

سنة ١٤٤٠



دانشکده کشاورزی

گروه مهندسی مکانیک بیو سیستم

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته ماشین‌های کشاورزی

موضوع

مطالعه دینامیکی فرآیند هم زنی در راکتور اس تی آر تولید بیودیزل

اساتید راهنما

دکتر آرش محبی

دکتر علی محمد نیکبخت

تنظیم و نگارش

نیما باهمت

بهمن ماه ۹۲

تقدیم به:

پدر عزیزم

که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی ایستادگی را تجربه نمایم

مادر مهربانم

دریای بیکران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر

و تقدیم به اعضای خانواده ام

تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که سخنوران در ستودن او بمانند و شمارندگان شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان حق او را گزاردن نتوانند. در اینجا شایسته است از زحمات بی‌دریغ استاد گرامی جناب آقای دکتر علی‌محمد نیکبخت کمال تشکر و سپاس‌گذاری را داشته باشم. همچنین از جناب آقای دکتر آرش محبی به عنوان استاد راهنمای دوم و دکتر عارف مردانی مدیریت محترم گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه ارومیه، که زحمت مشاوره این پایان‌نامه را متحمل شده و عنایت فراوانی به بنده داشته‌اند تشکر و قدردانی می‌نمایم.

از سایر اعضا هیئت علمی گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه ارومیه که از محضرشان استفاده نموده‌ام تشکر می‌نمایم.

از آقایان مهندسین اکبر کنگری، فردین مظلوم، رضا عبدی، سعید نجفی‌آذر، مختار نشاطی، حامد فتحی‌پور، حبیب زارع، اشکان زارعی، فراز خواستار، امیر شیخی، احسان نوروزعلی‌پور، فرید فرزندمحمدی، حمید دوست رضاییان و سعید مؤیدی و محمد خیری که هریک بنحوی بنده را در مراحل مختلف تدوین پایان‌نامه کمک و یاری رسانده‌اند صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایم.

همچنین از همکاری آقای مهندس عادل رضوانی وند فنایی که در این دوره از تحصیل مرا یاری نموده‌اند تشکر و قدردانی می‌نمایم.

در پایان از خانواده‌ی خودم به خصوص برادر عزیزم که در طول دوره تحصیل همواره یار و یاور من بوده‌اند خالصانه قدردانی می‌نمایم.

نیما باهمت

بهمن ماه ۱۳۹۲

در حال حاضر سوخت‌های نفتی به سرعت در حال کاهش هستند و مشکلات زیست محیطی پدید آورده اند بنابراین سوخت بیودیزل یکی از گزینه‌های جایگزین برای کاهش استفاده از سوخت‌های نفتی و فسیلی است. سوخت بیودیزل توسط مخازن هم‌زن دار تهیه و تولید می‌شوند، ساخت این مخازن زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد، همچنین میدان حرکتی در راکتورهای هم‌زن دار به صورت سه بعدی و پیچیده است و میدان جریان بسیار آشفته و گردابی می‌باشد. دینامیک سیالات محاسباتی (CFD (Computational Fluid Dynamics تکنیکی است که کاهش استفاده از عملیات را منجر می‌شود و جانشینی برای عملیات آزمایشگاهی است. CFD یکی از بزرگترین زمینه‌هایی است که مکانیک قدیم را به علوم رایانه و توانمندی‌های نوین محاسباتی مرتبط می‌کند. در این روش با تبدیل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای حاکم بر سیالات به معادلات جبری امکان حل عددی این معادلات فراهم می‌شود. با استفاده از شبیه‌سازی این مخازن در نرم‌افزارهایی چون فلوئنت می‌توان در وقت و هزینه صرفه‌جویی کرد، همچنین با استفاده از CFD می‌توان تحلیل دینامیکی سیال در داخل راکتور را انجام داد و نتایجی را عرضه کرد که در ساخت و طراحی راکتور بسیار مهم می‌باشند. برای این کار ابتدا مدل مورد نظر در نرم‌افزار گمبیت طراحی می‌گردد، سپس مش بندی شده و پس از اعمال شرایط مرزی به صورت فایل مش به نرم‌افزار انسیس فلوئنت منتقل می‌گردد. در این تحقیق تغییرات به وجود آمده بر روی سیال داخل راکتور، با تغییر دادن سرعت هم‌زن داخل راکتور و تغییر هندسه‌ی هم‌زن تحقیق و بررسی گردیده‌است. که با استفاده از مدل ویسکوز $k-\epsilon$ تحلیل‌های سرعت سیال و انرژی جنبشی آشفته‌گی در داخل راکتور مورد بررسی قرار می‌گیرد همچنین با تحلیل نتایج بدست آمده از سرعت سیال، انرژی جنبشی آشفته‌گی و توان مصرفی نتیجه گرفته می‌شود که کدام هم‌زن نسبت به هم‌زن‌های دیگر بهینه‌تر می‌باشد.

کلمات کلیدی: بیودیزل، راکتور، هم‌زن، دینامیک سیالات محاسباتی، سرعت ورودی هم‌زن، هندسه‌ی

هم‌زن

فهرست جداول

جدول ۱-۳: ابعاد هندسی راکتور مورد نظر بدون همزن	۴۴
جدول ۲-۳: ابعاد همزن ۴ سری با ۴ پره در هر سری	۴۵
جدول ۳-۳: ابعاد همزن ۶ سری با ۴ پره در هر سری	۴۶
جدول ۴-۳: ابعاد همزن یک سری با ۴ پره	۴۶
جدول ۱-۴: نتایج سرعت سیال (velocity magnitude) بر حسب m/s	۷۴
جدول ۲-۴: نتایج انرژی جنبشی توربولانت Turbulent Kinetic Energy بر حسب m^2/s^2	۷۴
جدول ۳-۴: گشتاور ایجاد شده توسط پره و شفت در راستای محور y بر حسب (N-m)	۷۴
جدول ۴-۴: نتایج عدد توان (power number)	۷۵
جدول ۵-۴: نتایج عدد رینولدز	۷۵
جدول ۱-۵: نتایج سرعت سیال (velocity magnitude) بر حسب m/s	۷۷
جدول ۲-۵: نتایج انرژی جنبشی توربولانت Turbulent Kinetic Energy بر حسب m^2/s^2	۷۷
جدول ۳-۵: گشتاور ایجاد شده توسط پره و شفت در راستای محور y بر حسب (N-m)	۷۸
جدول ۴-۵: نتایج عدد توان (power number)	۷۸
جدول ۵-۵: نتایج عدد رینولدز	۷۹

فهرست اشکال

شکل ۱-۱: واکنش ترانساستریفیکاسیون (Van Gerpen., et al 2003)	۱
شکل ۲-۱: فرآیند بیج	۳
شکل ۳-۱: شکلواهی بنیادی تولید بیودیزل (Marchetti., et al 2005)	۳
شکل ۱-۲: فرآیند جریان آلفا	۶
شکل ۲-۲: دستگاه مرکب واکنش-جداساز گلیسرین ترنت	۷
شکل ۳-۲: جداسازی روغن و FAME بوسیله راکتور غشایی	۱۹
شکل ۴-۲: شکلواهی سیستم راکتوری غشایی	۲۰
شکل ۵-۲: مش quad/hex	۲۴
شکل ۶-۲: مش tri/tet	۲۴
شکل ۷-۲: مش ترکیبی (hybrid)	۲۵
شکل ۱-۳: معرفی بخش منوی طراحی هندسه نرم افزار گمبیت	۳۱
شکل ۲-۳: راکتور طراحی شده در گمبیت	۴۴
شکل ۳-۳: همزن با ۴ سری پرهی ۴ تایی	۴۵
شکل ۴-۳: همزن با ۶ سری پرهی ۴ تایی	۴۶
شکل ۵-۳: همزن با یک سری پره	۴۷

- شکل ۳-۶: منوی مش بندی در گمبیت ۴۸
- شکل ۳-۷: راکتور مش بندی شده ۴۹
- شکل ۳-۸: قسمت انتخاب مدل مورد نظر در فلوئنت ۵۰
- شکل ۳-۹: پنجره تعریف مواد در فلوئنت ۵۱
- شکل ۳-۱۰: پنجره وارد کردن سرعت ورودی همزن به صورت rpm در منطقه مرزی ۵۱
- شکل ۳-۱۱: پنجره وارد کردن سرعت ورودی همزن به صورت rpm در شرایط مرزی ۵۲
- شکل ۳-۱۲: پنجره وارد کردن تعداد تکرار و اجرای برنامه ۵۲
- شکل ۴-۱: سرعت سیال با ۴ سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 200rpm ۵۴
- شکل ۴-۲: انرژی جنبشی با ۴ سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 200rpm ۵۵
- شکل ۴-۳: سرعت سیال با ۴ سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 250rpm ۵۵
- شکل ۴-۴: انرژی جنبشی آشفته با ۴ سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 250rpm ۵۶
- شکل ۴-۵: سرعت سیال با ۴ سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 300rpm ۲۵
- شکل ۴-۶: انرژی جنبشی آشفته با ۴ سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 300rpm ۵۷
- شکل ۴-۷: سرعت سیال با ۴ سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 350rpm ۵۸
- شکل ۴-۸: انرژی جنبشی با ۴ سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 350rpm ۵۸
- شکل ۴-۹: سرعت سیال با ۴ سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 400rpm ۵۸
- شکل ۴-۱۰: انرژی جنبشی با ۴ سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 400rpm ۵۹
- شکل ۴-۱۱: سرعت سیال با ۴ سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 450rpm ۵۹
- شکل ۴-۱۲: انرژی جنبشی با ۴ سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 450rpm ۶۰
- شکل ۴-۱۳: سرعت سیال با ۴ سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 500rpm ۶۰
- شکل ۴-۱۴: انرژی جنبشی با ۴ سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 500rpm ۶۱
- شکل ۴-۱۵: تغییرات ماکسیمم سرعت سیال با سرعت ورودی همزن ۶۲
- شکل ۴-۱۶: تغییرات ماکسیمم انرژی جنبشی آشفته با سرعت ورودی همزن ۶۲
- شکل ۴-۱۷: نمودار تغییرات Vel_{mag} و $Tur_{Kinetic Energy}$ را در محور X نشان می دهد ۶۳
- شکل ۴-۱۸: سرعت سیال با ۶ سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 300rpm ۶۴
- شکل ۴-۱۹: انرژی جنبشی با ۶ سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 300rpm ۶۴
- شکل ۴-۲۰: سرعت سیال با ۶ سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 350rpm ۶۵
- شکل ۴-۲۱: انرژی جنبشی با ۶ سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 350rpm ۶۵
- شکل ۴-۲۲: سرعت سیال با ۶ سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 400rpm ۶۶
- شکل ۴-۲۳: انرژی جنبشی با ۶ سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 400rpm ۶۶
- شکل ۴-۲۴: سرعت سیال با ۶ سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 450rpm ۶۷
- شکل ۴-۲۵: انرژی جنبشی با ۶ سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 450rpm ۶۷
- شکل ۴-۲۶: سرعت سیال با ۶ سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 500rpm ۶۸

شکل ۴-۲۷: انرژی جنبشی با ۶ سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 500rpm ۶۸

شکل ۴-۲۸: نمودار تغییرات ماکسیمم سرعت سیال با سرعت ورودی همزن ۶۹

شکل ۴-۲۹: نمودار تغییرات ماکسیمم انرژی جنبشی آشفته‌گی با سرعت ورودی همزن ۶۹

شکل ۴-۳۰: سرعت سیال با یک سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 500rpm ۷۰

شکل ۴-۳۱: انرژی جنبشی آشفته‌گی با یک سری پره بر روی همزن در سرعت ورودی همزن 500rpm ۷۱

شکل ۴-۳۲: تغییرات انرژی جنبشی آشفته‌گی در دو نوع همزن با سرعت ورودی ۷۲

شکل ۴-۳۳: تغییرات سرعت سیال در دو نوع همزن با سرعت ورودی ۷۲

شکل ۴-۳۴: نحوی حرکت وکتورهای سرعت رنگین شده با مقدار انرژی جنبشی آشفته‌گی ۷۳

شکل ۴-۳۵: نحوی حرکت وکتورهای سیال در داخل راکتور ۷۳

فهرست مطالب

۱- فصل اول ۱

۱-۱- سابقه بیودیزل ۱

۲-۱- تعریف مسئله ۴

۲- فصل دوم ۵

۱-۲- بیودیزل ۵

۲-۲- فاکتورهای مهم در طراحی راکتور برای تولید بیودیزل ۹

۱-۲-۲- انتقال جرم (همزنی) ۹

۲-۲-۲- توزیع زمان واکنش (Residence Time Distribution) ۱۲

۳-۲-۲- زمان واکنش (Residence Time or Reaction Time) ۱۲

۳-۲- فرآیندهای تولید ۱۲

۱-۳-۲- فرآیند بچ (Batch process) ۱۲

۲-۳-۲- فرآیند نیمه بچ (Semi Batch Process) ۱۴

۳-۳-۲- فرآیند پیوسته (Continious Process) ۱۴

۴-۲- انواع راکتورهای شیمیایی برای تولید بیودیزل ۱۶

۱-۴-۲- راکتورهای مخزنی همزن‌دار (Stirred Tank Reactor) ۱۶

۲-۴-۲- راکتورهای غشایی (Membrane Reactors) ۱۸

۲۱	۵-۲-شبه سازی های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD).....
۲۱	۱-۵-۲-دینامیک سیالات محاسباتی.....
۲۳	۲-۵-۲-طرز کار CFD.....
۲۳	۳-۵-۲-گسسته سازی در CFD.....
۲۳	۴-۵-۲-طراحی و ایجاد شبکه.....
۲۵	۵-۵-۲-یکدست کردن مدل عددی.....
۲۶	۶-۵-۲-محاسبه حل.....
۲۶	۷-۵-۲-بررسی نتایج.....
۲۷	۸-۵-۲-کاربرد های CFD.....
۲۷	۹-۵-۲-مزیت های CFD.....
۲۸	۱۰-۵-۲-محدودیت های CFD.....
۲۹	۶-۲-استفاده از CFD برای تحلیل راکتور.....
۳۰	۷-۲-خلاصه و ارائه هدف.....
۳۱	۳-فصل سوم.....
۳۱	۱-۳-مقدمه.....
۳۱	۱-۱-۳-نرم افزار های مورد استفاده.....
۴۳	۲-۳-طراحی راکتور توسط Gambit.....
۴۴	۳-۳-طراحی همزن راکتور توسط Gambit.....
۴۷	۴-۳-اتصال همزن با مخزن و ایجاد کامل راکتور.....
۴۸	۵-۳-مش بندی راکتور.....
۴۹	۶-۳-شرایط و مناطق مرزی.....
۴۹	۷-۳-تحلیل در فلوئنت.....
۴۹	۱-۷-۳-تعریف مدل مناسب.....
۵۰	۲-۷-۳-مواد مورد استفاده شده.....
۵۱	۳-۷-۳-شرایط مرزی.....
۵۲	۴-۷-۳-اجرای محاسبات Run Calculation.....
۵۳	۵-۷-۳-بدست آوردن گشتاور.....

۵۴	فصل چهارم
۵۴	۱-۴-مقدمه
۵۴	۲-۴-تأثیر سرعت ورودی همزن
۶۳	۳-۴-تأثیر نوع همزن
۷۷	۵-فصل پنج
۷۷	۱-۵-نتیجه گیری
۸۰	۲-۵-پیشنهادهات

۱- فصل اول

مقدمه و هدف

۱-۱- سابقه بیودیزل

مفهوم استفاده از بیوفیول‌ها در موتورهای دیزل از نمایش اولین موتور دیزل بوسیله‌ی مخترع آن، رادولف دیزل در نمایشگاه جهانی پاریس در سال ۱۹۰۰ میلادی، نشأت گرفته‌است. در سوخت این موتور از روغن بادام‌زمینی استفاده شده‌بود. ولی بدلیل فراهم بودن وافر پترو دیزل، فعالیت‌ها روی روغن‌های گیاهی بصورت جدی پیگیری نشد و زمانی توجه‌ها را به خود جلب کرد که مشخص شد سوخت‌های نفتی به سرعت در حال کم شدن هستند و مشکلات زیست محیطی پدید آورده‌اند (Sahoo and Das, 2009). بیودیزل پس از اینکه سطح قابل توجهی از موفقیت را در اروپا بدست آورد در ایالات متحده نیز مورد توجه قرار گرفت (Van Gerpen., et al 2003). در سال‌های اخیر تعداد زیادی از محققان تلاش‌های جدی جهت استفاده از منابع مختلف انرژی بعنوان سوخت در موتورهای دیزل را به انجام رسانده‌اند. استفاده از روغن‌ها بدلیل برخی خصوصیات نامطلوبشان، خصوصاً ویسکوزیته‌ی آنها، محدود شده‌است. ویسکوزیته‌ی بالای روغن گیاهی سبب اتمیزه شدن ضعیف سوخت، احتراق ناقص، و باقی ماندن کربن روی انژکتورها و نشیمن سوپاپ‌ها، و باعث ایجاد مشکلات جدی در موتور می‌گردد. یک راه ممکن جهت غلبه بر مشکل ویسکوزیته‌ی بالا، مخلوط نمودن روغن گیاهی با سوخت دیزل به نسبت مناسب بوده و راه دیگر ترانس‌استریفیکاسیون روغن‌ها جهت تولید بیودیزل می‌باشد. بیودیزل بعنوان یک سوخت تجدیدپذیر، تجزیه‌پذیر، و غیرسمی در سال‌های اخیر توجهات زیادی را بخود جلب کرده‌است (Marchetti., et. a.l 2005, Sahoo and Das, 2009). از طرف دیگر سیاست‌های تشویقی برخی دولت‌ها از قبیل معافیت‌های مالیاتی، گام‌های مثبتی بوده که در جهت ارزان‌سازی این سوخت و حمایت از تولید کنندگان برداشته شده‌است. به هر حال کاهش قیمت تمام شده‌ی بیودیزل اصلی‌ترین چالش در اقتصادی سازی و تجاری سازی آن بوده‌است (Sdrula, 2010). مشخصات فیزیکی بیودیزل از قبیل: ویسکوزیته، دانسیته، نقطه‌ی ابری شدن، نقطه‌ی ریزش، عدد ستان، ویژگی‌های تقطیر، نقطه‌ی جرقه‌زنی، نقطه‌ی احتراق، ارزش بالای حرارتی، و برخی مشخصه‌های دیگر خیلی شبیه سوخت دیزل می‌باشد (Demirbas, 2006).

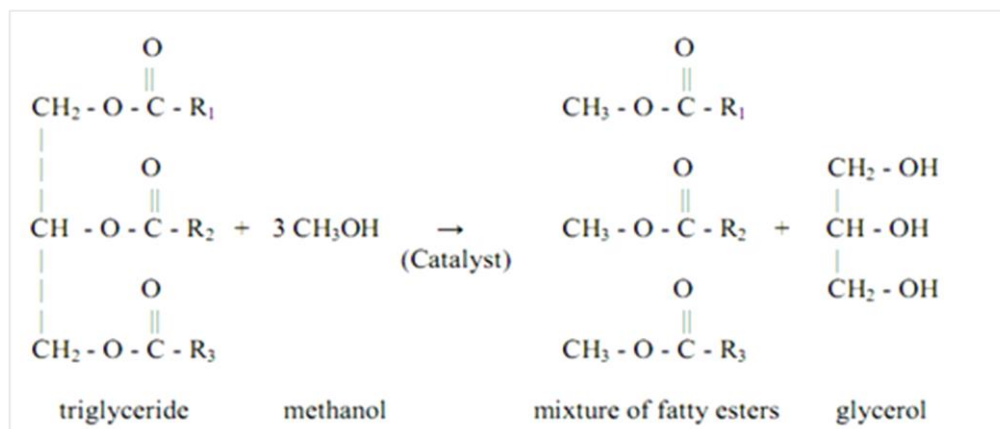
بیودیزل از لحاظ شیمیایی مونو آلکیل استرهای با زنجیره‌ی طولانی اسیدهای چرب است که از مواد خام تجزیه پذیر مانند روغن‌های گیاهی و چربی‌های حیوانی گرفته می‌شود و ویسکوزیته‌ی دینامیکی برابر ۰/۸۸ کیلوگرم بر مترثانیه دارد که نزدیک به ویسکوزیته‌ی سوخت دیزل می‌باشد (Sahoo and Das, 2009). این مواد خام حاوی تری‌گلیسیریدها، اسیدهای چرب آزاد و آلودگی‌ها می‌باشند و روغن‌های گیاهی می‌توانند به صورت خام، صمغ‌زدایی شده و یا خالص‌سازی شده خریداری و استفاده گردند. انتخاب نوع روغن بر تکنولوژی تولیدی که مورد نیاز است تاثیر می‌گذارد (Van Gerpen., et al 2003). مواد خام اولیه در

تولید بیودیزل شامل روغن‌های گیاهی خوراکی و غیر خوراکی مانند: سویا، منداب، کانولا، گلرنگ، نارگیل، نخل خرما، جاتروفا، گرچک، آفتابگردان، زیتون، بادام زمینی، کلزا، ذرت و... و نیز چربی‌های حیوانی مانند چربی خوک، پیه، چربی ماکیان و... و همچنین روغن ضایعات آشپزخانه می‌باشد (Singh and Singh, 2010).

بیودیزل می‌تواند به سه روش هیدرولیز، میکروامولوسیون، و ترانس‌استریفیکاسیون تولید شود که ترانس‌استریفیکاسیون جدیدترین و پر بازده‌ترین آنها می‌باشد. واکنش ترانس‌استریفیکاسیون بین روغن یا چربی با یک الکل مونوهیدریک و معمولاً با نسبت مولاریته‌ی الکل به روغن ۶ به ۱، و در حضور کاتالیزور تولید می‌شود (شکل ۱-۱) (Ma and Hanna, 1999). لازم به ذکر است که، همانطور که در واکنش زیر نشان داده شده است، گلیسرین محصول با ارزش جانبی این واکنش می‌باشد.

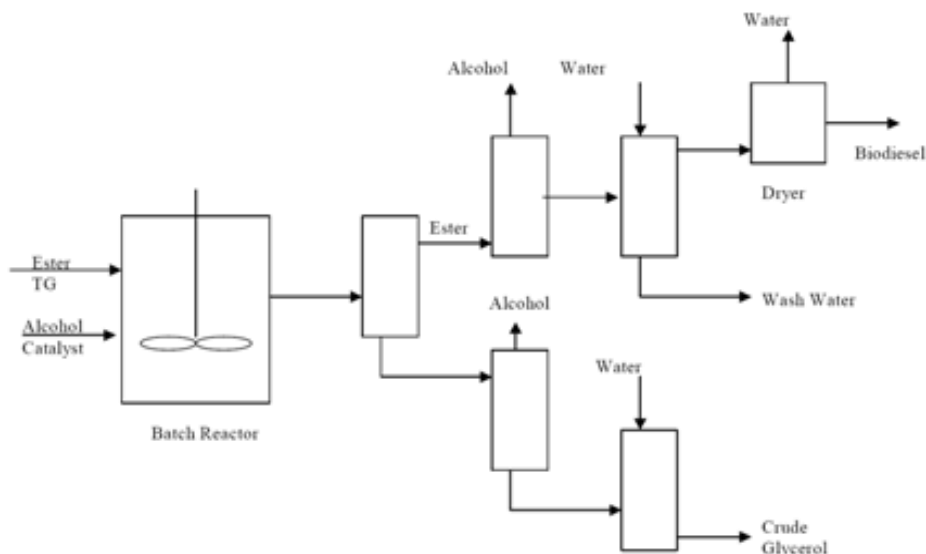
ساده‌ترین فرآیند تولید بیودیزل، فرآیند بچ می‌باشد (شکل ۱-۲) که سایر فرآیندها در واقع کامل شده و پیشرفته‌تر شده‌ی این فرآیند می‌باشند. یکی از مزایای اولیه بیودیزل این است که مواد خام استفاده شده برای تولید آن طبیعی و قابل تجزیه می‌باشند.

سوخت بیودیزل خالص (B100) بدلیل نداشتن ترکیبات آروماتیک (یا در صورت وجود به مقدار بسیار کم) دارای عدد ستان بالایی می‌باشد. این ترکیبات آروماتیک در سوخت پترودیزل وجود دارند و ترکیباتی ناخوشایند محسوب شده و باعث پایین آمدن عدد ستان آن می‌شوند. البته وجود ترکیبات آروماتیک بدلیل دانسیته بالا باعث افزایش محتوای انرژی سوخت می‌شوند.



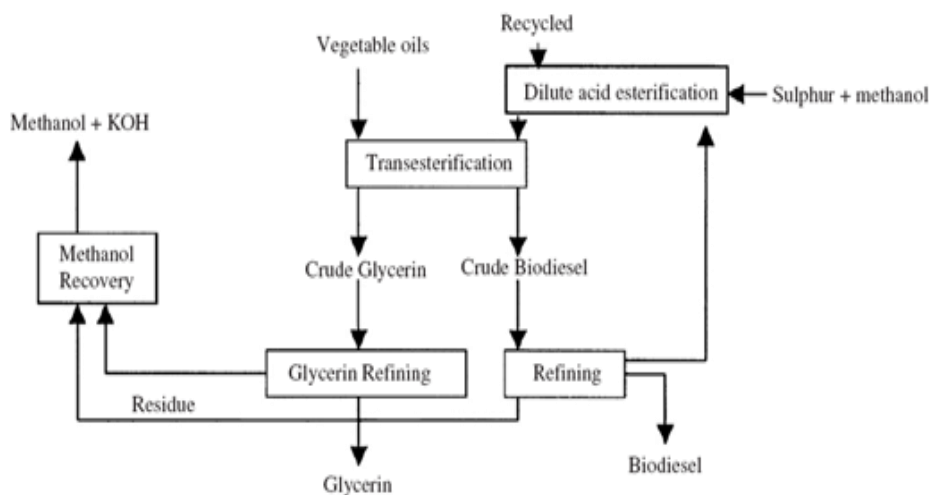
شکل ۱-۱: واکنش ترانس‌استریفیکاسیون (Van Gerpen., et al 2003)

بیودیزل بدلیل اینکه حاوی مقادیر زیادی مولکول با پیوند دوگانه می‌باشد، پایداری اکسیداسیونی کمتری نسبت به سوخت دیزل با پایه نفت خام دارد (Van Gerpen., et al 2003).



شکل ۲-۱: فرآیند بیج

در حالت کلی می‌توان شکل‌واره‌ی تولید بیودیزل را بصورت زیر نشان داد:



شکل ۳-۱: شکل‌واره‌ی بنیادی تولید بیودیزل (Marchetti., et al 2005)

بر خلاف سوخت دیزل با پایه نفت خام که در آن محدوده‌ی گسترده‌ای از مواد اضافه شونده (additive) جهت بهبود ویژگی‌های سوخت به آن اضافه می‌شوند، در سوخت بیودیزل تکنولوژی اضافه کردن این مواد پیشرفت کمی داشته‌است، چنان که مواد اضافه شونده‌ی کمی جهت بهبود کیفیت این سوخت در دسترس می‌باشد (Van Gerpen., et al 2003).

۱-۲- تعریف مسئله

با توجه به افزایش قیمت نفت خام و نگرانی‌های زیست محیطی در مورد آلودگی‌های ناشی از گازهای خروجی از اگزوز وسایل نقلیه و تغییرات اقلیمی ناشی از آن در جو زمین و نیز افزایش استفاده از موتورهای دیزل، بدلیل عملکرد بهتر آنها نسبت به موتورهای بنزینی، باعث شده‌است سوخت جایگزین بیودیزل به فضای با اهمیت توسعه تبدیل گردد (Marchetti, et al 2005). همچنین کمبود ذخایر نفت خام و قوانین سختگیرانه برای خروجی‌های اگزوز وسایل نقلیه، لزوم ایجاد سوخت‌های فسیلی با آلودگی کمتر و دسترسی آسان به سوخت‌های تجدید پذیر جهت استفاده در موتورهای احتراق داخلی را بیش از پیش نمایان می‌سازد (Sahoo and Das, 2009). همزمان با توسعه بیودیزل بعنوان منبع جایگزین و تجدیدپذیر انرژی، لزوم تلاش ملی در زمینه کشاورزی مکانیزه در جهت نیل به حداکثر خودکفایی در زمینه امنیت انرژی هر چه بیشتر تاکید میشود. استفاده از سوخت بیودیزل باعث کاهش گازهای آلاینده‌ی خروجی از اگزوز وسایل نقلیه می‌شود. تنها آلاینده‌ای که برخی محققان معتقدند که افزایش می‌یابد NO_x می‌باشد. البته نتایج بسیاری نیز حاکی از کاهش این آلاینده می‌باشد (Guariero, et al 2008). همچنین ضایعات کشاورزی حاصل از دانه‌های روغنی می‌تواند یکی از منابع اساسی تولید سوخت بیودیزل باشد. با توجه به اینکه ساخت راکتورهای بیو دیزل زمان‌بر، هزینه‌بر و مستلزم کار کارشناسی بوده لذا با توجه به مراجع شبیه‌سازی‌های اولیه از این راکتورها اهمیت زیادی دارد.

میدان حرکتی در راکتورهای هم‌زن دار به صورت سه بعدی و پیچیده است. و میدان جریان بسیار آشفته و گردابی می‌باشد. CFD تکنیکی است که کاهش استفاده از عملیات را منجر می‌شود و جانمایی برای عملیات آزمایشگاهی است. همچنین با استفاده از CFD در مورد سنخیت در مخازن هم‌زن دار با دیواره‌های آرام کننده برای هم‌زن‌های مختلف می‌توان نتایجی مشابه با نتایج عملی بدست آورد.

هدف از نگارش این پایان نامه

دستیابی به تحلیل دینامیکی راکتور با انواع هم‌زن‌ها، در زمان کمتر و با هزینه کمتر بدون کار، کارگاهی و با استفاده از شبیه‌سازی از اهداف تحقیق به شمار می‌رود.

۲- فصل دوم

کلیات و مروری بر تحقیقات گذشته

۲-۱- بیودیزل

بیودیزل با سه روش عمده‌ی شکست حرارتی (هیدرولیز)، میکروامولسیون و ترانس استریفیکاسیون تولید می‌شود که آخری مرسوم‌ترین روش مورد استفاده در تولید بیودیزل می‌باشد (Ma and Hanna, 1999). در روش ترانس استریفیکاسیون، از لحاظ نسبت استکیومتری سه مول متانول با یک مول تری-گلیسیرید در حضور کاتالیزور وارد واکنش می‌شوند و سه مونومتیل‌استر (بیودیزل) به همراه یک مول گلیسرین (بعنوان محصول جانبی) تولید می‌شود (Van Gerpen., et al 2003). ولی برای انجام بهتر واکنش از نسبت‌های مولاریته‌ی بالاتری استفاده می‌شود که مرسوم‌ترین آن ۶:۱ می‌باشد ولی در صنعت حتی نسبت‌های ۱۰:۱ و ۱۲:۱ نیز گزارش شده‌اند (Freedman., et al 1984). از میان روش‌های مختلف ترانس استریفیکاسیون، روش کاتالیزوری بازی مرسوم‌ترین و اقتصادی‌ترین روش مورد توجه است. در صورتیکه روش کاتالیزوری اسیدی اغلب بعنوان یک فرایند پیش‌تیمار (استریفیکاسیون) برای مواد خام با درصد بالای اسید چرب مورد استفاده قرار می‌گیرد (Eckey, 1956, Crabbe., et al 2001).

جزئیات واکنش تری‌گلیسیرید با متانول به این صورت است که این فرآیند یک واکنش سه مرحله‌ای برگشت‌پذیر است که ابتدا در مرحله‌ی اول، متانول با تری‌گلیسیرید واکنش داده و دی‌گلیسیرید را تولید می‌کند و بدنبال آن واکنش دی‌گلیسیرید با متانول منجر به تولید مونوگلیسیرید می‌شود و در نهایت با واکنش مونوگلیسیرید با متانول گلیسرین تولید می‌شود. در هر یک از مراحل اشاره شده یک مول متیل‌استر اسید چرب (بیودیزل) تولید می‌شود (Freedman., et al 1984, Freedman., et al 1986). بنابراین کل واکنش می‌تواند در معادله‌ی زیر خلاصه شود (Busto., et al 2006):



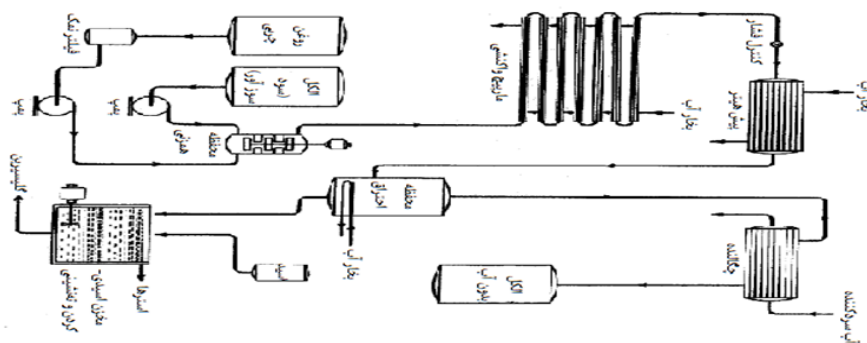
هریک از این واکنش‌ها با ثابت سرعت واکنش (k_n) متفاوتی در هر دو مسیر رفت و برگشت پیشروی می‌کنند. همه‌ی واکنش‌ها بعنوان واکنش‌های مرتبه‌ی دوم یا مرتبه‌ی دوم کاذب شناخته می‌شوند (Freedman., et al 1986). اولین واکنش در مقایسه با واکنش دوم یا سوم با سرعت آرام تری پیش می‌رود. دلیل این امر شکل‌گیری دی‌گلیسیرید و محدودیت‌های انتقال جرمی است که با انحلال‌ناپذیر بودن ترکیب روغن والکل تحمیل می‌شود (Darnoco and Cheryan, 2000, Vicente., et al 2006, Vicente., et al 2005).

واکنش دوم سریع‌ترین رژیم واکنشی را دارد زیرا متیل‌استرهای تولید شده در مرحله‌ی اول نقش کمک حلالی را ایفا کرده و باعث ایجاد فاز همگن می‌شوند که با همگن‌سازی فازی میزان برخورد بین مولکول‌های

متانول و روغن افزایش یافته و سرعت واکنش بالا می‌رود (Vicente., et al 2005). بر خلاف دو مرحله‌ی اول، واکنش سوم بدلیل مقادیر کم مواد واکنش دهنده تمایل به پیشروی در جهت برگشت را دارد (Chiu, 2005).

آلن (Allen, 1945) تغییراتی در فرآیند برادشاو داد تا اینکه تجهیزات مورد نیاز واکنش با یک فرآیند جریان پیوسته ساده‌تر گردد. او دمای واکنش را در محدوده‌ی ۱۶۰ - ۸۰ درجه سانتیگراد تحت فشار کافی بالا برد تا اینکه الکل را در فاز مایع نگه دارد. آلن خاطر نشان کرد که هر دو نوع کاتالیزور اسیدی و بازی می‌توان استفاده نمود. کاتالیزور اسیدی برای مواد خام با سطوح بالای اسیدهای چرب، زمانی که اسیدهای چرب بایستی طی فرآیندی استری گردند، مناسب‌تر می‌باشد. در دماهای بالاتر زمان واکنش، تا ۳ - ۴ دقیقه در دمای ۱۳۵ درجه سانتیگراد با یک کاتالیزور بازی و تا ۴۵ دقیقه با یک کاتالیزور اسیدی، کاهش می‌یابد. وی همچنین سیستمی برای ترانس استریفیکاسیون پیشنهاد کرد که دارای یک راکتور جریان شاخه‌ای (PFR: Plug flow reactor) جهت تامین زمان مورد نیاز برای کامل شدن واکنش بود.

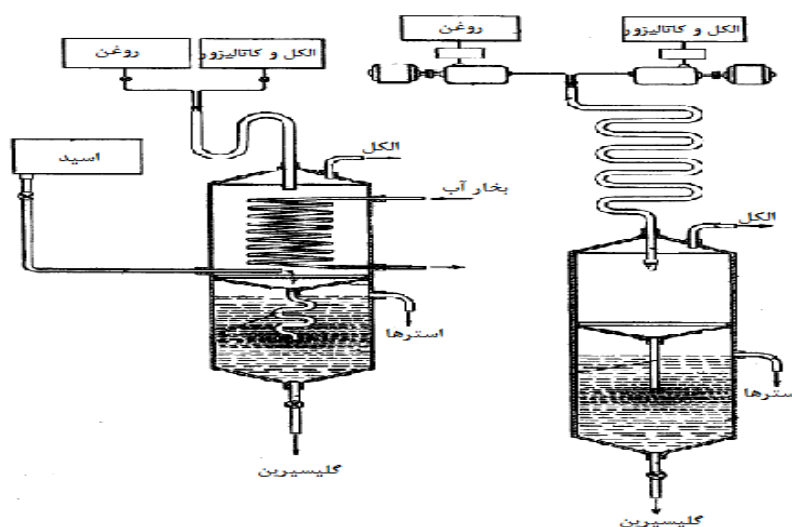
ترنت (Trent, 1945) عنوان کرد که تمایل به استفاده از الکل اضافی برای به خدمت گرفتن آن بعنوان کمک حلال، از جداسازی استر و گلیسرین جلوگیری می‌کند. وی تجهیزاتی برای حذف الکل و جداسازی گلیسرین و استرها در یک وسیله‌ی واحد فراهم کرد. این سیستم دو نوع بود. در سیستم نوع اول روغن و الکل و کاتالیزور باهم مخلوط شده و از میان یک مارپیچ (coil) با طول کافی عبور داده می‌شدند تا اینکه به واکنش اجازه‌ی کامل شدن قبل از ورود به اتاقکی که با یک مارپیچ بخار (steam coil) حرارت داده می‌شد، داده شود. همه‌ی فرآیند در فشار اتمسفر یا فشار نزدیک به فشار اتمسفر انجام می‌شد. دمای اتاقک به اندازه‌ی کافی بالا بود تا اینکه الکل بتواند بجوشد و مخلوط استرها و گلیسرین را ترک کند. سپس اسید جهت خنثی سازی مخلوط اضافه می‌شد و بعد مخلوط استر-گلیسرین از میان یک لوله‌ای داخل نیمه‌ی پایینی اتاقک عبور داده می‌شد. استرها از بالای اتاقک پایینی و گلیسرین از پایین آن خارج می‌شد. نوع دوم مشابه نوع اول بود به استثنای اینکه در دما و فشار بالاتری هدایت می‌شد و به جای اینکه مارپیچ بخار جهت جوشاندن الکل به کار رود، مخلوط فشرده شده به داخل نیمه‌ی بالایی یک ظرف که بعنوان اتاقک احتراق عمل می‌کرد، تزریق می‌شد.



شکل ۱-۲: فرآیند جریان‌ی آلن

الکل تبخیر شده و خارج سازی می‌شد و استر-گلیسرین وارد نیمه‌ی پایینی ظرف می‌شد تا آنجا با ابزارهای دیگری جداسازی شوند. وی اشاره نمود که استرهای تولید شده با الکل‌های بالاتر (اتانول و بالاتر از آن)، تمایل زیادی به ژله‌ای شدن ناشی از تشکیل صابون، نسبت به متانول دارند و ادعا کرد که اگر فرآیند به طریقی باشد که به جای اینکه ابتدا حرارت‌دهی صورت گیرد و بعد اختلاط، واکنش دهنده‌ها ابتدا به صورت سرد مخلوط شوند و سپس حرارت داده شوند، محصولات بهتری را می‌توان بدست آورد. وی همچنین گفت که دما، صابونی شدن واکنش را افزایش می‌دهد و استفاده از افزایش مرحله‌ای دما از ۴۵ - ۴۰ تا ۱۲۳ - ۱۱۰ درجه سانتیگراد را توصیه نمود. ترنت گفت که، علاوه بر آبشویی، استخراج یک فرآیند مایع در مایع می‌تواند با استفاده از حلالی که بطور خیلی جزئی در استرها نامحلول است، صورت گیرد. وی بطور خاص برخی حلال‌های قطبی را پیشنهاد کرد.

مرسوم‌ترین روش تولید بیودیزل فرآیند بچ در دمای نزدیک به دمای نقطه‌ی جوش الکل می‌باشد. نسبت مولاریته‌ی الکل به روغن ۶ به ۱ می‌باشد و کاتالیزور مورد استفاده NaOH یا KOH در غلظتی مابین ۰/۱ تا ۱ درصد وزنی روغن می‌باشد. ولی برای تولید تجاری بیودیزل، فرآیندهای پیوسته می‌توانند هزینه‌ی پایین‌تر تولید را فراهم نموده و محصول با کیفیت یکنواخت‌تر از فرآیند بچ را تولید نمایند (Ma and Hanna, 1999, Srivastava and Prasad, 2000, Nouredini., et al 1998, Darnoco and Cheryan, 2000).



شکل ۲-۲: دستگاه مرکب واکنش - جداساز گلیسرین ترنت

فاکتورهای مهمی که بر سینتیک واکنش اثر می‌گذارند شامل:

(۱) مقدار و نوع کاتالیزور، که از لحاظ تنوع می‌تواند کاتالیزورهای همگن بازی مانند هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم و یا کاتالیزورهای همگن اسیدی مانند اسید سولفوریک و اسید فسفریک باشند. همچنین کاتالیزورهای غیرهمگن که انواع مختلفی از کاتالیزورها را می‌توانند شامل شوند و نیز کاتالیزورهای آنزیمی که در تحقیقات صورت پذیرفته آنزیم لیپاز بهترین آنزیم برای تولید بیودیزل پیشنهاد شده‌است، می‌توانند در فرآیند تولید استفاده شوند (Vicente., et al 2004, Canakci and Van Gerpen, 1999,)

Shimada., *et al* 1999, Uosukainen., *et al* 1999, Gryglewicz, 1999, Sivasamy., *et al* (2009).

(۲) نسبت مولاریته الکل به تری گلیسیرید

(۳) نوع الکل

(۴) دمای واکنش

(۵) محتوای اسیدهای چرب آزاد در ماده‌ی خام

(۶) محتوای آب ماده‌ی خام اولیه

(۷) شدت همزنی (Ma and Hanna 1999, Fukuda., *et al* 2001, Stamenkovic., *et al* 2005)

(۸) نوع روغن استفاده شده (Marchetti., *et al* 2007)

(۹) زمان واکنش (Ma and Hanna, 1999).

اخیراً سیستم‌های کاتالیزوری آنزیمی (ترجیحاً لیپاز) در مقایسه با سیستم‌های کاتالیزوری شیمیایی، بدلیل داشتن مشخصه‌هایی نظیر: شرایط عملیاتی معتدل‌تر، نسبت پایین مولاریته‌ی الکل به روغن مورد نیاز، سازگاری بیشتر با محیط زیست، بازیافت آسان از محصول، تبدیل کامل اسیدهای چرب آزاد موجود در مواد خام به آلکیل استر (بیودیزل) (Sivasamy., *et al* 2009)، عدم تولید واکنش‌های جانبی در فرایند واکنش (Iso., *et al* 2001, Athawale., *et al* 2000, Shimada., *et al* 1999)، و به‌گزینی بالای محصول در هر دو سیستم آبدار و بدون آب (Fukuda., *et al* 2000)، در فرآیندهای تولید بیودیزل توجه زیادی را به خود جلب کرده‌است. با این حال استفاده از کاتالیزور لیپاز دارای مشکلاتی نیز هست که: غیر فعال شدن آسان کاتالیزور، سرعت پایین واکنش، تبدیل کمتر واکنش‌دهنده‌ها به محصول (Sivasamy., *et al* 2009)، نیاز به یک فرآیند سه مرحله‌ای برای نیل به ۹۵٪ تبدیل، و قیمت بالای لیپاز برای استفاده در مقیاس تجاری (Watanabe., *et al* 2000)، قابل اشاره می‌باشند. تکنولوژی‌های جدیدی که برای تیمار مواد خام با محتوای بالای اسید چرب آزاد وجود دارند مواردی به شرح زیر است:

- استریفیکاسیون-ترانس استریفیکاسیون: در این روش، ترکیبی از کاتالیزورهای اسیدی و بازی غیرهمگن برای تیمار و پیش تیمار همزمان استفاده می‌شود (Demirbas, 2009).
- هیدرولیز-استریفیکاسیون: در این روش ابتدا تری گلیسیرید به اسیدهای چرب مربوطه‌اش هیدرولیز می‌شود و بدنبال آن اسیدهای چرب آزاد بصورت گزینشی به الکیل استرها استری می‌شوند (Lima., *et al* 2008).

از میان سایر روش‌هایی که می‌توانند برای غلبه بر محدودیت‌های انتقال جرم در ترانس استریفیکاسیون مفید باشند، می‌توان روش ترانس استریفیکاسیون با استفاده از واسطه‌های حلال را نام برد. این روش‌ها می-

تواند به دو صورت عمده‌ی استفاده از محلول‌های یونی و استفاده از الکل‌های فوق بحرانی (اغلب استفاده از متانول فوق بحرانی، SCM (Fortes., et al 1999)) باشد (Sivasamy., et al 2009). این واکنش‌ها اغلب در سیستم‌های بدون کاتالیزوری انجام می‌شوند (Van Gerpen., et al 2002-2004). روش SCM که توجه زیادی را به خود جلب کرده‌است، تحت شرایط سخت انجام می‌گیرد بطوریکه که دما و فشار عملیاتی بترتیب $350-400^{\circ}\text{C}$ و $30-40\text{ Mpa}$ می‌باشند (Fortes., et al 1999). استفاده از روش SCM منافع زیادی از قبیل عدم ایجاد فازهای جدا در واکنش ترانس‌استریفیکاسیون (Sivasamy., et al 2009)، تولید بیودیزل حتی بدون استفاده از کاتالیزور (Fukuda., et al 2001, Kusdiana and Saka, 2004, Marchetti., et al 2007, Warabi., et al 2004, Kusdiana and Saka, 2001, Cao., et al 2005, Demirbas, 2006, Kusdiana and Saka, 2004, He., et al 2007, Bunyakiat., et al 2006, Warabi., et al 2004, Kusdiana and Saka, 2001, Saka and Kusdiana, 2001) نیاز به جداسازی کاتالیزور و فرآیند خالص‌سازی ساده‌تر، سرعت بسیار بالای واکنش و کاهش زمان واکنش به کمتر از چند دقیقه، قابلیت تحمل بالا به آب و اسید چرب آزاد، را دارد. ولی هزینه‌ی کل عملیات زیاد شده و انرژی بالایی مورد نیاز است. بعلاوه بالا بردن مقیاس تولید این روش بسیار سخت است (Sivasamy., et al 2009, Van Gerpen., et al 2002-2004).

بدلیل هزینه‌ی نسبتاً بالای تولید بیودیزل، اقتصادی‌سازی فرآیند یک هدف مهم در تولید بیودیزل می‌باشد. بنابراین مطالعات زیادی با تمرکز بر سینتیک متانولیز به منظور دستیابی به بهترین طرح راکتور انجام شده‌است (Reyes., et al 2010). به منظور دستیابی به این هدف فاکتورهای مهمی که در طراحی راکتور موثرند شامل اندازه‌ی راکتور (ابعاد راکتور)، مواد سازنده‌ی راکتور، سیستم همزنی، مطالعات هیدرودینامیکی، ویژگی‌های فیزیکی واکنش‌دهنده‌ها، و روش فراهم‌سازی یا حذف حرارت، بایستی مورد توجه قرار گیرند (Azhari., et al 2008, Harriott, 2003). هدف این مطالعه مقایسه و ارزیابی راکتورهای مختلفی است که در حال حاضر برای تولید بیودیزل با تمرکز بر فاکتورهای کلیدی است که بر عملکرد راکتور تاثیر می‌گذارد. این فاکتورها شامل: انتقال جرم، دمای عملیاتی، توزیع زمان واکنش، زمان واکنش، به‌گزینی تولید محصول، و هزینه‌ی تولید می‌باشند.

۲-۲- فاکتورهای مهم در طراحی راکتور برای تولید بیودیزل

۲-۲-۱- انتقال جرم (همزنی)

آگاهی از موثر بودن شدت اختلاط روی سرعت واکنش به دهه‌ی هشتاد میلادی بر می‌گردد (Freedman., et al 1984). همزنی بدلیل اهمیت ویژه‌ی درجه‌ی اختلاط بین الکل و تری‌گلیسرید فاکتور بسیار موثری در فرآیند تولید بیودیزل محسوب می‌شود (Noureddini., et al 1998). همزنی برای افزایش برخورد بین مولکولهای الکل و روغن که در یکدیگر نامحلول بوده و یک فاز غیرهمگن تشکیل می‌دهند، بکار می‌رود. انتقال جرم از فاز روغن به فاز الکل-روغن می‌تواند یک مرحله‌ی بحرانی و حساس در محدود نمودن سرعت واکنش الکلیز باشد. انتقال جرم کم بین دو فاز در مراحل اولیه‌ی واکنش موجب

سرعت پایین واکنش می‌شود (Noureddini and Zhu, 1997). به اضافه‌ی اینکه انحلال پذیری کم الکل و روغن سرعت واکنش را در کلیه‌ی مراحل ترانس‌استریفیکاسیون محدود می‌سازد (Boocock., *et al* 1996). مطالعات روی ترانس‌استریفیکاسیون روغن سویا، بحرانی بودن فاکتور سرعت همزنی را در سینتیک واکنش ثابت کرد. بطوریکه سرعت بالاتر همزنی موجب درصد تبدیل بالاتر و زمان واکنش پایینتر می‌شود (Alcantara., *et al* 2000, Noureddini., *et al* 2004).

همزن‌های مختلفی که تا به حال جهت بهبود محصول بیودیزل و کاهش زمان واکنش استفاده شده‌اند شامل: همزن‌های مکانیکی (Noureddini and Zhu, 1997, Freedman., *et al* 1984)، همزن‌های مغناطیسی (Darnoco and Cheryan, 2000, Mittelbach and Trathnigg, 1990, Komers., *et al* 2002)، توربین‌ها (Ma., *et al* 1999)، دو همزن استاتیکی و یک همزن با برش بالا (Noureddini., *et al* 1998)، همزن لنگری (Alcantara., *et al* 2000)، توربین روشتون (Von Blottnitz., *et al* 2004)، همزن هلیسی (Vicente., *et al* 2005)، دو پدال با تیغه‌های مسطح (Olivera., *et al* 2007)، می‌باشند. میکسرهای استاتیکی که اغلب در تولید بیودیزل استفاده می‌شوند می‌توانند بعنوان یک سیستم راکتور مستقل استفاده شوند (Thompson, 2007). بخاطر تاثیر موثر همزنی در متانولیز، انواع جدید همزن‌ها نظیر میکسرهای با برش بالا، جریان تناوبی، آلتراسونیک، و همزن‌های هیدرولیکی ساخته شده‌اند. نرخ تولید بیودیزل در راکتور، به مقدار زیادی بستگی به درجه‌ی توربولانس دارد (Reyes., *et al* 2010, Harvey and Mackley, 2002, Stavarache., *et al* 2005). اکثر محققان در زمینه‌ی اختلاط بر روی نوع همزن‌های مکانیکی تمرکز داشته‌اند. به هر حال اطلاعات کاملی درباره‌ی تاثیر اختلاط روی واکنش ترانس-استریفیکاسیون وجود ندارد. فهم صحیح تاثیر اختلاط روی فرایند واکنش یک فاکتور کلیدی در بالا بردن مقیاس تولید و طراحی می‌باشد (Noureddini., *et al* 1998). نورالدینی و همکاران در سال ۱۹۹۸ (Noureddini., *et al* 1998) تاثیر همزن‌های با برش بالا و بی‌حرکت برای ترانس‌استریفیکاسیون تری-گلیسیرید به متیل‌استر را در یک فرآیند پیوسته با بکارگیری یک همزن با برش بالا و دو همزن بی‌حرکت به اضافه‌ی یک لوله برای افزایش زمان ماندگاری مواد واکنش‌دهنده داخل راکتور، در مقیاس آزمایشی کارخانه-ای مورد بررسی قرار دادند. آنها آزمایشات را بر پایه‌ی بررسی تاثیر بکارگیری هر دو همزن و نیز کاربرد انفرادی هر یک از همزن‌ها انجام دادند. سرعت همزنی بهینه هنگام استفاده از هر دو نوع همزن ۱۰۰۰ rpm بود. نتایج آزمایشات آنها نشان داد که همزن بی‌حرکت موثرتر از همزن با برش بالا بود. با این وجود هر دو همزن توانستند اختلاط مناسبی را برای تبدیل مواد خام فراهم سازند. گزارشات آنها حاکی از این بود که حداقل یک همزن می‌تواند محصول با درصد خلوص بیش از ۹۷٪ را تولید نماید. در فرآیند نورالدینی دبی جریان تاثیر معنی‌داری روی میزان کل تبدیل نداشت. هاروی و ماکلی در سال ۲۰۰۲ (Harvey and Mackley, 2002) عملکرد راکتور جریان تناوبی در تولید بیودیزل را با استفاده از روغن منداب، مورد بررسی قرار دادند. اظهارات آنها حکایت از این داشت که عملکرد این نوع راکتور معادل ۸۰ راکتور مخزنی همزن‌دار جریان پیوسته بود که بصورت سری قرار گرفته باشند. این نوع راکتور بیودیزل قابل فروش را بعد از ۳۰-۱۵ دقیقه واکنش تولید نمود. راکتورهای با درجه‌ی اختلاط بالا بدلیل شرایط سخت عملیاتی و کنترلی و نیاز به تجهیزات اضافی، شکل پیچیده‌ای نسبت به راکتورهای مرسوم با درجه‌ی اختلاط پایین دارند.