ و انتقال استری تولید می شود. در تمامی این روش ها سعی بر آن است تا ویسکوزیته روغن کاهش یابد. چرا که روغن دارای ویسکوزیته بالا و فراریت کم هستند و در موتور دیزل احتراق ضعیفی دارند. در روش پیرولیز که یک فرآیند حرارتی است، گاهی اوقات محصول کم تولید می شود و گاهی مقدار زیادی بنزین به جای گازوئیل تولید می شود. در روش های رقیق سازی و میکرومولسیون نیز هنوز برخی از مشکلات وجود دارد. از جمله این مشکلات می توان به رسوب کربن و آلودگی روغن موتور اشاره نمود. اما روش انتقال استری فرآیند بسیار مناسبی جهت کاهش ویسکوزیته روغن های گیاهی و حیوانی است. به روش انتقال استری، فرآیند شیمیایی نیز می گویند. روش انتقال استری به دلیل سادگی کاربرد بیشتری در تهیه بیودیزل دارد. از بزرگ ترین مزایای روش انتقال استری می توان به سرعت بالای واکنش انتقال استری و عدم حساسیت فرآیند نسبت به کیفیت خوراک مورد استفاده اشاره کرد [6]. در این فرآیند ابتدا روغن از فیلتر عبور داده می شود، سپس برای از بین بردن اسیدهای چرب آزاد، با قلیا تماس داده می شود. سپس با یک الکل (معمولاً متانول) و یک کاتالیزور (معمولاً هیدروکسید سدیم یا پتاسیم) ترکیب می شود. تری گلیسریدهای روغن برای تشکیل استرها و گلیسرول

¹Cloud Point

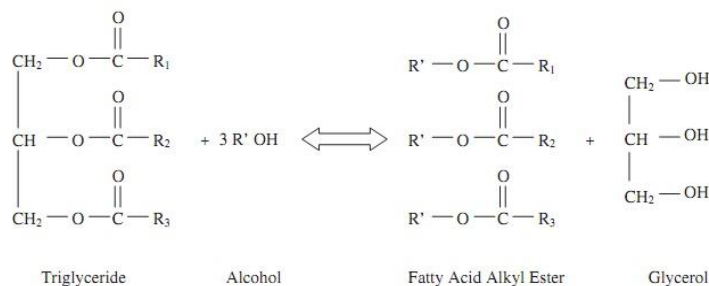
²Pour Point

³Flash Point

⁴Pyrolysis

⁵Microemulsion

واکنش شیمیایی انجام می‌دهند و بعداً از یکدیگر جدا شده و مورد تصفیه قرار می‌گیرند. واکنش تولید بیودیزل به روش انتقال استری در شکل (1) نشان داده شده است.



شکل 1. واکنش انتقال استری در تهیه بیودیزل [3]

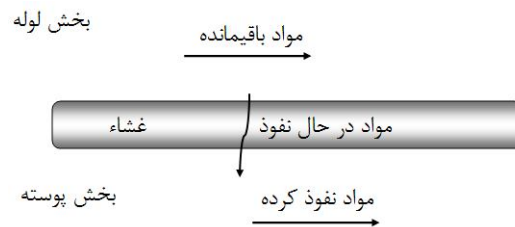
فرآیند انتقال استری یک واکنش سه مرحله ای است که در آن تری گلیسرید به دی گلیسرید و دی گلیسرید به منو گلیسرید و سرانجام منو گلیسرید به گلیسرین تبدیل می‌شود. در هر سه مرحله منو آلکیل استر اسیدهای چرب (بیودیزل) تولید می‌شود. مطابق شکل (1) سه مول الکل نیاز است تا یک مول تری گلیسرید را به یک مول بیودیزل تبدیل کند. البته معمولاً جهت بالابردن درصد تبدیل تری گلیسرید، الکل را به صورت واکنش دهنده اضافی وارد واکنش می‌کنند. در تولید بیودیزل به روش انتقال استری از متانول به عنوان الکل واکنشگر و از کاتالیزورهای قلیایی (سدیم یا پتاسیم هیدرواکسید) استفاده می‌شود [3, 8, 9].

میزان مصرف بالای الکل و تشکیل صابون و در نتیجه دشواری جداسازی محصولات از معایب روش انتقال استری است. استفاده از کاتالیست‌های ناهمگن بر پایه آلومینا یا سیلیکا [6] و استفاده از راکتورهای غشائی می‌تواند مشکلات این روش حل نماید. استفاده از راکتور غشائی محدودیت انتقال جرم بین فاز را کم کرده و بازدهی فرآیند را افزایش می‌دهد. از دیگر محاسن استفاده از راکتور غشائی کاهش میزان الکل نسبت به روغن گیاهی است.

با توجه به اهمیت استفاده از سوخت‌های جایگزین در این پژوهش راکتور غشائی تولید بیودیزل به روش انتقال استری تری گلیسرید شبیه‌سازی می‌شود. استفاده از راکتورهای غشائی موجب می‌شود مراحل واکنش و خالص‌سازی در یک واحد انجام شود. به علاوه استفاده از فرآیندهای غشائی جهت جداسازی سبب تولید محصول با خلوص بالاتر و کاهش هزینه‌های تولید می‌شود. اگر چه مطالعات زیادی در حوزه تولید بیودیزل انجام شده است [1-14] اما تحقیقات در زمینه تولید بیودیزل در راکتورهای غشائی کم می‌باشد [3, 10, 11, 14].

مدل‌سازی راکتور غشائی

راکتور غشائی به دو بخش لوله و پوسته، که در شکل 2 نشان داده شده است، تقسیم می‌شود. در داخل لوله واکنش انتقال استری رخ می‌دهد و هر شش نوع ماده وجود دارد. این مواد شامل تری گلیسرید، دی گلیسرید، منو گلیسرید، گلیسرین، متانول و بیودیزل یا همان منو آلکیل استر اسیدهای چرب می‌باشند.



شکل 2. جریان مواد در سیستم غشائی

در بخش پوسته موادی که قابلیت نفوذ از غشاء را دارند وارد می‌شوند. این مواد شامل بیودیزل، گلیسرین و متانول می‌باشند [10]. واکنش انتقال استری تقریباً گرمازا است، با توجه به میزان حرارت کم تولیدی می‌توان سیستم را به صورت دما ثابت در نظر گرفت [11]. بنابراین در مدل‌سازی‌ها نیازی به استفاده از معادله انرژی نمی‌باشد. همچنین فرآیند در شرایط پایا در نظر گرفته می‌شود. همچنین جریان مواد در بخش لوله و پوسته کاملاً توسعه یافته و در معادلات، سرعت مواد در بخش لوله و پوسته به صورت یک سرعت متوسط ثابت در نظر گرفته می‌شود.

معادلات مربوط به بخش لوله

در بخش لوله نیاز به معادلات جزء مولی برای هر کدام از اجزاء می‌باشد. معادله جزء مولی برای جزء i به صورت زیر می‌باشد. این رابطه برای هر شش جزء موجود در لوله باید نوشته شود.

$$-u_i \frac{d(C_{i,i})}{dz} + R_i - J_i \frac{2}{r_i} = 0 \quad (1)$$

که در آن u_i سرعت متوسط، z مختصات تغییرات محور غشاء، r_i شعاع لوله، J_i فلاکس انتقال جرم جزء i از لوله غشاء به پوسته آن، $C_{i,i}$ غلظت جزء i ام و R_i سرعت مصرف یا تولید ماده i ام می‌باشد. واکنش‌های انتقال استری در راکتور غشائی به صورت ابتدایی¹ و تعادلی می‌باشند [11]. با توجه به مراجع [12, 13] سرعت واکنش‌هایی که در انتقال استری رخ می‌دهد به صورت زیر می‌باشند.

$$\frac{dC_{TG}}{dt} = -k_1 C_{TG} C_{MeOH} + k_2 C_{FAME} C_{DG} \quad (2)$$

$$\frac{dC_{DG}}{dt} = k_1 C_{TG} C_{MeOH} - k_2 C_{FAME} C_{DG} - k_3 C_{DG} C_{MeOH} + k_4 C_{FAME} C_{MG} \quad (3)$$

$$\frac{dC_{MG}}{dt} = k_3 C_{DG} C_{MeOH} - k_4 C_{FAME} C_{MG} - k_5 C_{MG} C_{MeOH} + k_6 C_{FAME} C_{GL} \quad (4)$$

$$\frac{dC_{GL}}{dt} = k_5 C_{MG} C_{MeOH} - k_6 C_{FAME} C_{GL} \quad (5)$$

¹Elementary



$$\frac{dC_{FAME}}{dt} = k_1 C_{TG} C_{MeOH} - k_2 C_{FAME} C_{DG} + k_3 C_{DG} C_{MeOH} - k_4 C_{FAME} C_{MG} + k_5 C_{MG} C_{MeOH} - k_6 C_{FAME} C_{GL} \quad (6)$$

$$\frac{dC_{MeOH}}{dt} = k_1 C_{TG} C_{MeOH} + k_2 C_{FAME} C_{DG} - k_3 C_{DG} C_{MeOH} + k_4 C_{FAME} C_{MG} - k_5 C_{MG} C_{MeOH} + k_6 C_{FAME} C_{GL} \quad (7)$$

که در آنها k_i ها، ثوابت سرعت واکنشها و زیر نویسها به ترتیب TG تری گلیسرید، DG دی گلیسرید، MG مونوگلیسرید، GL گلیسرین، $MeOH$ الکل (متانول) و $FAME$ بیودیزل می باشند. روابط (2) تا (7) بترتیب سرعت مصرف تری گلیسرید، سرعت مصرف دی گلیسرید، سرعت مصرف مونوگلیسرید، سرعت تولید گلیسرین، مصرف الکل و سرعت تولید بیودیزل می باشند. بنابراین به جای R_i در رابطه (1) می توان بسته به نوع جزء مورد نظر یکی از معادلات (2) تا (7) را جایگزین نمود. مقدار ثوابت سرعت در جدول (2) نشان داده شده است.

جدول 2. ثوابت سرعت واکنش انتقال استری [12, 13]

ثابت سرعت واکنش	مقدار $(\frac{m^3}{kmol s})$
k_1	0/0026
k_2	0/6450
k_3	0/1492
k_4	1/7979
k_5	0/1365
k_6	0/00034

معادلات مربوط به بخش پوسته

معادله جزء مولی برای جزء i به صورت زیر می باشد. این رابطه برای هر سه جزئی که در پوسته سیستم غشائی جریان دارند، باید نوشته شود.

$$-u_s \frac{d(C_{s,i})}{dz} + J_i \frac{2r_i}{(r_s^2 - r_i^2)} = 0 \quad (8)$$

که در آن u_s سرعت متوسط سمت پوسته، r_s شعاع پوسته و $C_{s,i}$ غلظت جزء i ام در بخش پوسته می باشد. مقدار J_i از رابطه (9) محاسبه می شود.

$$J_i = K_i (C_{t,i} - C_{s,i}) \quad (9)$$

که در آن K_i ضریب ثابتی است که تابع ضریب نفوذ مواد، قطر متوسط منافذ غشاء و مواد عبوری از آن، ویسکوزیته مواد عبوری، فشار سیستم، فشار اسمزی و مقاومت غشاء و ژل تشکیل شده روی غشاء می باشد [11, 14-16]. مقادیر ثابت انتقال جرم از غشاء در جدول (3) ارائه شده است.

جدول 3. ثوابت مربوط به انتقال جرم از غشاء

مقدار $(\frac{m}{s})$	ثابت انتقال جرم
8×10^{-4}	K_{FAME}
3×10^{-6}	K_{GL}
1×10^{-7}	K_{MeOH}

رابطه J_{tot} (فلاکس کل عبوری از غشاء) به صورت زیر خواهد بود.

$$J_{tot} = J_{FAME} + J_{GL} + J_{MeOH} \quad (10)$$

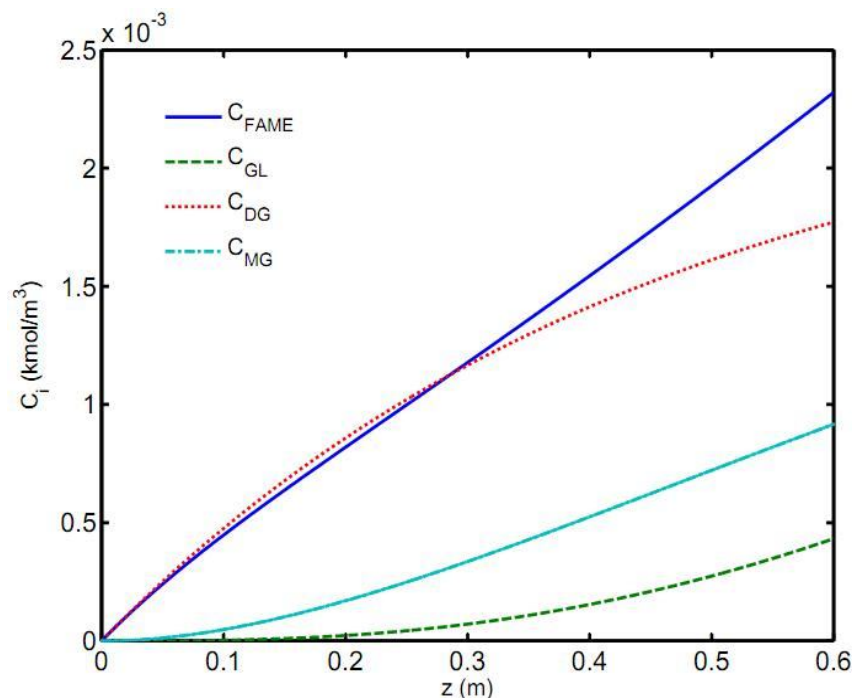
برای مدل سازی راکتور غشائی می بایست معادلات (1) تا (9) به طور همزمان حل شوند تا توزیع غلظت مواد در لوله و پوسته و میزان جرم نفوذ کرده از غشاء محاسبه شود. با توجه به اینکه معادلات دیفرانسیل از نوع معمولی مرتبه اول می باشند. برای حل آنها از روش پر کاربرد رانگ کاتای مرتبه 4 استفاده می شود [17-18]. ثوابت مورد استفاده در مدل سازی راکتور در جدول (4) آمده است. مابقی غلظت مواد که در جدول (4) نیامده است معادل صفر است. معادلات مورد نظر به کمک برنامه نویسی کامپیوتری در نرم افزار MATLAB 2014 حل می شوند.

جدول 4. ثوابت استفاده شده در شبیه سازی [11, 16-14]

طول سیستم غشائی	0/6 m
شعاع لوله	4/2 mm
شعاع پوسته	8/4 m
$u_t (\frac{m}{s})$	0/0602
$u_s (\frac{m}{s})$	0/04
$C_{t,TG} (\frac{kmol}{m^3})$	0/143
$C_{t,MeOH} (\frac{kmol}{m^3})$	0/857
$C_{s,FAME} (\frac{kmol}{m^3})$	0/89
$C_{s,MeOH} (\frac{kmol}{m^3})$	0/07
$C_{s,GL} (\frac{kmol}{m^3})$	0/04

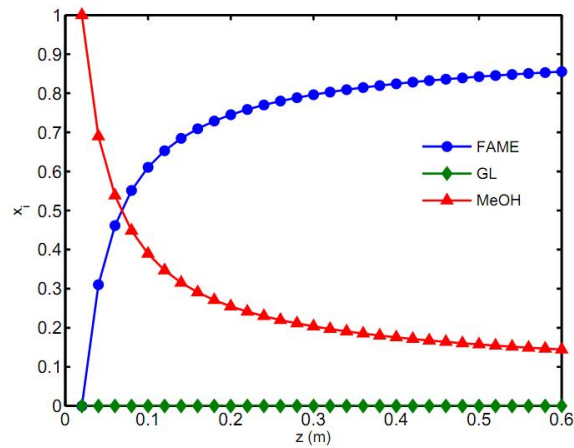
نتایج شبیه سازی و بحث

نتایج تغییرات غلظت مواد در بخش لوله در شکل (3) نشان داده شده است. این تغییرات غلظت در راکتور غشائی با طول 0/6 m مربوط به دمای 65°C و سرعت متوسط مواد در بخش لوله معادل با $0/0602\text{ m/s}$ می باشد. با توجه به شکل (3) غلظت بیودیزل در راکتور غشائی در بخش لوله نسبت به دیگر محصولات حاصل از واکنش انتقال استری به شدت در حال افزایش است. درصد تبدیل تری گلیسرید در این شرایط حدود 2/2% می باشد. میزان درصد تبدیل پایین تری گلیسرید به دلیل کوتاه بودن طول راکتور غشائی می باشد. در واقع می توان با افزایش طول غشاء و یا کاهش دبی مواد عبوری از داخل راکتور غشائی میزان درصد تبدیل تری گلیسرید را افزایش داد. تغییرات جزء مولی مواد در بخش پوسته راکتور غشائی در شکل (4) نشان داده شده است. با توجه به اطلاعات جدول (4) در مجموع $3/4\text{ mol/m}^3$ بیودیزل تولید می شود. حدود 35/3% از بیودیزل تولید شده از غشاء عبور می کند و در بخش پوسته قابل ذخیره سازی می باشد.



شکل 3. تغییرات غلظت مواد در بخش لوله راکتور غشائی

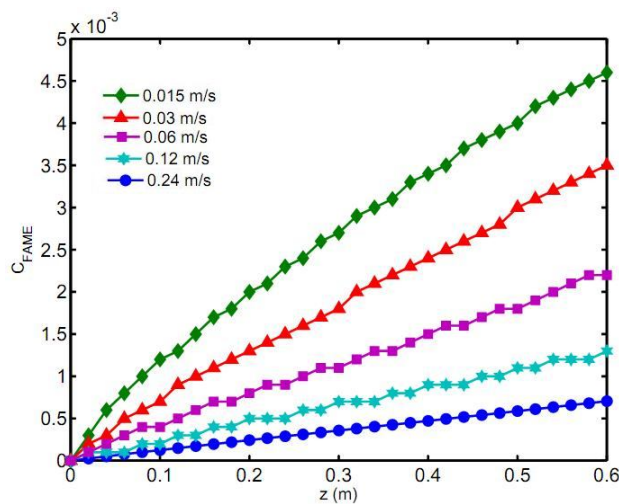
با توجه به شرایط غشاء، جزء مولی بیودیزل خروجی از بخش پوسته معادل با 0/85 می باشد. مابقی مواد موجود در خروجی پوسته راکتور غشائی متانول 14/54% و گلیسرین 0/02% (که قابل صرف نظر کردن است) می باشد. چنانچه طول غشاء افزایش یابد و یا دبی مواد عبوری از داخل راکتور غشائی کاهش پیدا کند، میزان درصد تبدیل تری گلیسرید افزایش می یابد و به تبع آن انتظار می رود الکل بیشتری مصرف شود و بیودیزل خالص تری تولید شود.



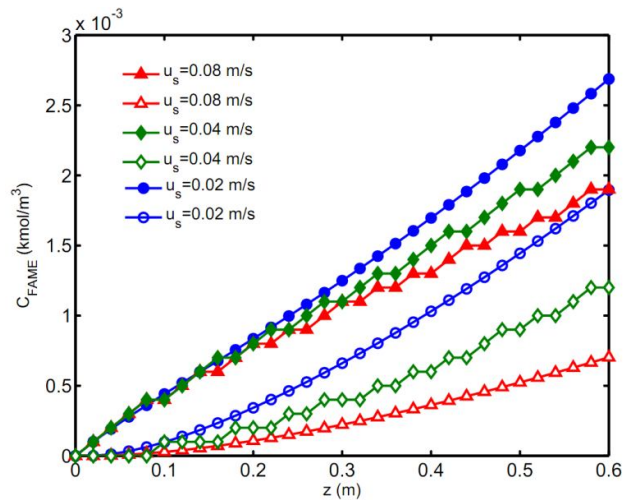
شکل 4. جزء مولی اجزاء در بخش پوسته راکتور غشائی

بررسی اثر دبی مواد

در شکل (5) اثر سرعت مواد بر توزیع غلظت آنها در بخش لوله نشان داده شده است. بدیهی است با افزایش سرعت مواد در غشاء، میزان تولید بیودیزل کاهش می‌یابد. با افزایش 16 برابری سرعت مواد در لوله، غلظت خروجی بیودیزل 84/65% کاهش می‌یابد. اثر دبی مواد در پوسته نیز بررسی شده است. اثر تغییرات دبی در پوسته راکتور غشائی، بر تولید بیودیزل در شکل (6) نشان داده شده است که در آن منحنی‌های حاوی نقاط توپر مربوط به غلظت بیودیزل در لوله و منحنی‌های حاوی نقاط توخالی مربوط به غلظت بیودیزل در پوسته می‌باشد.



شکل 5. بررسی اثر سرعت مواد در لوله بر تولید بیودیزل



شکل 6. اثر تغییرات سرعت در پوسته راکتور غشائی، منحنی‌های حاوی نقاط توپر مربوط به غلظت بیودیزل در لوله و منحنی‌های حاوی نقاط توخالی مربوط به غلظت بیودیزل در پوسته می باشد

همان‌طور که انتظار می‌رود، با توجه به شکل (6) افزایش سرعت در پوسته روندی مشابه افزایش دبی در لوله دارد. افزایش دبی سبب کاهش تولید بیودیزل می‌شود. افزایش 4 برابری در سرعت سمت پوسته موجب کاهش 43/22% در تولید بیودیزل در راکتور غشائی خواهد شد. در حالی که افزایش 4 برابری در سرعت سمت لوله موجب کاهش 53/85% در تولید بیودیزل در راکتور غشائی می‌شود. با توجه به شکل (5) و شکل (6) می‌توان نتیجه گرفت که سرعت در لوله بر درصد تبدیل مواد اولیه یا به عبارت دیگر بر میزان تولید بیودیزل تأثیرگذارتر از سرعت در پوسته می‌باشد. در واقع چنانچه سرعت متوسط در لوله و پوسته به ترتیب معادل با 0/015 و 0/02 باشد، درصد تبدیل تری گلیسرید به 8/4% می‌رسد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت کاهش 75% در سرعت متوسط در لوله و کاهش 50% در سرعت متوسط در پوسته سبب افزایش 3/8 برابری در درصد تبدیل تری گلیسرید می‌شود.

بررسی اثر طول راکتور غشائی

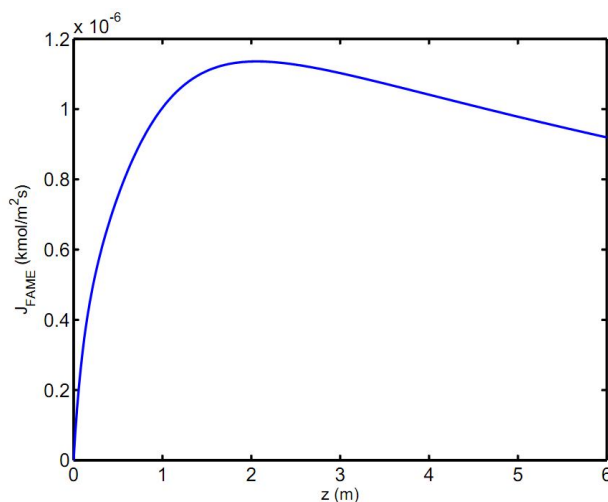
اثر طول راکتور غشائی بر میزان تولید بیودیزل در جدول (5) ارائه شده است.

جدول 5. اثر تغییرات طول غشاء بر عملکرد راکتور غشائی

z (m)	C_{totFAME} (غلظت کل بیودیزل تولیدی) (kmol/m ³)	X_{FAME} (جزء مولی بیودیزل در خروجی پوسته)	X_{TG}
0/6	0/0034	0/85	2/2%
6	0/0468	0/91	18/55%
15	0/0962	0/88	36/24%
30	0/1448	0/83	53/58%

اگر چه با افزایش طول راکتور غشائی میزان درصد تبدیل تری گلیسرید و به تبع آن غلظت بیودیزل تولید شده افزایش می‌یابد، با توجه به نتایج موجود در جدول (5) چنانچه هدف بدست آوردن محصول با خلوص بالاتر باشد بهتر است، از راکتور غشائی با طول کمتر استفاده نمود و مواد اولیه واکنش نداده را جدا نموده و به ورودی راکتور غشائی برگرداند. برای این مدل، طول‌های کمتر از 6 m مناسب است. بنابراین با انتخاب راکتور غشائی با طول کمتر از 6 m می‌توان به محصولی با خلوص حدود 91% دست یافت، اما بدلیل پایین بودن درصد تبدیل تری گلیسرید می‌بایست خروجی راکتور غشائی از لوله را به ابتدای آن برگشت داد. در شکل (7) فلاکس انتقال جرم بیودیزل از غشاء برای راکتور غشائی به طول 6 m نشان داده شده است. فلاکس انتقال جرم بیودیزل از غشاء برای راکتور غشائی به طول 6 m دارای یک نقطه بیشینه است. بیشینه فلاکس حدوداً در 1/9 m از ورودی لوله راکتور غشائی رخ می‌دهد و مقدار آن معادل $6 \text{ kmol/m}^2\text{s}$ می‌باشد. در حالی که متوسط فلاکس کل عبوری از غشاء معادل $6/79 \times 10^{-4} \text{ kmol/m}^2\text{s}$ می‌باشد. برای تعیین فلاکس کل انتقال جرم، می‌بایست روی سطح انتقال جرم متوسط گیری نمود. فلاکس کل انتقال جرم در راکتور غشائی با استفاده از رابطه (11) محاسبه می‌شود.

$$J_{tot} = \frac{\int_0^L J(z) dz}{L} \quad (11)$$



شکل 7. فلاکس انتقال جرم موضعی از غشاء به طول 6m

نتیجه گیری

در این پژوهش مدل‌سازی راکتور غشائی تولید بیودیزل به روش انتقال استری مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه روابط مورد استفاده در مدل‌سازی راکتور غشائی، معادلات دیفرانسیل معمولی مرتبه اول می‌باشند، از روش رانگ کاتای مرتبه 4 برای حل آنها استفاده شده است. اثر پارامترهای مختلف از قبیل دبی



مواد در داخل لوله و پوسته، طول غشاء و غلظت خوراک بر عملکرد راکتور مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- 1- با افزایش 16 برابری سرعت مواد در داخل لوله، غلظت خروجی بیودیزل %84/65 کاهش می‌یابد.
- 2- افزایش دبی در پوسته روندی مشابه افزایش دبی در لوله دارد. افزایش دبی سبب کاهش تولید بیودیزل می‌شود. افزایش 4 برابری در سرعت سمت پوسته موجب کاهش %43/22 در تولید بیودیزل در راکتور غشائی خواهد شد. در حالی که افزایش 4 برابری در سرعت سمت لوله موجب کاهش %53/85 در تولید بیودیزل در راکتور غشائی می‌شود.
- 3- بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سرعت در لوله بر درصد تبدیل مواد اولیه یا به عبارت دیگر بر میزان تولید بیودیزل تاثیرگذارتر از سرعت در پوسته می‌باشد. در واقع چنانچه سرعت متوسط در لوله و پوسته به ترتیب معادل با 0/015 و 0/02 باشد، درصد تبدیل تری گلیسرید به %8/4 می‌رسد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت کاهش %75 در سرعت متوسط در لوله و کاهش %50 در سرعت متوسط در پوسته سبب افزایش 3/8 برابری در درصد تبدیل تری گلیسرید می‌شود.
- 4- اگر چه با افزایش طول راکتور غشائی میزان درصد تبدیل تری گلیسرید و به تبع آن غلظت بیودیزل تولید شده افزایش می‌یابد، چنانچه هدف بدست آوردن محصول با خلوص بالاتر باشد بهتر است، از راکتور غشائی با طول کمتر استفاده نمود و مواد اولیه واکنش نداده را جدا نموده و به ورودی راکتور غشائی برگرداند. برای این مدل، طول‌های کمتر از 6 m مناسب است.

-5

فهرست علائم

غلظت مواد (kmol m^{-3})	C
فلاکس نفوذی جرم از غشاء	J
ثابت انتقال جرم	K_i
ثابت سرعت واکنش	k_i
سرعت واکنش ماده i	R_i
شعاع (m)	r
سرعت متوسط مواد (m s^{-1})	u
جزء تبدیل تری گلیسرید	X_{TG}

جزء مولی	X	
جهت مختصات محور غشاء	z	
		زیر نویس‌ها
دی گلیسرید	DG	
بیودیزل	FAME	
گلیسرین	GL	
جزء i ام	i	
متانول	MeOH	
منو گلیسرید	MG	
پوسته	s	
لوله	t	
تری گلیسرید	TG	
کل، مجموع	tot	

منابع

1. Ghobadian, B., A Parametric Study on Diesel Engine Noise. 1994, I.I.T. Roorkee, India.
2. Weing, Z., Production of Sunflower Oil Ethyl Ester for Use as a Biodiesel Fuel. 2000, Toronto University.
3. Shuit, S.H., et al., Membrane technology as a promising alternative in biodiesel production: A review. *Biotechnology Advances*, 2012. 30(6): p. 1364-1380.
4. Demirbas, A., Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Conversion and Management*, 2009. 50(1): p. 14-34.
5. Demirbas, A., Importance of biodiesel as transportation fuel. *Energy Policy*, 2007. 35(9): p. 4661-4670.
6. یزدانی، آ، ادیبی، م، چالش‌های تولید و استفاده بیودیزل به عنوان جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی، فرآیند نو، 1394. 51: ص. 5-24
7. Bozbas, K., Biodiesel as an alternative motor fuel: Production and policies in the European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008. 12(2): p. 542-552.



8. Guldhe, A., et al., Advances in Synthesis of Biodiesel via Enzyme Catalysis: Novel and sustainable approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015. 41: p. 1447-1464.
9. Qiu, Z., L. Zhao, and L. Weatherley, Process intensification technologies in continuous biodiesel production. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2010. 49(4): p. 323-330.
10. Baroutian, S., et al., A packed bed membrane reactor for production of biodiesel using activated carbon supported catalyst. *Bioresource Technology*, 2011. 102(2): p. 1095-1102.
11. Cheng, L.-H., et al., Modeling and simulation of biodiesel production using a membrane reactor integrated with a prereactor. *Chemical Engineering Science*, 2012. 69(1): p. 81-92.
12. Freedman, B., R. Butterfield, and E. Pryde, Transesterification kinetics of soybean oil 1. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1986. 63(10): p. 1375-1380.
13. Vicente, G., et al., Kinetics of Sunflower Oil Methanolysis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2005. 44(15): p. 5447-5454.
14. Alves, M.J., et al., Biodiesel purification using micro and ultrafiltration membranes. *Renewable Energy*, 2013. 58(0): p. 15-20.
15. Baker, R.W., *Membrane technology and applications*. second ed. 2004, California: John Wiley & Sons.
16. Perry, R.H., ed. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 7th ed. 1997, McGraw Hill.
17. Constantinides, A., Mostoufi, N., *Numerical Methods for Chemical Engineers with MATLAB Application*, 2000, Prentice Hall.
18. Beers, K. J., *Numerical Methods for Chemical Engineering Application in MATLAB*. 2007, Cambridge University Press.