Archive of SID
نشریه علمی- پژوهشی سوخت و احتراق
سال یازدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۷

مطالعه تجربی تأثیر استفاده از مخلوط سوخت دیزل-بیودیزل بر قابلیت بازیافت حرارت تلف شده در یک مولد برق کوچک

امیر امیدوار
دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، omidvar@sutech.ac.ir
(تاریخ دریافت: ۹۷/۲/۲۸، دریافت آخرین اصلاحات: ۹۷/۴/۲۹ ، پذیرش: ۹۷/۶/۷)

چکیده: در موتورهای دیزل سهم قابل توجهی از انرژی حاصل از احتراق سوخت از طریق اگزوز و سیستم خنک‌کننده موتور تلف می‌شود. استفاده از سوخت‌های زیستی می‌تواند بر میزان حرارت بازیافتی از موتور نیز اثر گذار باشد. در تحقیقی که به‌تازگی در این مورد منتشرشده، تأکید شده است که افزایش درصد بیودیزل در مخلوط سوخت پتانسیل بازیافت حرارت را کاهش می‌دهد. در تحقیق مذکور تنها سوخت‌های بیودیزل خالص و مخلوط ۵۰ درصد بیودیزل با دیزل معمولی بررسی شده است. این در حالی است که معمولاً در استانداردها استفاده از مخلوط‌های کمتر از ۲۰ درصد بیودیزل توصیه شده است. در مقاله حاضر تأثیر استفاده از مخلوط‌های بیودیزل با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد حجمی بر پتانسیل بازیافت حرارت از اگزوز و سیستم خنک‌کاری یک مولد برق کوچک به‌کمک یک سامانه بازیاب ترموالکتریک تک‌ماژوله بررسی و با سوخت دیزل معمولی مقایسه شده است. نتایج نشان داد که تأثیر بیودیزل بر امکان بازیافت حرارت از موتور یک روند یکنوای کاهشی ندارد، به‌طوری که با افزایش درصد حجمی بیودیزل تا ۲۰ درصد، پتانسیل بازیافت حرارت افزایش می‌یابد. افزایش بیشتر سهم بیودیزل در مخلوط سوخت باعث کاهش پتانسیل بازیافت حرارت خواهد شد. بیشترین پتانسیل بازیافت حرارت برای مخلوط B20 مشاهده شد. نتایج تجربی انجام‌شده با یک ماژول ترموالکتریک نشان داد که استفاده از مخلوط B20 نسبت به دیزل معمولی بسته به‌میزان بار موتور می‌تواند ولتاژ مدار باز ماژول را تا ۱۲ درصد و بیشینه توان خروجی از آن را تا ۲۵ درصد افزایش دهد.

کلیدواژگان: بیودیزل، بازیافت حرارت، مولد ترموالکتریک

مقدمه

معمولاً در موتورهای دیزل سهم قابل توجهی از انرژی حاصل از احتراق سوخت از طریق گازهای خروجی اگزوز و بخشی نیز توسط سیستم خنک‌کننده موتور تلف می‌شود. به‌همین دلیل، موضوع بازیافت حرارت از گازهای خروجی اگزوز در موتورهای احتراقی، به‌ویژه موتورهای دیزل، هم از نظر کاهش مصرف سوخت و هم از دیدگاه کاهش سطح آلاینده‌های زیست‌محیطی، بسیار حائز اهمیت است. روش‌های متعددی برای بازیافت حرارت از گازهای خروجی اگزوز وجود دارد که از آن جمله می‌توان به استفاده از مولدهای ترموالکتریک، چرخه رانکین اورگانیک[1]، موتورهای ۶ زمانه، توربوشارژینگ و بازچرخش گازهای اگزوز اشاره کرد[۱]. در این بین، استفاده از روش‌های سیکل رانکین اورگانیک و مولدهای ترموالکتریک رایج‌ترند، به‌طوری که در سالیان اخیر نیز تحقیقات متنوعی در این زمینه انجام شده است. در سال ۲۰۱۱، وی و همکاران تحقیقی بر روی بازیافت حرارت از گازهای خروجی اگزوز موتورهای دیزل سنگین توسط یک سیستم بازیافت حرارت با دمای متوسط بر اساس سیکل رانکین اورگانیک انجام دادند[۲]. آن‌ها نشان دادند که استفاده از سیکل رانکین فوق‌بحرانی روش بهتری برای بازیابی حرارت است. بررسی‌های انجام‌شده توسط باری و حسین در سال ۲۰۱۳ حاکی از آن است که با طراحی درست مبدل لوله پوسته

1. Organic Rankine cycle

www.SID.ir

Archive of SID

به‌کارگرفته‌شده برای بازیافت حرارت و همچنین، انتخاب سیال عامل اورگانیک در سیکل رانکین می‌توان مقدار حرارت بازیافتی از اگزوز را افزایش داد[۳]. همچنین آن‌ها نشان دادند که استفاده از مبدل‌های موازی به‌مراتب عملکرد بهتری نسبت به مبدل‌های سری دارند. چن و همکاران در سال ۲۰۱۷ یک سیکل رانکین اورگانیک جدید برای بازیافت حرارت در موتورهای دیزل سنگین ارائه کردند[۴]. آن‌ها نشان دادند که در سیکل رانکین پیشنهادی، اگرچه حجم مبدل‌های حرارتی ۱۸ درصد نسبت به سیکل رانکین چرخه دوگانه مرسوم کاهش یافته، اما می‌تواند ۸ درصد توان بیشتری تولید کند. استفاده از سیکل رانکین تا مدت‌ها به‌عنوان رایج‌ترین روش بازیافت حرارت در موتورهای احتراقی مطرح بود. با پیشرفت فناوری ساخت مولدهای ترموالکتریک و به‌تبع آن افزایش نسبی بازده و کاهش قیمت این مولدها، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه استفاده از مولدهای ترموالکتریک برای بازیافت حرارت در سال‌های اخیر شکل گرفته است. منگ و همکاران در سال ۲۰۱۶، تحقیقی بر روی بازیافت حرارت از سیستم‌های صنعتی توسط مولدهای ترموالکتریک ارائه دادند[۵]. آن‌ها نشان دادند که برای گازهای خروجی با دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد، به‌طور میانگین می‌توان ۱/۴۷ کیلووات انرژی الکتریکی به‌ازای هر متر مربع با ضریب تبدیل ۴/۵ درصد به‌دست آورد. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ نشان دادند که پرکردن فضای اطراف مولدهای ترموالکتریک با فوم‌های فلزی می‌تواند عملکرد آن‌ها را در بازیافت حرارت بهبود بخشد[۶]. دمیر و دینسر در سال ۲۰۱۷ به‌ارزیابی مولدهای ترموالکتریک برای بازیافت حرارت از اگزوز پرداختند[۷]. آن‌ها روابطی را برای پیش‌بینی بازدهی انرژی و اکسرژی این مولدها بر اساس نتایج تجربی ارائه کردند. تحقیقات اور و همکاران در سال ۲۰۱۷ نشان داد که استفاده از مولدهای ترموالکتریک در کنار لوله‌های حرارتی به‌منظور بازیافت حرارت از اگزوز می‌تواند باعث کاهش ۱/۵۷ درصدی در مصرف سوخت و به‌تبع آن در تولید آلاینده دی اکسید کربن شود[۸]. هی و وانگ در سال ۲۰۱۷ نشان دادند که افت توان ایجادشده در موتور ناشی از تغییرات فشار اگزوز به‌دلیل بازیابی حرارت در مقابله با توان تولیدی از فرایند بازیافت حرارت کوچک‌تر است[۹]. تحقیقات نگاش و همکاران در سال ۲۰۱۷ نشان داد که چیدمان آرایه الکتریکی ماژول‌های ترموالکتریک می‌تواند نقش بسیار مؤثری بر توان تولیدی از سیستم بازیاب حرارت از موتور داشته باشد[۱۰]. اور و اکبرزاده در سال ۲۰۱۷ نشان دادند که تقریباً یک درصد توان تولیدی در موتورهای احتراقی و توربین‌های گازی از طریق اگزوز قابل بازیافت است[۱۱]. کیم و همکاران در سال ۲۰۱۷ استفاده از ماژول‌های ترموالکتریک تماس مستقیم را برای بازیابی توان حرارتی اگزوز پیشنهاد کردند[۱۲]. آن‌ها نشان دادند که استفاده از ماژول‌های تماس مستقیم می‌تواند، به‌دلیل کاهش مقاومت تماسی، بازدهی ماژول‌های ترموالکتریک را تا ۳۲ درصد افزایش و افت فشار را ۲۳ درصد کاهش دهد. منگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ نشان دادند که افزایش انتقال حرارت گاز توان بازیافتی را به‌طور مؤثری افزایش می‌دهد، اما بر بازده ترموالکتریک اثر چشمگیری ندارد[۱۳]. همچنین، دوره بازگشت سرمایه را برای اجرای سامانه بازیافت حرارت ترموالکتریک در اگزوز حدود چهار سال برآورد کردند. لان و همکاران، در سال ۲۰۱۸، یک مدل دینامیکی ساده برای پیش‌بینی بازیافت حرارت در وسایط نقلیه توسط مولدهای ترموالکتریک ارائه کردند[۱۴]. آن‌ها نشان دادند که تعامل مولدهای ترموالکتریک با مبدل‌های حرارتی می‌تواند نقش مهمی در بازیافت حرارت داشته باشد. به‌طوری که برای دست‌یابی به بازده مناسب در مولدهای ترموالکتریک لازم است که هندسه و ابعاد مبدل‌های حرارتی به‌دقت محاسبه و طراحی شود. چینگووا و همکاران در سال ۲۰۱۸ یک یخچال قابل‌حمل برای خودرو طراحی کردند که الکتریسیته موردنیاز آن توسط مولدهای برق ترموالکتریک از گازهای خروجی اگزوز تأمین می‌شود[۱۵]. آن‌ها در این تحقیق نشان دادند که از بازیافت گرمای تلف‌شده در اگزوز می‌توان یک یخچال ۲۰ لیتری کوچک را برای سرنشینان خودرو راه‌اندازی کرد.

در سال‌های اخیر، با توجه به محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی و آلایندگی زیاد آن‌ها استفاده از بیودیزل‌ها و ترکیب آن‌ها با سوخت‌های دیزل معمولی مورد توجه قرار گرفته است. بیودیزل‌ها معمولاً غیر سمی‌اند و سازگاری خوبی با محیط‌زیست دارند. کاهش مونوکسیدکربن، دی‌اکسیدگوگرد، هیدروکربن‌های سوخته‌نشده و ذرات معلق از جمله مزایای مهم استفاده از این نوع سوختهاست[۱۶]. بیودیزل‌ها معمولاً از روغن‌های گیاهی و یا چربی‌های حیوانی به‌دست می‌آیند، ولی، به‌دلیل لزجت نسبتاً زیادی که دارند، به‌طور مستقیم به‌عنوان سوخت قابل استفاده نیستند[۱۷]. تاکنون در مورد تأثیر استفاده از بیودیزل بر

www.SID.ir

Archive of SID

ویژگی‌های گازهای خروجی از موتور و به‌تبع آن بر قابلیت بازیافت حرارت از اگزوز تحقیقات زیادی انجام نشده است. مگنو و همکاران در سال ۲۰۱۵ به‌بررسی اثر استفاده از بیودیزل بر پتانسیل بازیافت حرارت از گازهای خروجی اگزوز یک موتور احتراق تراکمی کوچک پرداختند[۱۸]. در این تحقیق تأثیر استفاده از سوخت‌های بیودیزل خالص (B100) و مخلوط ۵۰ درصد حجمی بیودیزل با سوخت دیزل معمولی (B50) بر دمای خروجی اگزوز و بازده احتراق در دورهای مختلف موتور (۱۴۰۰ تا ۳۶۰۰ دور در دقیقه) بررسی و با سوخت دیزل معمولی مقایسه شده است. یکی از نتایج پژوهش مذکور حاکی از این است که کمیت و کیفیت انرژی بازیافت شده از اگزوز با افزایش سهم بیودیزل در مخلوط سوخت کاهش می‌یابد.

براساس بررسی انجام‌شده توسط نگارندگان، مرجع [۱۸] تنها مرجعی است که تا حدودی به‌بررسی تأثیر استفاده از بیودیزل بر امکان بازیافت حرارت از موتور پرداخته است و البته، به‌نظر می‌رسد در این مورد همچنان ابهام‌هایی وجود دارد که پاسخ داده نشده است. اول اینکه صرفاً با مطالعه دو سوخت B50 و B100 نمی‌توان در مورد تأثیر استفاده از سایر مخلوط‌های بیودیزل (با درصدهای مختلف) بر امکان بازیافت حرارت نظر قطعی و دقیقی ارائه کرد. در عمل استفاده از درصدهای بالای بیودیزل در مخلوط سوخت چندان رایج نیست. در حال حاضر، ارائه مخلوط ۵ تا ۷ درصد حجمی بیودیزل به‌ترتیب برای استفاده عمومی در امریکا و اروپا مجاز است[۱۹]. مطالعات نشان داده است که استفاده از سوخت‌های با درصد اختلاط بیودیزل کمتر از۲۰ درصد مشکلات چندانی برای موتور ایجاد نمی‌کند و در اکثر کشورها نیز تست‌های موتوری با مخلوط‌های تا ۲۰ درصد حجمی بیودیزل انجام می‌شود[۱۹]. ذکر این نکته لازم است که استفاده از مخلوط‌های سوختی با درصدهای بیودیزل بالاتر با اتخاذ تدابیر لازم امکان‌پذیر است و البته، باید در ساختار عملکردی موتور نیز اصلاحاتی انجام شود[۱۹]. با توجه به‌اینکه استفاده از مخلوط‌های بیودیزل با درصد کمتر از ۲۰ درصد معمولاً رایج‌تر است، در این مقاله سعی شده است تا تأثیر استفاده از مخلوط‌های B10، B20 و B30 بر قابلیت بازیافت حرارت از اگزوز و سیستم خنک‌کننده موتور مورد بررسی قرار گیرد. مقدار حرارت تلف‌شده از طریق اگزوز،علاوه‌بر دمای گاز، به دبی گاز و ظرفیت گرمایی آن نیز بستگی دارد. استفاده از سوخت مخلوط بیودیزل-دیزل، علاوه‌بر اینکه می‌تواند دمای گازهای خروجی از اگزوز را تغییر دهد، ممکن است بر پارامترهای دیگر نظیر ظرفیت گرمایی و دبی گازهای خروجی نیز مؤثر باشد. مقدار ولتاژ مدار باز ایجادشده توسط یک مولد ترموالکتریک با دقت بسیار بالایی به شار حرارتی اعمال‌شده به سطح گرم ماژول وابسته است. به‌همین دلیل، تغییرات بسیار اندک در شار حرارتی ورودی به ماژول با دقت بسیار بالایی به‌صورت تغییر در مقدار ولتاژ مدار باز آن قابل مشاهده خواهد بود. به‌همین دلیل، در این پژوهش برای بررسی تأثیر استفاده از مخلوط‌های رایج بیودیزل-دیزل بر افزایش یا کاهش پتانسیل بازیافت حرارت از مولد ترموالکتریک تک‌ماژوله استفاده شده است. بدیهی است مولدی با تنها یک ماژول ترموالکتریک قادر نیست توان زیادی را از اگزوز و یا سیستم خنک‌کاری موتور بازیافت کند، بلکه قادر است تأثیر استفاده از سوخت‌های مختلف بر افزایش یا کاهش آنتالپی خروجی از اگزوز را با دقت بالایی تشخیص دهد. در تحقیق انجام‌شده توسط نیچران و همکاران بر روی بیودیزل به‌دست آمده از روغن‌های پسماند نشان داده شده است که با افزایش درصد بیودیزل در سوخت تا حدود ۴۰ درصد حجمی، دمای گازهای خروجی از اگزوز افزایش خواهد یافت، ولی افزایش بیشتر درصد بیودیزل در مخلوط سوخت دمای اگزوز را کاهش خواهد داد[۲۰]. بر این اساس، تا حدودی می‌توان انتظار داشت که میزان بازیافت حرارت از اگزوز نیز چنین رفتاری داشته باشد، اما اظهار نظر قاطع‌تر در این زمینه نیازمند بررسی‌های بیشتری است. زیرا، همان‌طور که اشاره شد دما تنها عامل مؤثر بر میزان حرارت تلف‌شده از اگزوز نیست و دبی و ظرفیت گرمایی گازهای خروجی نیز اثرگذار خواهند بود.

مواد و روش‌ها

الف) تولید بیودیزل

از آنجا که در کشور ما هنوز بیودیزل به‌عنوان سوختی رایج در دسترس نیست، در این مقاله، برای انجام تست‌های تجربی در مرحله اول اقدام به تولید بیودیزل شد. برای تولید بیودیزل از روغن‌های گیاهی تاکنون روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است

www.SID.ir

Archive of SID

که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به پیرولیز، میکروامولسیون و ترانس استریفیکاسیون اشاره کرد. تحقیقات نشان داده است که روش ترانس استریفیکاسیون، که به‌روش تبادل استری نیز معروف است، ازجمله مناسب‌ترین روش‌ها برای تولید زیست سوخت از روغن گیاهی است.

در پژوهش حاضر، از روش تبادل استری برای تولید بیودیزل از روغن آفتابگردان تصفیه‌شده مخصوص پخت‌وپز (تولید کارخانه لادن) استفاده شده است. در این فرایند از متانول ۹۹/۸ درصد (تولید کمپانی مرک آلمان) و هیدروکسیدپتاسیم (تولید کمپانی مرک آلمان) با درجه خلوص بالا استفاده شد. غلظت کاتالیزور ۱/۱ درصد، دمای واکنش°C۶۰، زمان واکنش ۶۰ دقیقه و نسبت مولی الکل به روغن ۱ به ۶ درنظر گرفته شد. جزییات کامل روش تولید بیودیزل در مرجع [۲۱] آمده است.

وجود برخی ناخالصی‌ها مانند صابون و یا کاتالیزور اضافی در متیل استر فراوری‌شده توسط روش بالا می‌تواند باعث بروز اثرات نامطلوب در نحوه احتراق و ایجاد بوی بد همراه با تشکیل دود غلیظ شود. لذا، لازم است ناخالصی‌ها از سوخت جدا شوند. در این تحقیق از روش آب‌شویی همراه با تزریق حباب برای رفع ناخالصی‌ها استفاده شد. فرآیند آب‌شویی ۵ مرتبه تکرار شد تا در نهایت بیودیزل کاملاً شفاف و عاری از ناخالصی به‌دست آمد. در شکل ۱، نمایی کلی از مراحل تولید بیودیزل نشان داده شده است.

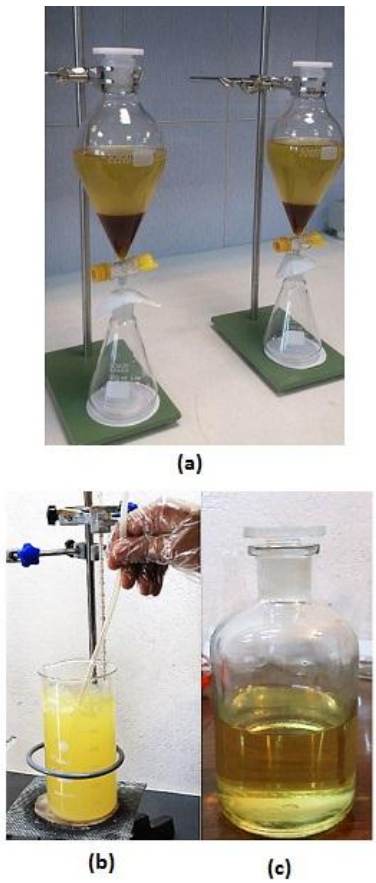

Figure 1- Biodiesel production stages; a) Glycerin Separation b) Bubble washing biodiesel c) Pure biodiesel
شکل ۱- مراحل تولید بیودیزل: الف) جداسازی گلیسیرین، ب) آب‌شویی با حباب، ج) بیودیزل خالص

خواص بیودیزل تولیدشده در آزمایشگاه بخش تحقیق‌وتوسعه مجموعه پالایشگاهی جم بر اساس استاندارد ASTM و با استفاده از روش‌های ارائه شده در جدول ۱ اندازه‌گیری و تأیید شد. ویژگی‌های بیودیزل تولیدشده در جدول ۱ آمده است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده برای بیودیزل

Table 1- Some of the measured characteristics of the biodiesel

Quantity	Value	Measurement Method
Kinematic Viscosity (40°C)	5.047 (mm^2/s)	ASTM D7042
Flash Point	174 (°C)	ASTM D93
Sulfur	23 (mg/kg)	ASTM D5453
Density (40°C)	865.2 (kg/m^3)	ASTM D7042
Cloud Point	5 (°C)	ASTM D2500

ب) دیزل ژنراتور و سامانه‌های ترموالکتریک بازیافت حرارت

برای مطالعه تأثیر استفاده از مخلوط بیودیزل بر پتانسیل بازیافت حرارت تلف‌شده، سوخت‌زیستی تولیدشده با نسبت‌های مختلف با سوخت دیزل رایج (دیزل شماره ۲) ترکیب و در یک دستگاه دیزل ژنراتور کوچک تست شد. دیزل ژنراتور مورداستفاده در این تحقیق دارای یک موتور دیزل تک‌سیلندر با ویژگی‌های ارائه‌شده در جدول ۲ است.

جدول ۲- ویژگی‌های موتور دیزل

Table 2- Specifications of the diesel engine

Type	Single-Cylinder, Horizontal, 4 Cycle
Bore*Stroke (mm)	75*80
Displacement (L)	0.353
Max. Power	5 hp@2200 RPM
Cooling System	Radiator (water cooled)
Starting Method	Hand Cranking/Starting Motor
Weight (kg)	65

این موتور با یک مولد برق با ساخت شرکت استریم ساخت کشور چین کوپل شده است. این دیزل ژنراتور در دور ۹۹۰ RPM می‌تواند اختلاف پتانسیل ۲۲۰ ولت را تولید نماید. در شکل ۲ نمایی کلی از دیزل ژنراتور مورداستفاده در این پژوهش نشان داده شده است.

Figure 2- A general view of diesel generator

شکل ۲- نمایی کلی از دیزل ژنراتور

به‌منظور ارزیابی تأثیر بیودیزل بر پتانسیل بازیافت حرارت از گازهای خروجی اگزوز از یک سامانه مولد ترموالکتریک هوایی شامل یک ماژول ترموالکتریک ۱۲۷۰۶، فین خنک‌کننده به‌همراه فن و فین متصل‌شونده به مجرای گازهای گرم اگزوز استفاده شده است. این سامانه به‌گونه‌ای بر روی اگزوز نصب شده است که گازهای گرم خروجی از موتور قبل از ورود به لوله اگزوز از روی فین متصل‌شده به‌طرف گرم ماژول ترموالکتریک عبور کنند. محل اتصال سامانه ترموالکتریک به مجرای تعبیه‌شده در اگزوز با نوار لاستیکی نسوز و چسب سیلیکون به‌خوبی درزگیری شد. سمت سرد ماژول ترموالکتریک توسط فین

www.SID.ir

Archive of SID

آلومینیمی و فن نصب‌شده بر روی آن با هوای محیط اطراف موتور تبادل حرارت کرده و خنک می‌شود. در شکل ۳ نمایی از سامانه ترموالکتریک نصب‌شده بر روی اگزوز نشان داده شده است.

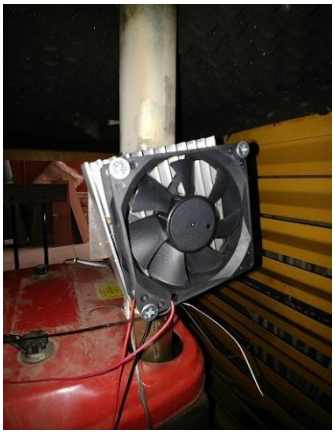

Figure 3- Exhaust thermoelectric waste heat recovery system
شکل ۳- سامانه بازیافت حرارت ترموالکتریک اگزوز

ماژول ترموالکتریک ۱۲۷۰۶ درواقع یک ماژول تجاری رایج در بازار است که اغلب به‌عنوان ماژول ترموالکتریک-کولر (TEC)[۲] و برای کاربرد سرمایشی استفاده می‌شود. به‌تازگی، در برخی از تحقیقات، استفاده از این ماژول به‌عنوان یک مولد ترموالکتریک (TEG)[۳] برای کاربرد بازیافت حرارت از موتور ارزیابی شده است[۲۲]. این ماژول متشکل از ۱۲۷ جفت نیمه‌هادی بیسموت (BiSn) و آلومینا (Al_2O_3) است که در یک پوشش سرامیکی با ابعاد ۳/۸×۴۰×۴۰ میلی‌متر جای گرفته است. در حالت استفاده از این ماژول برای تولید سرما، ولتاژ عملکردی و بیشینه جریان الکتریکی به‌ترتیب برابر ۱۶ ولت و ۶ آمپر پیشنهاد شده است. همچنین، حداکثر اختلاف دمای دو طرف ماژول بر اساس پیشنهاد کارخانه سازنده ۷۹ درجه سانتی‌گراد پیشنهاد شده است[۲۳]. از آنجا که این ماژول اغلب برای تولید سرما استفاده شده، نه برای تولید توان، این ویژگی‌ها و همچنین منحنی‌های مشخصه ارائه‌شده برای ماژول ۱۲۷۰۶مربوط‌به کارکرد تولید سرماست و منحنی مشخصه خاصی برای استفاده از این ماژول درحالت مولد ارائه نشده است. به‌دلیل قیمت پایین و همچنین، رایج و در دسترس‌بودن این ماژول در بازار، اخیراً، در برخی از تحقیقات امکان استفاده از این ماژول برای کاربرد بازیافت حرارت در موتور بررسی شده است[۲۲]. بر این اساس در این تحقیق نیز از ماژول مذکور استفاده شد. حداکثر دمای عملکردی ماژول ۱۲۷۰۶ برابر ۱۳۸ درجه سانتی‌گراد است[۲۲]. در پژوهش حاضر نیز، از آنجا که تنها یک فین آلومینیومی در مسیر جریان گاز اگزوز قرار گرفته، متوسط دمای ماژول (میانگین دمای سطح پایه فین متصل به سطح گرم ماژول و دمای هوای محیط اطراف سطح سرد آن) از ۱۳۸ درجه بیشتر نشد. به‌همین دلیل، استفاده از این ماژول محدودیت کاربردی ندارد.

ولتاژ تولیدشده توسط مولدهای ترموالکتریک توسط یک مولتی‌متر دیجیتال (با دقت ۰/۰۰۱ ولت) و دمای گازهای خروجی از اگزوز نیز، توسط یک سنسور دمای PT100 ساخت شرکت ساموان کره جنوبی با محدوده دمایی ۵۰- تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و دقت ۰/۵ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد (شکل ۴). برای اطمینان از دقت حس‌گرهای اندازه‌گیری دما، عملکرد آن‌ها در شرایط مشابه با یک دستگاه دماسنج ساخت شرکت تستو آلمان که دارای گواهی کالیبراسیون بود مقایسه شد. همچنین، حس‌گرهای دما برای اندازه‌گیری دمای مخلوط آب و یخ و همچنین آب در حال جوشیدن مورد استفاده قرار گرفت و از صحت عملکرد آن‌ها اطمینان حاصل شد. به‌منظور اطمینان از حساسیت مولد ترموالکتریک به تغییرات شار حرارتی، پایه

2. Thermoelectric cooler
3. Thermoelectric generator

www.SID.ir

Archive of SID

فین متصل به سطح گرم ماژول ترموالکتریک توسط یک سیم پیچ ساده با مقاومت بسیار ناچیز (۰/۰۱ اهم) که به یک باتری قلمی ۱/۵ ولت متصل شده بود تحریک شد. با قطع و وصل کردن متوالی مدار تحریک ولتاژ تولیدی توسط ماژول به‌وسیله مولتی‌متر دیجیتال مورداستفاده در آزمایش اندازه‌گیری شد. این بررسی نشان داد که مجموعه مولد ترموالکتریک و مولتی‌متر متصل به آن حساسیت لازم برای اندازه‌گیری و تشخیص تحریک‌های حرارتی تا ۰/۰۱۵ وات را دارد.

Figure 4- Exhaust gas temperature measurement by PT100 sensor
شکل ۴- اندازه گیری دمای گازهای خروجی اگزوز توسط حس‌گر PT100

یکی دیگر از منابع بازیافت حرارت در موتورهای دیزل استفاده از حرارت تلف‌شده در سیستم خنک‌کننده موتور است. در این تحقیق، به‌منظور بررسی تأثیر بیودیزل بر پتانسیل بازیافت حرارت از آب خنک‌کننده رادیاتور، یک سامانه ترموالکتریک آبی-هوایی شامل یک ماژول ترموالکتریک ۱۲۷۰۶، فین و فن خنک‌کننده برای سمت سرد ماژول و یک بلوک مبادله‌کننده حرارت آبی کوچک برای مبادله حرارت از جریان آب سیستم خنک‌کننده موتور به‌سمت گرم ماژول ترموالکتریک استفاده شد. در این آزمایش، لوله هدایت کننده آب به سیستم خنک‌کننده رادیاتور بریده شد و بلوک مبادله‌کننده آبی متصل به سامانه ترموالکتریک مذکور از طریق دو شیلنگ نسوز در مسیر جریان آب رادیاتور قرار گرفت. بدین‌ترتیب، آب خنک‌کننده موتور می‌تواند از طریق بلوک مبادله‌کننده آبی با سمت گرم ماژول ترموالکتریک مبادله حرارت کند. سمت سرد ماژول ترموالکتریک از طریق فین آلومینیمی و فن نصب‌شده بر روی آن با هوای محیط تبادل حرارت دارد. در شکل ۵، نمایی از مولد ترموالکتریک هوایی-آبی که بر روی سیستم خنک‌کننده آب موتور نصب شده نشان داده شده است.

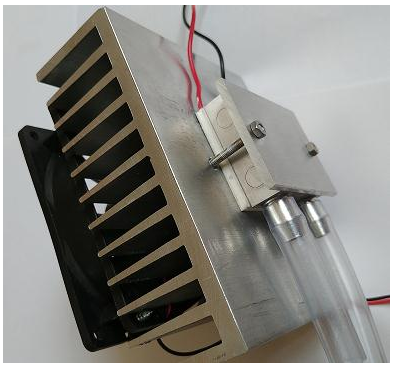

Figure 5- Coolant thermoelectric waste heat recovery system
شکل ۵- سامانه بازیافت حرارت ترموالکتریک سیستم خنک‌کننده

www.SID.ir

Archive of SID

در این تحقیق، برای مطالعه عملکرد سیستم‌های بازیافت حرارت در شرایط کارکرد موتور تحت بارهای مختلف، از سه لامپ قلمی (مدادی) ۱۰۰۰ واتی استفاده شده است. با اضافه‌کردن لامپ‌ها به مدار می‌توان مقدار بار مصرفی تحمیل‌شده به دیزل ژنراتور را افزایش داد. برای اطمینان از مقدار توان واقعی مصرف‌شده به‌وسیله لامپ‌ها در هر حالت، ولتاژ ورودی و شدت جریان الکتریکی عبوری از آن‌ها اندازه‌گیری شد.

تأثیر استفاده از مخلوط بیودیزل بر پتانسیل بازیافت حرارت

پس از اطمینان نسبی از انطباق ویژگی‌های بیودیزل به‌دست آمده با استاندارد ASTM (مطابق جدول ۱)، مقداری سوخت دیزل رایج در ایران (موسوم به دیزل شماره ۲) از جایگاه‌های عرضه سوخت تهیه و با سوخت بیودیزل تولیدشده مخلوط شد. در این تحقیق از سه مخلوط مختلف با درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد حجمی برای بیودیزل استفاده شد. برای انجام آزمایش با هر یک از مخلوط‌های سوختی مذکور، پس از استارت دیزل ژنراتور از حالت سرد (دمای اولیه موتور برابر با دمای محیط)، اجازه داده شد تا در حالت بدون بار در دور RPM ۹۹۰ کار کند تا شرایط موتور از نظر دمای آب و دمای گازهای خروجی اگزوز به‌حالت پایدار برسد. سپس، با افزایش توان مصرفی دیزل ژنراتور تا ۲۵ درصد، توان نامی تحت بار قرار گرفت. پس از بارگذاری، دوباره فرصت داده شد تا شرایط موتور ازنظر دمای اگزوز و ولتاژ تولیدی توسط سامانه‌های ترموالکتریک نصب‌شده بر روی اگزوز و سیستم خنک‌کننده موتور به حالت پایدار برسد. سپس، متغیرهای عملکردی ثبت شد و دیزل ژنراتور تحت باری برابر ۵۰ درصد توان نامی قرار گرفت. مجدداً، مدتی اجازه داده شد تا موتور در شرایط عملکردی جدید کار کند تا به حالت پایدار برسد. پس از آن متغیرها ثبت شد و بار تحمیل‌شده به دیزل ژنراتور تا ۷۵ درصد توان نامی افزایش یافت. پس از رسیدن به شرایط کارکرد پایدار در این حالت نیز متغیرها ثبت شدند. ذکر این نکته لازم است که در این تحقیق کلیه آزمایش‌ها در ۵ نوبت تکرار و میانگین داده‌ها در مقاله گزارش شده است.

آزمایش‌ها مطابق روش اشاره‌شده برای سوخت دیزل معمولی تحت بارهای مصرفی مختلف انجام شد و ولتاژ مدار باز تولیدی توسط سامانه‌های بازیاب ترموالکتریک نصب‌شده بر روی اگزوز و سیستم خنک‌کننده موتور ثبت شد. نتایج در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- ولتاژ مدار باز تولیدی توسط سیستم‌های بازیاب در بارهای مصرفی مختلف (برحسب ولت)

Table 3- Open circuit voltage generated by recovery systems at different loads (in Volt)

Position of the Heat Recovery System	Engine Load		
	25%	50%	75%
Exhaust	1.63	2.11	4.12
Coolant System	0.62	0.86	1.71

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ولتاژ مدار باز در سامانه نصب‌شده بر روی اگزوز به‌مراتب بیشتر از سامانه نصب‌شده بر سیستم خنک‌کننده است. همچنین، مشاهده می‌شود که با افزایش بار مصرفی از ۲۵ درصد به ۵۰ درصد، اختلاف پتانسیل تولیدی، چه در سامانه اگزوز و چه در سامانه سیستم خنک‌کننده، حدود ۳۰ درصد افزایش یافته است. این در حالی است که با افزایش بار مصرفی از ۵۰ درصد به ۷۵ درصد، ولتاژ مدار باز حدود دو برابر شده است.

در ادامه، بررسی‌های مشابهی برای مخلوط‌های بیودیزل ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد انجام شد و ولتاژ مدار باز ماژول‌های ترموالکتریک نصب‌شده بر روی اگزوز و سامانه خنک‌کاری موتور با شرایط کارکرد دیزل ژنراتور با سوخت دیزل معمولی در بارهای مصرفی مشابه مقایسه شد.

در شکل ۶ درصد تغییر در ولتاژ مدار باز ایجاد شده توسط بازیاب ترموالکتریک در حالت استفاده از مخلوط بیودیزل نسبت به دیزل معمولی(θ) برای گازهای خروجی اگزوز رسم شده است. θ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

www.SID.ir

Archive of SID

$$\theta = \frac{V_B - V_D}{V_D} \times 100 \quad (۱)$$

که V_B و V_D به‌ترتیب بیانگر ولتاژ مدار باز ایجاشده توسط مولد ترموالکتریک برای مخلوط بیودیزل و سوخت دیزل معمولی در میزان بار مصرفی مشابه است.

حداکثر توان تولیدی توسط یک مولد ترموالکتریک زمانی حاصل می‌شود که مقاومت الکتریکی بار با مقاومت الکتریکی داخلی ماژول برابر باشد[۲۴،۲۲]. حتی، در استفاده عملی از ماژول‌ها، همواره، سعی می‌شود تا با انتخاب آرایش‌های سری و موازی بین ماژول‌ها شرایط بالانس مقاومت الکتریکی تا حد امکان ایجاد شود. توان الکتریکی خروجی ماژول عبارت است از:

$$P_o = \frac{V_o^2}{R_L} \quad (۲)$$

که (V_o) ولتاژ خروجی ماژول در حالت اتصال به بار یا مقاومت خارجی (R_L) است. حداکثر مقدار P_o زمانی رخ خواهد داد که بالانس مقاومت الکتریکی برقرار باشد. در این حالت ولتاژ خروجی ماژول در حالت اتصال به بار برابر است با [۲۲]:

$$V_o = \frac{V_{oc}}{2} \quad (۳)$$

که V_{oc} ولتاژ مدار باز ماژول است.

بنابراین، حداکثر توان خروجی ماژول برابر است با:

$$P_{o,max} = \frac{V_{oc}^2}{4R_L} \quad (۴)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، حداکثر توان خروجی از ماژول تابع درجه دوم از ولتاژ مدار باز ماژول است. به‌همین علت، در این مقاله ولتاژ مدار باز ماژول به‌عنوان مبنای مقایسه نتایج انتخاب شده است. در واقع، تغییرات مشاهده‌شده در ولتاژ مدار باز کاملاً مشابه تغییرات حداکثر توان خروجی از مدار است. در ماژول‌های ترموالکتریک ولتاژ مدار باز و به‌تبع آن حداکثر توان الکتریکی تولیدی توسط ماژول کاملاً به اختلاف دمای دو طرف سرد و گرم ماژول بستگی دارد. دمای طرف گرم ماژول با تغییر دما و دبی گاز گرم و همچنین، تغییر ضریب انتقال حرارت همرفتی که خود تابعی از دما و دبی گاز است تغییر خواهد کرد.

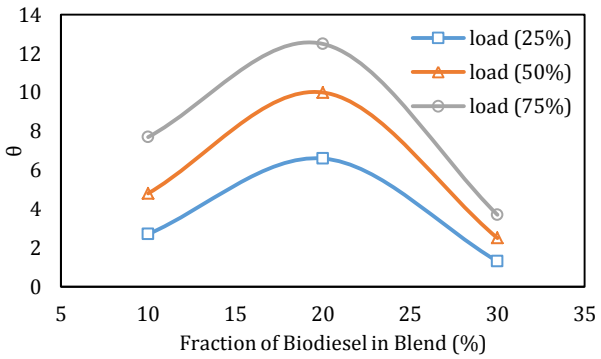

Figure 6- Effect of fraction of biodiesel in blend on open circuit voltage of the thermoelectric module in contact with exhaust gases

شکل ۶- تأثیر درصد بیودیزل در مخلوط سوخت بر ولتاژ مدار باز ماژول ترموالکتریک در تماس با گازهای خروجی اگزوز

در صورتی‌که شرایط خنک‌کاری ماژول در طرف سرد آن ثابت بماند (که در این تحقیق نیز این‌گونه است) می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که تغییر در ولتاژ مدار باز تولیدی به‌خاطر تأثیر بیودیزل بر شرایط انتقال حرارت (اعم از دمای گاز، دبی گاز و ضریب انتقال حرارت همرفت) در سمت گرم ماژول بوده است. همان‌طور که در شکل۶ پیداست، در مخلوط ۲۰ درصد بیودیزل (B20)، میزان حرارت بازیافت‌شده از اگزوز به بیشترین حد رسیده است.

مقادیر ثبت‌شده برای دمای گازهای خروجی از اگزوز نیز نشان می‌دهد که مخلوط B20 بیشترین دما را در اگزوز ایجاد می‌کند (جدول ۴). البته، همان‌طور که پیشتر به آن اشاره شد و در برخی مراجع صراحتاً به آن تأکید شده است، علاوه‌بر دما،

www.SID.ir

Archive of SID

میزان دبی گازهای خروجی از اگزوز و همچنین، ضریب انتقال حرارت همرفتی در مجرای اگزوز نیز، بر میزان حرارت بازیافت‌شده مؤثر است. اما، با توجه به رفتار مشابهی که بین ولتاژ تولیدی و دمای گازهای اگزوز دیده می‌شود، می‌توان چنین استنتاج کرد که اثر دمای گازهای خروجی اگزوز نقش غالب دارد. نکته مهم قابل توجه این که در مرجع [۱۸] اشاره شده که با افزایش درصد بیودیزل پتانسیل بازیافت حرارت تلف‌شده از موتور کاهش خواهد یافت. اما، از آنجا که در این مرجع تنها سوختهای B50 و B100 بررسی شده، چنین نتیجه‌گیری حاصل شده است. این در حالی است که نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که با افزایش درصد بیودیزل در مخلوط سوخت تا ۲۰ درصد، پتانسیل بازیافت حرارت از اگزوز افزایش خواهد یافت و با بیشتر شدن سهم بیودیزل، این پتانسیل رو به کاهش خواهد رفت از آنجا، که در ساختار مولکولی بیودیزل نسبت به دیزل معمولی اکسیژن اضافی وجود دارد، افزایش نسبتاً کم بیودیزل به سوخت دیزل معمولی می‌تواند باعث بهبود فرایند احتراق شود. اما، افزایش بیش از حد بیودیزل در مخلوط سوخت باعث افزایش نسبی لزجت سوخت و به‌تبع آن تأثیر نامطلوب بر اتمیزاسیون سوخت و احتراق می‌شود.

جدول ۴. دمای گازهای خروجی از اگزوز در بارهای مصرفی مختلف (برحسب ℃)

Table 3- Exhaust gas temperature at different loads (in℃)

Blend	Engine Load		
	25%	50%	75%
B0 (Diesel Fuel)	162	211	360
B10	168	220	365
B20	181	243	390
B30	170	226	372

در ادامه، تأثیر میزان درصد بیودیزل در مخلوط سوخت بر ولتاژ مدار باز بازیاب ترموالکتریک نصب‌شده بر روی سامانه خنک‌کننده موتور بررسی و نتایج در شکل ۷ رسم شده است.

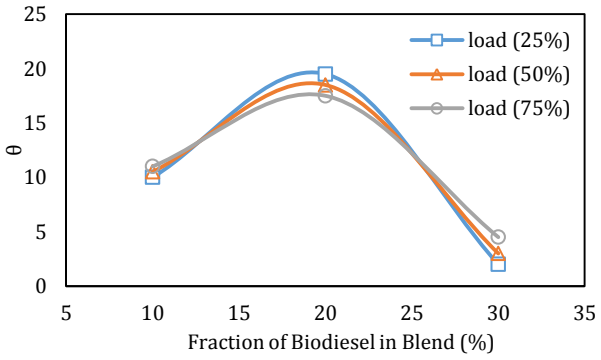

Figure 7- Effect of fraction of biodiesel in blend open circuit voltage of the thermoelectric module in contact with coolant

شکل ۷- تأثیر درصد بیودیزل در مخلوط سوخت بر ولتاژ مدار باز ماژول ترموالکتریک در تماس با سامانه خنک‌کننده موتور

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، باز هم در مخلوط ۲۰ درصد بیودیزل (B20) درصد تغییر در ولتاژ مدار باز و به‌تبع آن حداکثر توان تولیدی به بیشینه خود رسیده است. این در حالی است، که در مرجع [۱۸] اشاره شده که در سیستم خنک کننده رفتار معین و مشخصی قابل تعریف نیست.

ذکر این نکته لازم است که در تحقیق حاضر مشاهده شد تأثیر بار مصرفی بر پتانسیل بازیافت حرارت از سیستم خنک‌کننده در درصدهای مختلف بیودیزل کمی متفاوت است. نتایج نشان داد که افزایش درصد بیودیزل می‌تواند حرارت بازیافتی از سیستم خنک‌کننده را بسته به میزان بار مصرفی و درصد بیودیزل بین ۳ تا ۲۰ درصد نسبت به سوخت دیزل

www.SID.ir

Archive of SID

افزایش دهد. این در حالی است که حرارت بازیافتی از اگزوز را ۲ تا ۱۲ درصد (بسته به میزان بار مصرفی) افزایش داده است. علت این امر شاید به‌دلیل استفاده از بلوک مبادله‌کننده آبی در سیستم بازیافت ترموالکتریک به‌جای سیستم گازی باشد. بدیهی است بازده حرارتی بلوک مبادله‌کننده آبی بالاتر بوده و پاسخ حرارتی بهتری به تغییر شرایط از خود نشان می‌دهد. اما، باید توجه داشت که میزان توان بازیافت‌شده از سیستم خنک‌کاری، در مجموع، به‌مراتب، کمتر از اگزوز است که علت آن هم کمتر بودن دمای سیستم خنک‌کاری موتور نسبت به اگزوز است.

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر درصد بیودیزل در مخلوط سوخت بر پتانسیل بازیافت حرارت از اگزوز و همچنین، از سیستم خنک‌کاری موتور بررسی شد. این تحقیق، با هدف تکمیل نتایج ارائه شده در مرجع [۱۸]، برای درصدهای نسبتاً کم بیودیزل در مخلوط سوخت، که از نظر استفاده کاربردی مقبولیت بیشتری نیز دارند، انجام شد. بدین‌منظور، تأثیر مخلوط‌های B10، B20 و B30 مطالعه شد. در این پژوهش، از مولدهای ترموالکتریک تک‌ماژوله برای مطالعه و مقایسه پتانسیل بازیافت حرارت استفاده شد. مهم‌ترین نتایج این تحقیق را می‌توان در قالب موارد زیر خلاصه کرد:

- با افزایش درصد بیودیزل در مخلوط سوخت تا ۲۰ درصد، پتانسیل بازیافت حرارت در اگزوز و در سامانه خنک‌کننده موتور افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر درصد بیودیزل، این روند تغییر کرده و سیر نزولی خواهد داشت. بنابراین، می‌توان گفت که نتیجه ارائه‌شده در مرجع [۱۸]، مبنی‌بر اینکه با افزایش درصد بیودیزل در سوخت پتانسیل بازیافت حرارت کاهش می‌یابد، برای درصدهای کمتر از ۲۰ درصد درست نیست. در واقع، از آنجا که در مرجع مذکور، صرفاً، سوخت‌های B50 و B100 بررسی شده‌اند، این روند به‌خوبی نشان داده نشده است.
- بررسی‌ها نشان داد، که نحوه تأثیر بیودیزل بر بازیافت حرارت از اگزوز با روند تأثیر بیودیزل بر دمای گازهای خروجی اگزوز ازنظر رفتاری مشابهت دارد. بنابراین، می‌توان گفت که اضافه‌کردن بیودیزل به سوخت، اگرچه ممکن است بر دبی گازهای خروجی از اگزوز و همچنین، ضریب انتقال حرارت همرفتی در آن نیز، مؤثر باشد، اما این تأثیرات به‌گونه‌ای است که دمای گاز نقش غالب را خواهد داشت.
- نتایج نشان داد که افزایش درصد بیودیزل می‌تواند حرارت بازیافتی از سیستم خنک‌کننده را بسته به میزان بار مصرفی و درصد بیودیزل بین ۳ تا ۲۰ درصد نسبت به سوخت دیزل افزایش دهد. این در حالی است که حرارت بازیافتی از اگزوز را ۲ تا ۱۲ درصد (بسته به میزان بار مصرفی) افزایش داده است. علت این امر شاید به‌دلیل استفاده از بلوک مبادله‌کننده آبی در سیستم بازیافت ترموالکتریک به‌جای سیستم گازی باشد. بدیهی است، بازده حرارتی در حالت گرمایش ماژول با سیال مایع (آب) بالاتر بوده و پاسخ حرارتی بهتری به تغییر شرایط از خود نشان می‌دهد. اما، باید توجه داشت که میزان توان بازیافت‌شده از سیستم خنک‌کاری، در مجموع، به‌مراتب کمتر از اگزوز است، که علت آن هم کمتربودن دمای سیستم خنک‌کاری موتور نسبت به اگزوز است.
- براساس تغییرات ولتاژ مدار باز ماژول مولد ترموالکتریک در حالت استفاده از مخلوط سوخت B20، پیش‌بینی می‌شود، که بیشینه توان الکتریکی تولیدی از ماژول در این حالت نسبت به سوخت دیزل معمولی تا حدود ۲۵ درصد افزایش یابد.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از آقای مهندس فتح‌الله بحرینی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، به‌خاطر زحمات زیادی که در تولید سوخت بیودیزل کشیدند و همچنین، از آقای حسین هنرور، مسئول آزمایشگاه موتور و احتراق دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضای دانشگاه صنعتی شیراز، صمیمانه قدردانی می‌شود. از بخش تحقیق و توسعه مجموعه پالایشگاهی جم نیز، به‌خاطر همکاری در آزمون ویژگی‌های بیودیزل تولیدشده، تشکر و قدردانی می‌شود.

www.SID.ir

Archive of SID

منابع

1. M. Hatami, D. D. Ganji, M. Gorji-Bandpey, "A review of different heat exchangers designs for increasing the diesel exhaust waste heat recovery*," Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 2014, pp. 168-181.
2. M. S. Wei, J. Fang, C. C. Ma, S. N. Danish, "Waste heat recovery from heavy-duty diesel engine exhaust gases by medium temperature ORC system," *Science China Technological Science*, 54, 2011, pp. 2746-2753.
3. S. Bari, S. N. Hossain, "Waste heat recovery from a diesel engine using shell and tube heat exchanger," *Applied Thermal Engineering*, 61, 2013, pp. 355-363.
4. T. Chen, W. Zhuge, Y. Zhang, L. Zhang, "A novel cascade organic Rankine cycle (ORC) system for waste heat recovery of truck diesel engines," *Energy Conversion and Management*, 138, 2017, pp. 210-223.
5. J. H. Meng, X. D. Wang, W. H. Chen, "Performance investigation and design optimization of a thermoelectric generator applied in automobile exhaust waste heat recovery," *Energy Conversion and Management*, 120, 2016, pp. 71-80.
6. T. Wang, W. Luan, T. Liu, S. T. Tu, J. Yan, "Performance enhancement of thermoelectric waste heat recovery system by using metal foam inserts," *Energy Conversion and Managemen*t, 124, 2016, pp. 13-19.
7. M. E. Demir, I. Dincer, "Performance assessment of a thermoelectric generator applied to exhaust waste heat recovery," *Applied Thermal Engineering*, 120, 2017, pp.694-707.
8. B. Orr, A. Akbarzadeh, P. Lappas, "An exhaust heat recovery system utilizing thermoelectric generators and heat pipes," *Applied Thermal Engineering*, 126, 2017, pp. 1158-1190.
9. W. He, S. Wang, "Thermoelectric performance optimization when considering engine power loss caused by back pressure applied to engine exhaust waste heat recovery," *Energy*, 133, 2017,pp. 584-592.
10. A. A. Negash, T. Y. Kim, G. Cho, "Effect of electrical array configuration of thermoelectric modules on waste heat recovery of thermoelectric generator," *Sensors and Actuators A: Physical*, 260, 2017, pp. 212-219.
11. B. Orr, A. Akbarzadeh, "Prospects of waste heat recovery and power generation using thermoelectric generators," *Energy Procedia*, 110, 2017, pp. 250-255.
12. T. Y. Kim, A. Negash, G. Cho, "Experimental and numerical study of waste heat recovery characteristics of direct contact of thermoelectric generator," *Energy Conversion and Management*, 140, 2017, pp. 273-280.
13. F. Meng, L. Chen, Y. Feng, B. Xiong, "Thermoelectric generator for industrial gas phase waste heat recovery," *Energy*, 135, 2017, pp. 83-90.
14. S. Lan, Z. Yang, R. Chen, R. Stobart, "A dynamic model for thermoelectric generator applied to vehicle waste heat recovery," *Applied Energy*, 210, 2018, pp. 327-338.
15. S. Chinguwa, C. Musora, T. Mushiri, "The design of portable automobile refrigerator powered by exhaust heat using thermoelectric," *Procedia Manufacturing*, 21, 2018, pp. 741-748.
16. S. Murillo, J. L. Miguez, J. Porterio, E. Granada, J. C. Moran, "Performance and exhaust emissions in the use of biodiesel in outboard diesel engines," *Fuel*, 86, 2007, pp. 1765-1771.
17. A. Zenouzi, B. Ghobadian, T. Tavakouli Hashjin, M. Feiz Elahnezhad, H. Bagherpour, "Effect of the blends of diesel and biodiesel made from waste cooking oil on compression ignition engine (CI) performance," *Fuel and Combustion*, 1, No.1, 2008, pp. 53-59. (in Persian)
18. A. Magno, E. Mancaruso, B. M. Vaglieco, "Effects of both blended and pure biodiesel on waste heat recovery potentiality and exhaust emissions of a small CI (compression ignition) engine," *Energy*, 86, 2015, pp. 661-671.
19. J. Jeon, S. Park, "Effect of injection pressure on soot formation/ oxidation characteristics using a two-color photometric method in a compression-ignition engine fueled with biodiesel blend (B20)," *Applied Thermal Engineering*, 131, 2018, pp. 284-294.
20. M. Saidi Neicharan, B. Ghobadian, G. Najafi, "Experimental investigation of a diesel engine performance parameters using biodiesel fuel," *Journal of Engine Research*, 16, 2009, pp.29-36. (in Persian)
21. M. Gülüm, A. Bilgin, "Density, flash point and heating value variations of corn oil biodiesel-diesel fuel blends," *Fuel Processing Technology*, 134, 2015, pp. 456-464.
22. N. Sugiarthe, P. Satra Negara, "Technical feasibility evaluation on the use of a Peltier thermoelectric module to recover automobile exhaust heat," *Journal of Physics: Conf. Series*, 953, 2018, 012090.
23. http://peltiermodules.com/peltier.datasheet/TEC1-12706.pdf, Visited on 20 July 2018.
24. S. Punnachaiya, P. Kovitchcharoenkul, D. Tong-aram, "Development of low grade waste heat thermoelectric power generator," *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 32, 2010, pp. 307-313.

www.SID.ir

Archive of SID

English Abstract

Experimental investigation on the effect of diesel-biodiesel blends on waste heat recovery capability of a small power generator

Amir Omidvar
Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran,
omidvar@sutech.ac.ir

(Received: 2018.5.18, Received in revised form: 2018.6.20, Accepted: : 2018.8.29)

In diesel engines, a significant part of extracted energy from fuel combustion is lost through exhaust and engine coolant system. The use of biofuels can affect the heat recovery of the engine. According to the results of a recent research, the quantity and quality of heat recovered by exhaust gas decreases by increasing the percentage of biodiesel in blend. In the mentioned study, only pure biodiesel fuel and a mixture of 50% biodiesel with conventional diesel have been investigated. While, it is usually recommended to use blends less than 20% biodiesel in standards. In this paper, the potentiality of waste heat recovery of a small power generator has been investigated for B10, B20 and B30 and compared with custom pure diesel fuel. For this purpose, a single module thermoelectric generator (TEG) was used. Results showed that the effect of biodiesel on the waste heat recovery potential of the engine has not a monotonic decreasing trend. As the biodiesel volume increases by up to 20%, the waste heat recovery potentiality increases. Further increasing of biodiesel fraction in blend reduces the potential of heat recovery. The highest potential for heat recovery was found for blend of B20. Single-module based experiment results showed that the use of the B20 mixture in comparison with conventional diesel fuel can increase the module's open circuit voltage up to 12% and consequently increase the maximum output power of the module by 25%.

Keywords: Biodiesel, Heat Recovery, Thermoelectric Generator

www.SID.ir