

طراحی، ساخت و آزمایش دستگاه فرآوری بیودیزل تمام اتوماتیک برای تولید سوخت بیودیزل استاندارد

بهمن نجفی^۱

دانشگاه محقق اردبیلی، گروه مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی
Najafib@uma.ac.ir

چکیده

استفاده از منابع انرژی غیر نفتی امروزه در بسیاری از کشورهای جهان مورد بررسی جدی قرار دارد و در جمهوری اسلامی ایران نیز در سیاست‌گذاری بخش انرژی مطالعه و امکان‌سنجی استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و سوخت‌های غیر فسیلی توصیه و تشویق شده است. جانشینی سوخت‌های گیاهی (Biofuels) بجای سوخت‌های مایع نفتی در دو گروه جداگانه رسیدگی می‌شود. گروه نخست سوخت‌های نوین جانشین بنزین مانند سوخت‌های الکلی و گروه دیگر، سوخت جایگزین گازوئیل یعنی بیودیزل می‌باشند که بصورت خالص یا مخلوط با گازوئیل در موتورهای اشتعال تراکمی (CI) بکار می‌روند. بیودیزل استرهای متیل اسید چرب می‌باشد که از منابع طبیعی تجدیدپذیر مانند روغن‌های گیاهی یا چربی‌های حیوانی تهیه می‌شود و استفاده از آن در موتورهای دیزل می‌تواند نقشی اساسی در جهت کاهش مصرف سوخت فسیلی و در نتیجه کاهش آلاینده‌ها ایفا کند. همچنین این سوخت به دلیل ساختار شیمیایی خود شرایط احتراق را بهبود داده و به عنوان سوخت جایگزین پاک محسوب می‌شود. جانشینی سوخت بیودیزل بجای گازوئیل، تنها در صورتی قابل قبول است که خصوصیات ترمودینامیکی، فیزیکی و شیمیایی آن در حد استاندارد جهانی ASTM باشد و این مهم در صورتی میسر است که سوخت در طی یک فرآیندی استاندارد تولید شود. در این طرح تحقیقاتی دستگاه تمام اتوماتیکی برای فرآوری سوخت بیودیزل از روغن‌های پسماند رستوران بر اساس شرایط بهینه پارامترهای موثر بر تولید سوخت (مانند دمای راکتور، فشار راکتور، شدت هم‌زدن مخلوط، عدد رینولدز مخلوط، نسبت مولارینه عناصر واکنش‌دهنده، مقدار کاتالیزور و PH محصول) طراحی و ساخته شد که بطور کاملاً اتوماتیک، تمامی مراحل تولید سوخت بیودیزل را انجام می‌دهد. نتایج اندازه‌گیری خواص ترموفیزیکی سوخت بیودیزل تولید شده با دستگاه جدید، نشان از تطابق کامل آن با استاندارد ASTM دارد.

واژه‌های کلیدی: سوخت‌های جایگزین - تولید سوخت بیودیزل استاندارد - دستگاه فرآوری تمام اتوماتیک

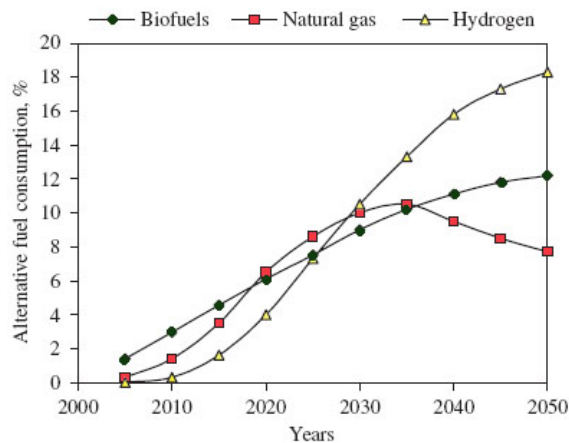
۱- مقدمه

امروزه موتورهای دیزل به عنوان یکی از اصلی‌ترین مصرف‌کننده‌های سوخت فسیلی بوده و در نتیجه یکی از عوامل مهم ایجادکننده آلودگی نیز بشمار می‌آیند. به نظر می‌رسد استفاده از سوخت‌های بیولوژیک (سوخت جایگزین پاک) در این موتورها می‌تواند نقشی اساسی در جهت کاهش مصرف سوخت فسیلی و در نتیجه کاهش آلاینده‌ها ایفا کند. سوخت‌های بیولوژیک به دلیل ساختار شیمیایی خود به عنوان سوخت جایگزین پاک، قابلیت استفاده در موتور دیزل را دارد. جهت استفاده از این سوخت‌ها در موتور دیزل، متناسب با نوع سوخت می‌بایست تغییرات و تمهیدات خاصی روی موتور انجام گیرد. از جمله مهمترین سوخت‌های جایگزین بیولوژیک می‌توان به بیودیزل اشاره کرد.

۱- استادیار، دانشگاه محقق اردبیلی

بیودیزل عبارت است از استرهای منوالکیل (Monoalkyl Esters) اسیدهای چرب با زنجیر طویل، که از منابع طبیعی تجدیدپذیر مانند روغن‌های گیاهی یا چربی‌های حیوانی تهیه می‌شوند و دارای فرمول شیمیایی کلی $3C_{19}H_{35}COOCH_3$ می‌باشد. به منظور بکارگیری مستقیم این ترکیبات به عنوان منبع انرژی در موتورهای احتراق داخلی و دارا بودن شرایط احتراق مناسب، لازم است تا ساختار ملکولی این ترکیبات به اجزاء ساده‌تری شکسته شده و متعادل گردد، بدین منظور ملکول‌های ترکیبات روغن یا چربی در یک واکنش تبدیل موسوم به ترنس‌استریفیکاسیون (Transesterification) با یک الکل مانند متانول یا اتانول، در حضور یک کاتالیزور اسیدی یا قلیایی شرکت کرده و OH الکل مورد استفاده، جایگزین زنجیره هیدروکربنی موجود در روغن می‌شود و در نتیجه استرهایی با ساختمان ملکولی جدید به نام استرهای متیل اسید چرب بوجود می‌آید که تشابه زیادی با گازوئیل شماره ۲ دارد. مهمترین تفاوت اساسی بیودیزل و گازوئیل، محتوای اکسیژن آن می‌باشد. میزان اکسیژن موجود در گازوئیل صفر است در حالیکه بیودیزل حاوی ۱۰ تا ۱۲ درصد وزنی اکسیژن می‌باشد که باعث کاهش چگالی انرژی و انتشار ذرات معلق می‌گردد. به علاوه بیودیزل عاری از گوگرد می‌باشد در حالیکه در گازوئیل گوگرد وجود دارد که در سیستم آگزوز موتور به اکسیدهای گوگرد تبدیل می‌گردد. گازوئیل معمولاً ۲۰ تا ۴۰ درصد حجمی آروماتیک دارد که باعث افزایش انتشار آلاینده‌هایی نظیر Smog و ذرات معلق می‌گردد در صورتیکه بیودیزل اساساً عاری از آروماتیک می‌باشد. بطور کلی این سوخت در مقایسه با گازوئیلی که جایگزینش می‌شود، سوختی پاک به حساب می‌آید.

تولید سوخت بیودیزل به سال ۱۸۵۳ میلادی بر می‌گردد و موضوع استفاده از آن در موتورهای احتراق داخلی به رادولف دیزل در ۱۰ اگوست ۱۸۹۳ میلادی، ولی تحقیقات علمی در مورد بیودیزل از اواخر دهه ۷۰ و اوایل دهه ۸۰ میلادی در آمریکا و اروپا، با هدف تولید جهت عرضه به بازار شروع شد. در سال ۱۹۸۸ میلادی اولین محصول مستند تجاری بیودیزل از دانه کلزا ارائه گردید و نام بیودیزل اولین بار در آمریکا در سال ۱۹۹۲ میلادی بوسیله موسسه تحقیقات ملی بیودیزل به این محصول نهاده شد. اخیراً، تحقیقات متعددی جهت تولید بیودیزل از روغن‌های خوراکی مانند: روغن آفتاب‌گردان [۱ و ۲]، روغن سویا [۳-۶]، روغن گرچک [۷] و از روغن‌های غیرخوراکی مانند: روغن تنباکو [۸]، روغن ماهویا [۹]، روغن تونگ [۱۰]، روغن کاملینا [۱۱]، روغن دانه کتان [۱۲] و از روغن‌های پسماند رستوران [۱۳] انجام گرفته است. در رآکتورهای ساخته شده، برای تولید بیودیزل عمدتاً از روش ترنس‌استریفیکاسیون استفاده شده و در بعضی موارد، کارهایی جهت بهینه‌سازی تولید بیودیزل نیز انجام گرفته است که نشان دهنده روند توسعه دانش فنی تولید بیودیزل در سطح جهان می‌باشد [۱۴، ۱۵].



شکل ۱- پیش‌بینی مصرف سوخت‌های جایگزین تا سال ۲۰۵۰ میلادی

امروزه در بیش از ۲۱ کشور دنیا، بیودیزل تولید و مصرف می‌شود. برای مثال در آلمان سالیانه حدود یک میلیون تن بیودیزل در ۲۰ کارخانه تولید می‌شود و در ۱۶۰۰ جایگاه عرضه می‌شود. در اتریش اولین تولید بیودیزل در سال ۱۹۹۱ میلادی با ظرفیت ۵۰۰ تن در سال آغاز گردید و هم اکنون به ظرفیت ۱۰۰۰۰ تن در سال رسیده است. در حال حاضر بزرگترین کارخانه ساخت بیودیزل در شهر روتن فرانسه با ظرفیت تولید ۱۲۰۰۰۰ تن در سال مشغول به کار است. کمیسیون کتاب سفید اروپا در نوامبر ۱۹۹۷ میلادی به منظور برآورد مسائل جهانی، اختصاص ۱۲٪ از کل انرژی مصرفی را تا سال ۲۰۱۰ میلادی به انرژی‌های تجدیدپذیر پیشنهاد داد. طبق پیش بینی به عمل آمده، مقدار مصرف سوخت‌های جایگزین در دنیا، تا سال ۲۰۵۰ میلادی ۱۸٪ هیدروژن، ۱۲٪ سوخت‌های بیولوژیک و ۸٪ گاز طبیعی خواهد بود. در حال حاضر، در اروپا بیودیزل از روغن‌های حاصل از محصولات کشاورزی تولید و به صورت گسترده‌ای در انواع خودروهای دیزل استفاده می‌گردد ولی در آمریکا پیدا کردن منابع تولید بیودیزل، کار ساده‌ای نیست. در موسسه Biodiesel Pacific در هاوایی، بیودیزل از بازیافت روغن‌های خوراکی مصرف‌شده، تولید و در ادوات دیزل، خودروها و کشتی‌ها استفاده می‌گردد [۱۶].

در ایران نیز تولید سوخت بیودیزل از منابع آلی مانند روغن‌های گیاهی، در سطح آزمایشگاهی شروع شده است و دستگاه‌هایی نیز جهت تولید این نوع سوخت، طراحی و ساخته شده است ولی دستگاه‌های ساخته شده در اشل آزمایشگاهی بوده و نمونه اولیه می‌باشد و محصول بیودیزل تولید شده توسط این دستگاه‌ها دارای شرایط استاندارد نمی‌باشد. با توجه به اینکه استفاده از سوخت بیودیزل در موتورهای اشتعال تراکمی، تنها در صورت استاندارد بودن خصوصیات ترمودینامیکی، فیزیکی و شیمیایی آن قابل توجه است و این مهم در صورتی میسر است که سوخت بیودیزل تولیدشده بر اساس پارامترهای موثر بر فرآیند تولید سوخت بیودیزل (مانند: دمای واکنش، نوع الکل، نسبت الکل به روغن، نوع کاتالیزور، مقدار کاتالیزور و شدت بهم زدن) انجام گیرد لذا این تحقیق تلاشی است در راستای طراحی و ساخت دستگاه تمام اتوماتیک فرآوری سوخت بیودیزل با هدف تولید بهینه و استاندارد آن.

۲- مواد و روشها

۲-۱- روش تولید سوخت بیودیزل

طراحی و ساخت دستگاه فرآوری تولید بیودیزل، نیازمند به داشتن اطلاعات دقیق تجربی از مراحل مختلف فرآیند تولید سوخت می‌باشد که در طی تحقیقات قبلی بدست آمده است. مراحل تولید بیودیزل از روغن پسماند رستوران را پس از تصفیه روغن (جدا سازی مواد اضافی جامد از روغن با استفاده از فیلتر) و جدا کردن آب داخل آن (حررات دادن روغن تا دمای 60°C به مدت ۱۵ دقیقه و سپری شدن ۲۴ ساعت)، می‌توان بصورت زیر خلاصه کرد:

- ۱- اندازه‌گیری روغن پسماند: اندازه‌گیری ۲۰ لیتر روغن پسماند و گرم کردن آن تا دمای 80°C در راکتور اصلی
- ۲- اندازه‌گیری الکل اتانول: الکل مورد نیاز برای واکنش ترانس‌استریفیکاسیون به نسبت مولی ۶ به ۱ معادل ۶/۷ لیتر در نظر گرفته می‌شود. معادل ۱ درصد وزنی روغن پسماند، برابر ۲۰۰ گرم کاتالیزور (KOH) به الکل اضافه شد و جهت انحلال کامل کاتالیزور، دما تا 80°C افزایش یافت، در این حالت یون متوکسیدپتاسیم برای انجام فرآیند ترانس‌استریفیکاسیون آماده می‌گردد.
- ۳- مخلوط کردن دو ماده: در این مرحله محلول الکل و هیدروکسیدسدیم (متوکسیدپتاسیم) به روغن پسماند اضافه شد، دمای فرآیند 80°C ثابت نگه‌داشته شد. به علت اینکه مخلوط دو ماده حالت سوسپانسیون دارد، لذا جهت اختلاط و انجام واکنش، مخلوط به مدت ۹۰ دقیقه و با شدتی که عدد رینولدز داخل راکتور تقریباً برابر عدد ۶۵۰۰ بود، بطور یکنواخت بهم زده می‌شود تا توزیع الکل و کاتالیزور در تمامی قسمت‌های روغن یکنواخت‌شده و واکنش ترانس‌استریفیکاسیون تکمیل گردد. در این

مرحله مخلوط به دست آمده در یک بازه زمانی کوتاه به سرعت به رنگ تیره در آمده و سپس به رنگ قرمز کم رنگ تبدیل شد. در این مرحله واکنش ترانس استریفیکاسیون تا حد ۹۸ درصد پیشرفت می کند و اگر برهم زنی مخلوط یکنواخت صورت نگیرد، امکان مومی شدن مخلوط وجود دارد.

۴- کاهش دمای مخلوط تا دمای محیط: پس از تکمیل واکنش، ظرف محتوی مواد واکنش، به مدت ۸ ساعت در دمای محیط به صورت کاملاً ساکن قرار می گیرد تا دمای مخلوط تا حد دمای محیط (حدود 25°C) افت کند.

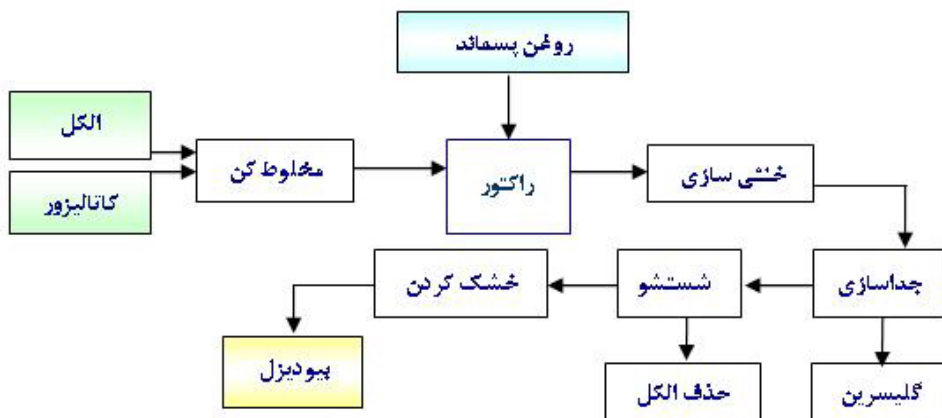
۵- خنثی سازی مخلوط: برای خنثی کردن بیودیزل خام تولید شده از اسید کلردیریک (NaCl) استفاده می شود.

۶- جداسازی فازهای تفکیک شده: بعد از گذشت ۳ ساعت، فازهای تفکیک شده از یکدیگر جدا می شوند فاز بالایی (به رنگ زرد) بیودیزل ناخالص، فاز وسطی (به رنگ صورتی) مربوط به گلیسرین که به صورت ذره های معلق بوده و فاز پایینی رسوب کلرید سدیم می باشد.

۷- عبور دادن استر ناخالص از صافی: بیودیزل تولید شده، هنوز حاوی برخی ناخالصی ها و ترکیبات مومی می باشد، لذا جهت حذف این مواد، صافی استفاده می شود. پس از این مرحله استر به دست آمده از شفافیت بالایی برخوردار می باشد.

۸- شستشودادن بیودیزل خام با آب: عملیات تصفیه سازی استر با کاغذ صافی بسیاری از ذرات معلق و ناخالصی های بزرگ موجود را حذف می کند، اما برای حذف گلیسرین و الکل و برخی ترکیبات دیگر، بایستی با آب (مقطر) شستشو داده شود. شستشوی استر با آب گرم با دمای 60°C صورت می گیرد. حجم آب استفاده شده معادل حجم بیودیزل موجود در ظرف می باشد. باید دقت کرد که آب باید به آرامی به بیودیزل خام و از بالا اضافه شود.

۹- جداسازی بیودیزل خالص: پس از شستشو، امولسیون تشکیل شده به مدت ۲ روز در دمای محیط به حال خود رها می شود پس از ۲ روز، سه فاز کاملاً مشخص در داخل ظرف شستشو، تشکیل می شود: بیودیزل که از سایر فازها سبکتر است در قسمت بالایی، مواد صابونی که به صورت اسفنج سفید رنگ تشکیل می شوند، در وسط ظرف و محلول آب و نمک باقیمانده به رنگ لیمویی در پایین ظرف ته نشین می گردند. هر چه مدت زمان تفکیک فازها بیشتر باشد کیفیت استر نهایی نیز بهتر می شود. در نهایت مرحله خشک کردن بیودیزل: که در این مرحله بیودیزی تولید شده در داخل آونی با دمای 50°C و به مدت ۳۰ دقیقه قرا می گیرد تا اندک آب موجود در آن تبخیر شده و رنگ آن کاملاً شفاف شود.



شکل ۲ - فرآیند تولید بیودیزل از روغن پسماند رستوران

۲-۲- طراحی و ساخت دستگاه تولید بیودیزل

دستگاه فرآوری تولید سوخت بیودیزل، به نحوی طراحی و ساخته می‌شود که مراحل فوق‌الذکر بصورت اتوماتیک در آن انجام گیرد. اجزای کلی دستگاه جدید فرآوری اتوماتیک تولید سوخت بیودیزل به صورت زیر طراحی و ساخته شد:

(۱) بدنه: بصورت قاب مکعبی متناسب با اندازه رآکتور و قسمت‌های جانبی دستگاه، به ابعاد $120 \times 60 \times 20$ cm از ورق آهنی به ضخامت $1/5$ mm ساخته شد و سپس رنگ کوره‌ای به آن زده شد تا در صورت تماس احتمالی با مواد خورنده، مقاوم باشد.

(۲) رآکتور اصلی: قسمت اصلی دستگاه می‌باشد که در آن فرآیند ترنس‌استریفیکاسیون انجام می‌گیرد. ابعاد رآکتور اصلی، متناسب با روغن پسماند روزانه رستوران دانشگاه (۲۰ لیتر در روز) می‌باشد، و با توجه به اینکه حجم رآکتور اصلی علاوه بر ۲۰ لیتر روغن پسماند، باید ظرفیت لازم برای الکل را نیز داشته باشد لذا حجم رآکتور اصلی ۳۰ لیتر طراحی شد. رآکتور اصلی، استوانه‌ای به قطر ۳۰ cm و به ارتفاع ۳۰ cm می‌باشد. بدنه رآکتور از پلکسی گلس به ضخامت ۵ mm بوده و به روش خمش حرارتی ساخته شده، و انتهای آن با استفاده از یک نوار پلکسی گلس باریک، با استفاده از چسب دوقلوی بی رنگ به هم متصل گردید. المنت حرارتی بر روی قسمت پایین رآکتور نصب می‌شود لذا این قسمت رآکتور، از ورق آهنی به ضخامت $1/5$ cm و به قطر ۳۲ cm ساخته شد. پس از برش و تراشکاری ورق آهنی، سوراخ‌های برای اتصال لوله‌های ورودی (یک ورودی برای روغن پسماند، الکل و آب) و خروجی (دو خروجی برای انتقال بیودیزل و آب به واحد شستشو) و اتصال الکتروموتور و المنت حرارتی و همچنین اتصال صفحه پایین رآکتور به بدنه، تعبیه شد. برای اتصال استوانه (پلکسی گلس) به صفحه پایین نیز، یک شیار حلقوی به قطر داخلی ۲۸ cm و قطر خارجی ۳۰ cm و به عمق ۱ cm بر روی صفحه پایینی ایجاد شد، سپس برای جلوگیری از خوردگی، صفحه آهنی با آلیاژی از نیکل- کروم آبکاری شد. برای قسمت بالای رآکتور نیز از صفحه مدور پلاستیکی به ضخامت $1/5$ cm و قطر ۳۲ cm استفاده شد که بر روی آن یک شیار حلقوی به قطر داخلی ۲۸ cm و قطر خارجی ۳۰ cm و به عمق ۱ cm ایجاد شده بود تا امکان نصب بر روی بدنه رآکتور اصلی را داشته باشد.

(۳) واحد تولید اتوکسید پتاسیم: در این واحد کاتالیزور پتاس (KOH) در دمای مشخصی در داخل الکل اتانول حل می‌شود تا یون اتوکسید پتاسیم تولید گردد. حجم مخزن با توجه به ظرفیت تولید سوخت بیودیزل (۲۰ لیتر در روز)، معادل ۲۰ لیتر انتخاب شد، لذا حجم این واحد، ۳۰ لیتر در نظر گرفته شد و مانند رآکتور اصلی جنس آن از پلکسی گلس به ضخامت ۵ mm و به شکل استوانه‌ای به قطر ۲۰ cm و به ارتفاع ۲۰ cm طراحی شد. قسمت پایینی این واحد نیز از ورق آهنی به ضخامت $1/5$ cm و به قطر ۲۲ cm می‌باشد که پس از برش و تراشکاری ورق آهنی، سوراخ‌های برای اتصال لوله‌های ورودی (ورودی الکل) و خروجی (خروجی اتوکسید تولید شده به رآکتور اصلی) و اتصال المنت حرارتی و همچنین سوراخ‌های اتصال به بدنه، تعبیه شد. برای اتصال استوانه (پلکسی گلس) به صفحه پایین نیز، یک شیار حلقوی به قطر داخلی ۲۰ cm و قطر خارجی ۲۰ cm و به عمق ۱ cm بر روی صفحه آهنی ایجاد شد و سپس برای جلوگیری از خوردگی، صفحه آهنی با آلیاژی از نیکل- کروم آبکاری شد. برای قسمت بالای رآکتور نیز از صفحه مدور پلاستیکی به ضخامت $1/5$ cm و قطر ۲۲ cm استفاده شد که بر روی آن یک شیار حلقوی به قطر داخلی ۱۸ cm و قطر خارجی ۲۰ cm و به عمق ۱ cm ایجاد شده بود تا امکان نصب بر روی بدنه واحد تولید اتوکسید پتاسیم را داشته باشد.

(۴) واحد شستشو: در این واحد مرحله شستشوی بیودیزل تولید شده، انجام می‌گیرد. با توجه به این که حجم آب مورد نیاز برای شستشو، باید دقیقاً برابر مواد موجود در رآکتور اصلی (بیودیزل و گلیسرین تولید شده) باشد لذا حجم واحد شستشو برابر ۶۰ لیتر محاسبه شد. این واحد نیز از جنس پلکسی گلس به ضخامت ۵ mm و به شکل استوانه‌ای به قطر ۳۰ cm و به ارتفاع ۱۰۰ cm ساخته شد. و قسمت پایین و بالای این واحد (بدلیل عدم وجود گرما) از صفحه مدور پلاستیکی به ضخامت $1/5$ cm و قطر ۳۲ cm استفاده گردید که بر روی آن یک شیار حلقوی به قطر داخلی ۲۸ cm و قطر خارجی ۳۰ cm و به عمق ۱ cm ایجاد شده بود تا امکان نصب بر روی بدنه واحد تولید اتوکسید پتاسیم را داشته باشد. بر روی صفحه پایینی سه عدد سوراخ برای

اتصال لوله‌های ورودی (یک ورودی بیودیزل خام و آب) و خروجی (دو خروجی برای آب کثیف و بیودیزل خالص) و همچنین اتصال به بدنه، تعبیه شد.

۵) سیستم گرم‌کننده راکتور اصلی: دمای راکتور اصلی برای انجام فرآیند ترنس‌استریفیکاسیون، برابر 80°C می‌باشد لذا لازم است تا مقدار ۲۰ لیتر روغن پسماند در داخل آن گرم شود، که با توجه به ظرفیت حرارتی روغن آفتابگردان، از یک المنت حرارتی به قدرت ۲۰۰۰ وات استفاده شد که بر روی صفحه آهنی پایینی نصب گردید.

۶) سیستم گرم‌کننده واحد تولید اتوکسید پتاسیم: با توجه به دمای انجام فرآیند ترنس‌استریفیکاسیون (80°C)، می‌بایست دمای الکل موجود در واحد تولید اتوکسید پتاسیم نیز برابر 80°C باشد لذا با توجه به ظرفیت حرارتی الکل، از یک المنت حرارتی به قدرت ۱۰۰۰ وات استفاده شد که بر روی صفحه آهنی پایینی نصب گردید.

۷) سیستم همزن راکتور اصلی: واکنش ترنس‌استریفیکاسیون زمانی انجام می‌گیرد که مخلوط متوکسید پتاسیم و روغن با شدت مناسبی (با شدتی که عدد رینولدز داخل راکتور تقریباً برابر عدد ۶۵۰۰ بود) تکان داده شود، برای این کار یک موتور الکتریکی DC استفاده گردید که به پشت صفحه آهنی راکتور اصلی، متصل گردید و جهت جلوگیری از نشست مواد داخل راکتور به بیرون، از یک کاسه نمد (26×8) ما بین محور الکتوموتور و صفحه آهنی استفاده گردید. قسمت همزن مکانیکی نیز از یک میله‌ای به قطر ۸mm و به طول ۳۰cm بود که بر روی آن پره‌ای فلزی ساخته و نصب شده بود. میله فلزی و پره‌های همزن باز آلیاژی از نیکل-کروم آبکاری گردید.

۸) سیستم همزن واحد تولید متواکسیدپتاسیم: علاوه بر افزایش دما، برای حل شدن کاتالیزور پتاس در الکل، نیاز به یک سیستم همزن می‌باشد، که در این طرح از سیستم اختلاط هیدرولیکی استفاده گردید، بدین صورت که جریان سیال از یکی از مجراهای تعبیه شده در روی صفحه آهنی پایینی مخزن، وارد یک الکتروپمپ شده و دوباره به کمک مجرای دیگر به داخل مخزن پمپاژ می‌شود.

۹) الکترو پمپ انتقال مواد: در مراحل مختلف کار دستگاه، برای انتقال مواد از دو عدد (یکی برای راکتور اصلی و دیگری در واحد تولید متوکسیدپتاسیم) پمپ الکتریکی مدل MR53-1-130 استفاده شد.

۱۰) شیرهای برقی: برای کنترل اتوماتیک جریان مواد در مراحل مختلف دستگاه، از یازده عدد شیر برقی (سولونوئیدی) مدل 2W-160-15 استفاده گردید.

۱۱) لوله‌ها و اتصالات: برای انتقال مواد شیمیایی به راکتور اصلی و مخازن دیگر، بدلیل خاصیت خوردگی که دارند، از لوله‌های پلاستیکی استفاده گردید.

۱۲) سیستم اندازه‌گیری و کنترل حجم: برای اندازه‌گیری و کنترل حجم ۳۰ لیتر روغن پسماند و ۱۰ لیتر الکل از دو عدد سنسور کنترل سطح مایع ساخت صانت الکترونیک استفاده گردید. این سنسور، دارای پرابی است که در داخل راکتور اصلی و در داخل واحد تولید متوکسید پتاسیم، نصب گردید. اصول کار این سیستم به نحوی است که اختلاف رسانایی الکتریکی را بین در داخل مایع می‌سنجد و در صورتی که با مقدار تعیین شده از قبل یکی باشد کلیدی را قطع یا وصل می‌کند لذا برای نصب پروبها در داخل مخزن (به نحی که با صفحه فلزی آن در تماس نباشد)، دو میله پلاستیکی به قطر ۳mm و به ارتفاع مخزن راکتور اصلی و ارتفاع مخزن تولید متوکسیدپتاسیم ساخته شد که قسمت پایینی آن (جایی که به صفحه آهنی متصل می‌شود) به قطر ۱۵mm بوده و بصورت رزوه دار ساخته شد. از داخل میله پلاستیکی سیمهای سنسور سطح عبور کرده و به دو جسم فلزی (از جنس مس و به شکل حلقه‌ای به قطر داخلی ۳mm و قطر خارجی ۱۵mm و به ضخامت ۵mm)، که یکی در قسمت پایین و دیگری در قسمت بالا میله پلاستیکی (جاییکه دقیقاً حجم سیال موجود به مقدار مورد نظر می‌رسید) نصب گردید. حساسیت سیستم اندازه‌گیری و محل جسم فلزی بالای سنسور، با کالیبراسیون دستگاه دقیقاً تعیین گردید.

۱۳) سیستم اندازه‌گیری و کنترل دما: برای اندازه‌گیری دما و کنترل آن در رآکتور اصلی و واحد تولید متوکسید پتاسیم از سیستم اندازه‌گیری ساخت آلتون الکتریک استفاده شد که دارای سنسور ترموکوپل برای اندازه‌گیری دما بود و دمای رآکتور را در مقدار از قبل تعیین شده‌ای ثابت نگه می‌داشت. یک انتهای پراپ اندازه‌گیری دما، به قطر ۱۵mm بوده و دارای رزوه بود که به صفحه آهنی زیر رآکتور اصلی و واحد تولید متوکسیدپتاسیم نصب گردید.

۱۴) سیستم اندازه‌گیری و کنترل دور الکتروموتور همزن: برای اندازه‌گیری دور الکتروموتور، از سنسور مغناطیسی ساخت Autonics مدل PR12-4-DP استفاده شد، سنسور مغناطیسی به هنگام عبور پیچی که بر روی محور انتهایی الکتروموتور نصب شده بود، یک پالس ایجاد می‌کرد که توسط سیستم پالسمتر Autonics مدل MP5W-4N اندازه‌گیری و نمایش داده می‌شد. برای کنترل دور الکتروموتور یک دیمر کاهنده، طراحی و ساخته شد که با استفاده از پتانسیومتر تعبیه شده بر روی آن دور الکتروموتور بطور دستی کنترل و تثبیت می‌شد.

۱۵) سیستم کنترل زمان: برای کنترل مراحل تولید سوخت (۳۰ دقیقه انجام واکنش در رآکتور اصل و انتقال سوخت بیودیزل خام به مخزن شستشو، ۸ ساعت زمان ماند در مخزن شستشو و انتقال آب به داخل یاکتور اصلی و گرم شدن آن تا دمای 50°C و انتقال آب گرم شده به مخزن شستشو)، از یک سیستم کنترل زمان قابل برنامه‌ریزی ساخت کارنوالکتریک استفاده شد.

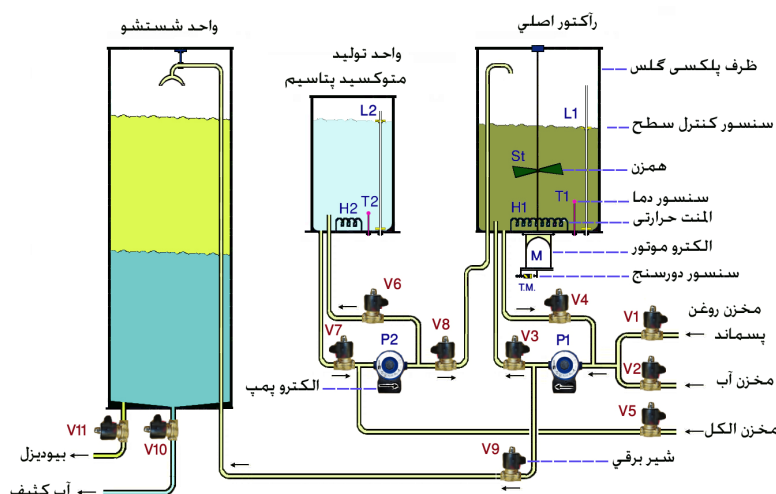


شکل ۴- دستگاه تمام اتوماتیک جدید برای تولید سوخت بیودیزل از روغن پسماند

۳-۲- مراحل کار دستگاه تولید بیودیزل

دستگاه فرآوری تولید بیودیزل قابلیت انجام اتوماتیک تمامی مراحل تولید سوخت بیودیزل را دارد، دستور کار دستگاه جدید، را می توان بصورت زیر خلاصه کرد:

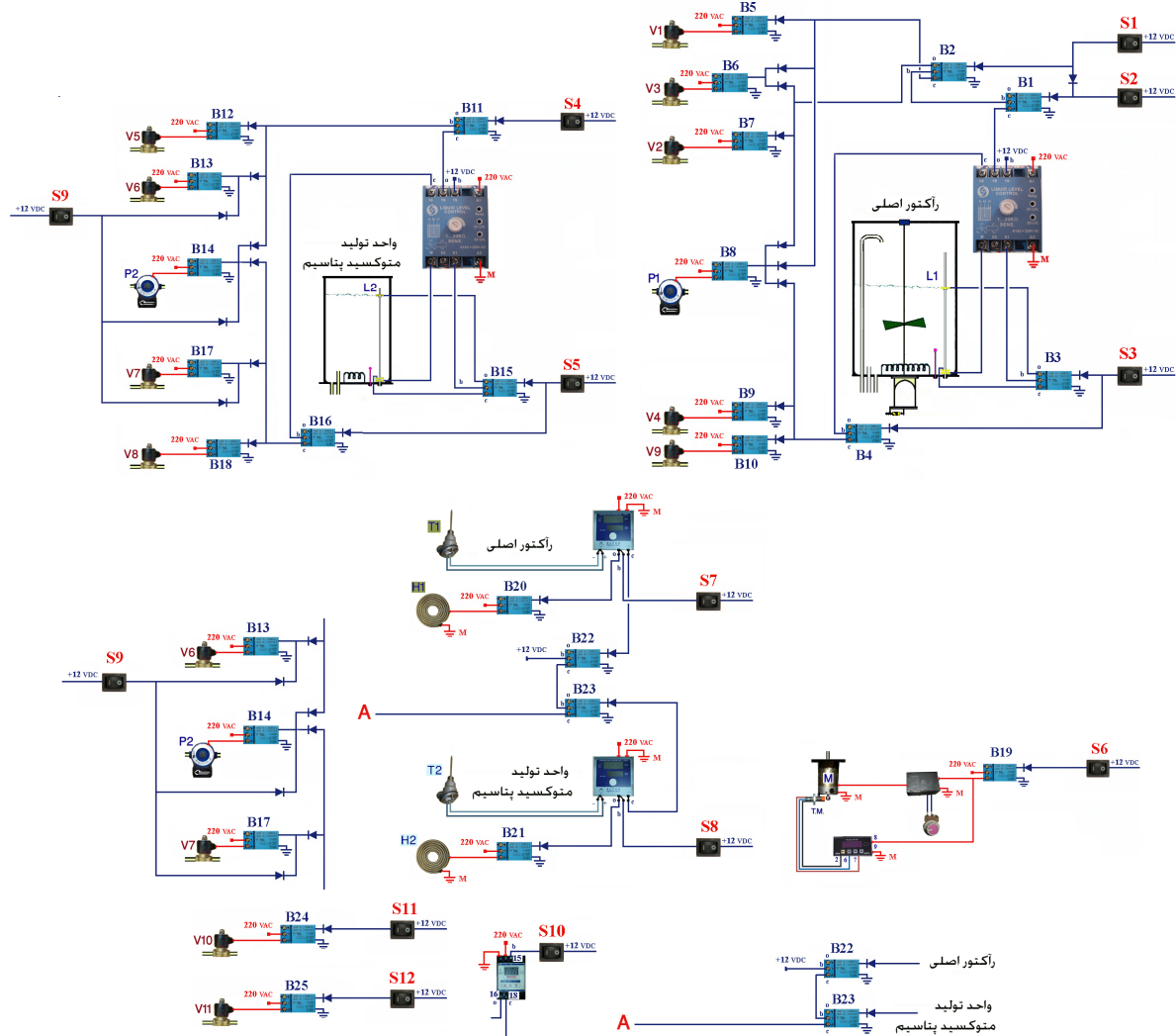
- ۱- انتقال روغن پسماند به راکتور اصلی از مسیر V1، P1 و V3 و کنترل مقدار ۲۰ لیتر آن با سنسور کنترل سطح L1
- ۲- انتقال الکل به واحد تولید متوکسیدپتاسیم از مسیر V5، P2 و V6 و کنترل مقدار ۶/۸ لیتر آن با سنسور کنترل سطح L2
- ۳- شروع به کار الکتروموتور M (سیستم همزن) و سنسور دورسنج T.M. و کنترل دور همزن
- ۴- شروع به کار سیستم حرارت راکتور اصلی H1 و سنسور کنترل دمای آن T1
- ۵- شروع به کار سیستم همزن هیدرولیکی واحد تولید متوکسیدپتاسیم با فعال سازی V6، P2 و V7
- ۶- شروع به کار سیستم حرارت واحد تولید متوکسیدپتاسیم H2 و سنسور کنترل دمای آن T2
- ۷- سیستم کنترل هم دما بودن (۸۰ °C) راکتور اصلی و واحد تولید متوکسیدپتاسیم
- ۸- انتقال متوکسیدپتاسیم به راکتور اصلی از مسیر V7، P2 و V8 و خاموش شدن H2 و T2
- ۹- اندازه گیری زمان انجام واکنش به مدت ۳۰ دقیقه توسط سنسور کنترل زمان
- ۱۰- انتقال مواد موجود در راکتور اصلی به واحد شستشو از مسیر V4، P1 و V9 و خاموش شدن M، T.M.، H1 و T1
- ۱۱- اندازه گیری زمان ماند به مدت ۸ ساعت
- ۱۲- انتقال آب شستشو به راکتور اصلی از مسیر V2، P1 و V3 و کنترل مقدار ۲۰ لیتر آن با سنسور کنترل سطح L1
- ۱۳- شروع به کار سیستم حرارت راکتور اصلی H1 و سنسور کنترل دمای آن T1
- ۱۴- انتقال آب گرم به واحد شستشو از مسیر V4، P1 و V9 و خاموش شدن M، T.M.، H1 و T1
- ۱۵- اندازه گیری زمان ماند به مدت ۲ روز
- ۱۶- تخلیه آب کثیف حاصل از شستشو و تکرار مرحله ۱۲ (مرحله شستشو سه بار انجام می گیرد)
- ۱۷- تخلیه بیودیزل خالص بدست آمده



شکل ۴- شماتیک دستگاه تمام اتوماتیک فرآوری تولید سوخت بیودیزل

۴-۲- سیستم کنترل دستگاه فرآوری بیودیزل

سیستم کنترل اتوماتیک دستگاه جدید فرآوری تولید بیودیزل، متناسب با مراحل تولید، بصورت زیر طراحی و ساخته شد:



شکل ۵ - شماتیک سیستم کنترل دستگاه جدید فرآوری بیودیزل

جدول ۱- مراحل اجرای سیستم کنترل دستگاه جدید فرآوری بیودیزل

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---------|
| S14 | S13 | S12 | S11 | S10 | S9 | S8 | S7 | S6 | S5 | S4 | S3 | S2 | S1 | مرحله ۱ |
| S14 | S13 | S12 | S11 | S10 | S9 | S8 | S7 | S6 | S5 | S4 | S3 | S2 | S1 | مرحله ۲ |
| S14 | S13 | S12 | S11 | S10 | S9 | S8 | S7 | S6 | S5 | S4 | S3 | S2 | S1 | مرحله ۳ |
| S14 | S13 | S12 | S11 | S10 | S9 | S8 | S7 | S6 | S5 | S4 | S3 | S2 | S1 | مرحله ۴ |
| S14 | S13 | S12 | S11 | S10 | S9 | S8 | S7 | S6 | S5 | S4 | S3 | S2 | S1 | مرحله ۵ |
| S14 | S13 | S12 | S11 | S10 | S9 | S8 | S7 | S6 | S5 | S4 | S3 | S2 | S1 | مرحله ۶ |
| S14 | S13 | S12 | S11 | S10 | S9 | S8 | S7 | S6 | S5 | S4 | S3 | S2 | S1 | مرحله ۷ |

۵-۲- روش آزمون دستگاه فرآوری بیودیزل

بعد از مرحله استریفیکاسیون و جداسازی آب، ذرات جامد و اسیدهای چرب آزاد، بکمک سیستمی که برای هر یک از مراحل تعبیه شده است، روغن پسماند با حجم مشخصی اندازه‌گیری شده و در داخل رآکتور اصلی قرا می‌گیرد و تا دمای 70°C حرارت داده می‌شد و در طول دوره گرم‌شدن، به کمک یک هم‌زن مکانیکی با سرعت دورانی مشخصی 300 RPM به هم زده می‌شود. بطور هم‌زمان الکل متانول با نسبت‌های مولی الکل به روغن قابل تنظیم مانند ۱:۶ توزین شده و با کاتالیزور سود (NaOH) معادل ۰/۵ درصد وزن روغن پسماند، در ظرف دیگری با حجم متناسب با میزان روغن پسماند در همان دمای روغن، 70°C حرارت داده می‌شد. سپس روغن و متوکسید تولیدشده با هم مخلوط شده و زمان شروع واکنش رکوردگیری می‌شد. پس از ۹۰ دقیقه، از ادامه واکنش ممانعت به عمل آمده و محصول نهایی با استفاده از اسید کلریدریک خنثی شده و مدام PH محصول کنترل می‌شود. سپس مخلوط به مدت ۸ ساعت، به حال خود رها می‌شود تا فازهای گلیسرین و رسوبات نمکی تولید شده، از فاز بیودیزل کاملاً تفکیک شود. فاز بالایی که به رنگ زرد می‌باشد همان بیودیزل (یا متیل استر) می‌باشد و فاز پایینی با رنگ قهوه‌ای، گلیسرین می‌باشد که در مرحله بعد از مخلوط جدا می‌گردید. سپس برای حذف ذرات معلق مومی شکل موجود در بیودیزل، بکمک صافی تصفیه می‌شود. برای حذف صابون تولیدشده، بیودیزل با آب مقطر در دمای قابل تنظیم مانند 60°C و با حجمی معادل حجم بیودیزل، در ظرف دیگری که هوا از قسمت پایین آن دمیده می‌شود، به مدت ۳۰ دقیقه شستشو داده می‌شود در این مرحله باید دقت شود، پس از اضافه کردن آب مقطر به استر، مخلوط امولسیون باید به آرامی به هم زده شود. سپس مخلوط به مدت ۸ ساعت، به حال خود رها می‌شود. در این مرحله سه فاز کاملاً مشخص از هم جدا شدند: بیودیزل که از سایر فازها سبکتر بود در قسمت بالایی، مواد صابونی که به صورت اسفنج سفید رنگ بودند در فاز میانی و محلول آب و نمک باقیمانده به رنگ لیمویی در فاز پایینی جمع می‌شوند. فاز بیودیزل از سایر فازها جدا شده و با استفاده از یک صافی با شبکه‌های ریز، تصفیه می‌گردد.

در ادامه، بیودیزل نهایی در داخل ظرفی در بسته‌ای که فشار آن به مراتب پایین‌تر فشار اتمسفر است، قرار می‌گیرد تا آب و الکل اضافی موجود در آن، در مدت ۳۰ دقیقه و به روش تبخیر در خلاء خارج شوند. عملیات آب‌شویی، مونو و دی‌گلیسریدهای موجود در بیودیزل را حذف نمی‌کند این کار به کمک روش جذبی و با استفاده از یک ماده جاذب مانند سیلیکاژل انجام می‌یابد. بدین نحو که، ابتدا مقدار معینی از ماده جاذب سیلیکاژل در ظرف استوانه‌ای شکل که دارای یک شیر تخلیه در قسمت پائین است، قرارداده شده و سپس بیودیزل نهایی روی آن در داخل ظرف ریخته می‌شد. با عبور بیودیزل از داخل ماده جاذب، مونو و دی‌گلیسرید که قطبیت بیشتری دارند، جذب سیلیکاژل می‌شوند. معمولاً بیودیزل بدلیل غلظت بالایی که دارد به راحتی نمی‌تواند از داخل ماده جاذب عبور کند، به همین دلیل از حلال هگزان استفاده می‌شد. در صورت استفاده از حلال هگزان، پس از مرحله جداسازی مونو و دی‌گلیسریدها توسط جاذب سیلیکاژل، هگزان با عملیات تقطیر از بیودیزل خارج می‌گردد. عملیات جذب مونو و دی‌گلیسریدها در دمای محیط صورت می‌گیرد. آزمایش‌های انجام یافته توسط محقق نشان می‌دهد که: درجه خلوص سوخت بیودیزل تولید شده به روش فوق‌الذکر در آزمایشگاه بیش از ۹۸/۵ درصد می‌باشد. برای بهینه‌سازی دستگاه، تاثیر هر یک از پارامترهای موثر مانند: دما، نوع الکل، نسبت مولی الکل به روغن، نوع کاتالیزور، مقدار کاتالیزور و شدت بهم‌زدن مخلوط به روش سعی و خطا بدست می‌آید.

۳- بحث و نتایج

۱-۳- مقایسه خواص سوخت بیودیزل تولید شده با استاندارد ASTM

نتایج حاصل از اندازه‌گیری خواص سوخت بیودیزل تولید شده که بر اساس استاندارد ASTM انجام گرفت، حاکی از این واقعیت است که سوخت بیودیزل تولید شده تمامی شرایط استاندارد را پوشش می‌دهد. همچنین خواص این سوخت در مقایسه

با گازوئیل متداول در ایران نشان می‌دهد که چگالی سوخت بیودیزل خالص بدلیل داشتن اکسیژن در مخلوط شیمیایی خود بیشتر از گازوئیل است و ویسکوزیته سینماتیکی آن بدلیل جرم مولکولی زنجیره ای طولانی، بیشتر است. مقدار اکسیژن موجود در بیودیزل که در حدود ۱۰٪ وزن کل است که موجب کاهش ارزش حرارتی مخلوط سوخت می‌شود. عدد ستان سوخت بیودیزل در حدود ۶۲/۱ می‌باشد که در مقایسه با سوخت گازوئیل بیشتر است. نقطه اشتعال بیودیزل نسبت به گازوئیل بالاتر می‌باشد و در صد گوگرد موجود در بیودیزل بسیار کمتر از سوخت گازوئیل خالص است که طبیعتاً میزان انتشار اکسیدهای گوگرد را کاهش می‌دهد.

جدول ۲- مشخصات بیودیزل حاصل از روغن پسماند

| گازوئیل متداول | بیودیزل تولیدشده | محدوده استاندارد سوخت بیودیزل | | استاندارد ASTM | واحد | خصوصیت |
|----------------|------------------|-------------------------------|-----|----------------|--------------------|-----------------------|
| | | max | min | | | |
| ۰/۸۳۹ | ۰/۸۸۵۳ | ۰/۸۶ | ۰/۹ | D4052 | g/cm ³ | چگالی |
| ۳/۰۹ | ۴/۳۹۱ | ۵ | ۳/۵ | D445 | Mm ² /s | لزجت سینماتیک در ۴۰°C |
| ۴۲/۵۷ | ۴۱/۹۷ | - | - | D240 | MJ/Kg | ارزش حرارتی پایین |
| ۵۷/۳۳ | ۶۲/۱ | - | ۵۱ | D613 | - | عدد ستان |
| ۱۱۰ | ۱۳۹ | - | ۱۲۰ | D92 | °C | نقطه اشتعال |
| -۷ | -۵ | - | ۱۲۰ | D2500 | °C | نقطه ابری شدن |

سوخت بیودیزل تولید شده با دستگاه جدید بر روی موتور دیزل ۴ سیلندر MT4-244 ساخت شرکت موتور سازان ایران- تبریز، بر اساس استاندارد ECE R-96 در شرایط بار ۱۰۰٪ و در دو دور حداکثر توان (۲۰۰۰rpm) و حداکثر گشتاور (۱۳۰۰rpm) انجام گرفت. در آزمون سوخت جدید، از دینامومتر مغناطیسی مدل E400 ساخت شرکت PMID CO و دستگاه آلاینده‌سنج مدل A-8020 ساخت شرکت Avl Dicom Ditest Gbhm استفاده گردید. نتایج حاصل از آزمون تجربی در مقایسه با گازوئیل در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- تاثیر سوخت بیودیزل تولید شده بر عملکرد موتور و آلاینده‌گی موتور دیزل

| دور حداکثر گشتاور (۱۳۰۰rpm) | | دور حداکثر توان (۲۰۰۰rpm) | | واحد | مشخصه |
|-----------------------------|---------|---------------------------|---------|-------------------|----------------------------------|
| گازوئیل | بیودیزل | گازوئیل | بیودیزل | | |
| ۶۰/۵ | ۶۰ | ۷۸/۵ | ۷۹ | HP | توان ترمزی موتور |
| ۳۳۳ | ۳۳۰ | ۲۸۰ | ۲۸۳ | N-m | گشتاور موتور |
| ۲۲۵ | ۲۷۷ | ۲۳۹ | ۲۸۰ | gr/ Kw.hr | مصرف ویژه سوخت |
| ۰/۱۳ | ۰/۲۲ | ۰/۱۸ | ۰/۱۸ | %V | منو اکسید کربن (CO) |
| ۱۱/۶ | ۱۰/۹ | ۸/۴ | ۸/۱ | %V | دی اکسید کربن (CO ₂) |
| ۱۰۶۰ | ۱۱۴۰ | ۷۵۰ | ۷۸۰ | ppm | اکسیدهای نیتروژن (NOx) |
| ۲۷۰ | ۶۰ | ۳۲ | ۱۵ | mg/m ³ | ذرات معلق (PM) |
| ۶۰ | ۱۶ | ۱۷ | ۹ | ppm | هیدروکربنهای نسوخته (UHC) |

نتایج حاکی از این واقعیت است که سوخت تولید شده با داشتن شرایط استاندارد ASTM، تاثیر مورد قبولی را در عملکرد موتور دارد و تنها اندکی توان تولیدشده را کاهش می‌دهد ولی در عوض آلاینده‌های خطرناکی مانند ذرات معلق و هیدروکربنهای نسوخته را به شدت کاهش می‌دهد که به لحاظ زیست‌محیطی بسیار امیدوار کننده است.

۴- نتیجه گیری

دستگاه جدید به منظور ارتقاء روش تولید سوخت بیودیزل، طراحی و ساخته شد. این دستگاه، تمام مراحل تولید سوخت بیودیزل را بطور کاملا اتوماتیک انجام می دهد و جهت استفاده از آن نیاز به تخصص خاصی نیست. کیفیت سوخت بیودیزل تولیدشده با دستگاه جدید، دارای استاندارد ASTM بوده و به لحاظ عملکرد و ایابندگی قابلیت استفاده در موتور دیزل را دارد.

مراجع

- 1- Antal, M.J., Wade, S.R. and Nunoura, T., "Biocarbon production from Hungarian sunflower shell. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*", Vol. 42-5, pp 1203-1210, 2007.
- 2- Granados, L.M., Zafra-poves, M.D., Alonso, D.M., Galisteo, F.C, Tost, R.M., Santamaria, J. and Fireo, J.L.G., "Biodiesel from sunflower oil by using activated calcium oxide", *Applied Catalysis B: Environmental*. Vol.21, pp.25-31, 2007.
- 3- Du, W., Xu, Y and Liu, D. and Zeng, J., "Comparative study on lipase-catalyzed transformation of soybean oil for biodiesel production with different acyl acceptors", *Journal of Molecular Catalysis*, Vol.30, pp 125-129, 2004.
- 4- Fabbri, D., Bevoni, V., Notari, M. and Rivetti, F. 2006. Properties of a potential biofuel obtained from soybean oil by transesterification with dimethyl carbonate. *Fuel*, Vol.86, pp.690-697.
- 5- Guerreiro, L., Castanheiro, J.E., Fonseca, I.M., Martin-Aranda, R.M., Ramos, A.M. and Vital, J. 2006. Transesterification of soybean oil over sulfonic acid functionalised polymeric membranes. *Catalysis Today*, Vol.118, pp 166-171.
- 6- Nouraddini, H., Gao, X. and Philkana, R.S., "Immobilized *Pseudomonas cepacia* lipase for biodiesel fuel production from soybean oil", *Bioresource Technology*, Vol.96, pp.769-777, 2005.
- 7- Conceição, M.M., Candeia, R.A., Silva, F.C., Bezerra, A.F., Fernandes, V.J. and Souza, A.G, "Thermoanalytical characterization of castor oil biodiesel", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.11, pp. 964-975, 2007.
- 8- Veljković, V.B., Lakićević, S.H., Stamenković, O.S., Todorović, Z.B. and Lazić, M.L., "Biodiesel production from tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) seed oil with a high content of free fatty acids", *Fuel*, Vol.85, pp.2671-2675, 2006.
- 9- Ghadge, S.V. and Raheman, H., "Biodiesel production from mahua (*Madhuca indica*) oil having high free fatty acids", *Biomass and Bioenergy*, Vol.28, pp 601-605, 2005.
- 10- Xu, G., Zhang, B., Liu, S. and Yue, J., "Study on Immobilized Lipase Catalyzed Transesterification Reaction of Tung Oil", *Agricultural Sciences in China*, Vol. pp.859-864, 2006.
- 11- Fröhlich, A. and Rice, B., "Evaluation of *Camelina sativa* oil as a feedstock for biodiesel production", *Industrial Crops and Products*, Vol.21, pp.25-31, 2005.
- 12- Royon, D., Daz, M., Ellenrieder, G. and Locatelli, S., "Enzymatic production of biodiesel from cotton seed oil using *t*-butanol as a solvent", *Bioresource Technology*, Vol.98, pp.648-653, 2007.
- 13- Zhang, Y., Dube, M.A., Mclean, D.D. and Kates, M. "Biodiesel production from waste cooking oil: 2. Economic assessment and sensitivity analysis", *Bioresource Technology*, Vol.90, pp. 229-24 2003.
- 14- Dubé, M.A., Tremblay, A.Y. and Liu, J., "Biodiesel production using a membrane reactor", *Bioresource Technology*, Vol.98, pp 639-647, 2007.
- 15- Nie, L., Xie, F., Wang, F. and Tan, T., "Lipase catalyzed methanolysis to produce biodiesel: Optimization of the biodiesel production", *Journal of Molecular, Enzymatic*, Vol.43, pp 142-147, 2006.
- 16- Najafi B., Piruzpanah V, Ghobadian B., "Experimental Investigation of Performance and Emission Parameters of a Small Diesel Engine Using CNG Biodiesel", *SAE Paper No. 2007-32-0075*, 2007.