

اثر جایگزینی بیودیزل بر انتشار آلاینده ها در کوره های صنعتی

سعید باغدار حسینی^{۱*}، ناصح حسینی^۲، کاظم بشیرنژاد^۳، حمید ممهدی هروی^۴

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، گروه مهندسی مکانیک، مشهد، ایران

*hosseinisb@mshdiau.ac.ir

چکیده

استفاده از سوخت های تجدید پذیر بویژه بیودیزل یکی از راهکارهای کاهش مصرف سوخت های فسیلی و انتشار آلاینده ها در موتورهای دیزل، می باشد. بیودیزل سوختی پاک و تجدید پذیر است که دارای خواصی شبیه گازوئیل می باشد. در این تحقیق تأثیر استفاده از بیودیزل بر دمای گازهای خروجی و انتشار آلاینده ها در یک کوره آزمایشگاهی بررسی شده است. بیودیزل استفاده شده از روغن پسماند خوراکی فرآوری شده که مخلوط های مختلفی از آن با گازوئیل، مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمایشات در نسبت هوای اضافی ۰/۸ تا ۲ صورت گرفته است. نتایج نشان می دهد با اضافه شدن درصد حجمی بیودیزل در مخلوط سوختی، دمای گازهای خروجی از کوره افزایش یافته است. همچنین مشاهده می شود که انتشار آلاینده های CO و SO₂ بهبود یافته است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می دهد بیودیزل جایگزین مناسبی برای گازوئیل در کوره ها می باشد که از منابع تجدید پذیر به دست آمده و اثرات آلودگی کمتری دارد.

واژه های کلیدی: احتراق، آلاینده، بیودیزل، گازوئیل، روغن پسماند

۱- مقدمه

وابستگی شدید جوامع به سوخت های فسیلی و تأثیرات مخرب آلودگی آنها را می توان با استفاده از سوخت های تجدید پذیر با پایه گیاهی مانند بیودیزل کاهش داد. در سال های اخیر توجه زیادی به بیودیزل در بخش های مختلف صنعت به ویژه حمل و نقل، سیستم های گرمایشی و سایر فرایندهای صنعتی شده است. بیودیزل به استرهای منوالکیل با زنجیره های بلند اسید چرب که از انواع روغن های گیاهی و چربی های حیوانی طی فرآیندی موسوم به ترانس استریفیکاسیون (transesterification) تولید می شوند، اطلاق می گردد. محصول فرعی این فرآیند گلیسرول می باشد که در صنایع آرایشی و بهداشتی کاربرد دارد [۱]. خواص بیودیزل و گازوئیل شماره ۲ بسیار شبیه هم می باشد. مهمترین تفاوت اساسی آنها، محتوای اکسیژن بیودیزل است. این سوخت حاوی ۱۰ تا ۱۲ درصد وزنی اکسیژن می باشد. این امر سبب شده است تا ارزش حرارتی آن و همچنین انتشار ذرات معلق کاهش یابد. علاوه بر این بیودیزل غیر آروماتیک و عاری از گوگرد می باشد که این امر منجر به کاهش انتشار اکسیدهای گوگرد و دوده می گردد [۲]. چگالی و عدد ستان بیودیزل بیشتر از گازوئیل بوده و ویسکوزیته سینماتیکی آن نیز به دلیل جرم مولکولی زنجیره های طولانی، بیشتر است. نقطه اشتعال بیودیزل نسبت به گازوئیل بالاتر می باشد ولی نقطه ابری شدن آن پایین تر است که استفاده از آن را در مناطق سردسیر محدود می کند [۳]. مطالعات زیادی پیرامون خصوصیات احتراقی و انتشار آلاینده های بیودیزل در موتور های احتراقی صورت گرفته است [۴-۹] ولی توجه کمی

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی، باشگاه پژوهشگران جوان دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، گروه مهندسی مکانیک، مشهد، ایران

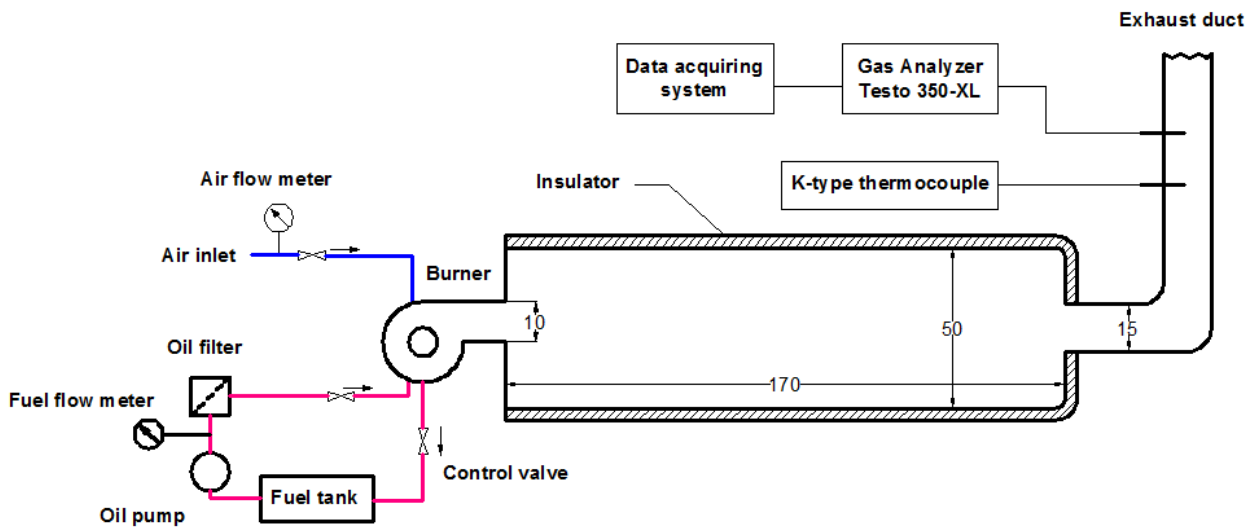
۳- عضو هیئت علمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، گروه مهندسی مکانیک، مشهد، ایران

۴- عضو هیئت علمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، گروه مهندسی مکانیک، مشهد، ایران

به احتراق بیودیزل در کوره ها و دیگ های بخار شده است. نتایج تحقیقات نشان می دهد که تأثیر احتراق بیودیزل بر انتشار آلاینده ها به عوامل متنوعی از جمله نوع سیستم احتراقی و شرایط آزمایشگاهی بستگی دارد. تاشتوش و همکارانش [۱۰] عملکرد احتراق و انتشار آلاینده های متیل استر روغن پسماند در داخل یک کوره را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که دمای احتراق بیودیزل نسبت به احتراق گازوئیل افزایش یافته است ولی مقدار انتشار آلاینده NO_x ، CO و SO_2 کاهش یافته است. مقدار انتشار آلاینده CO_2 نسبتاً ثابت مانده است. لاپورتا و همکارانش [۱۱] بر روی تأثیر سوخت بیودیزل بر روی آلاینده های موتور مطالعه نمودند. آنها پارامترهای مختلفی از جمله مصرف سوخت و بازده حرارتی را بررسی نمودند. نتایج نشان می داد که هنگام استفاده از بیودیزل، میزان آلاینده های کربن دار کاهش یافته است در حالیکه مقدار اکسیدهای ازت اندکی افزایش یافته است. انتشار ذرات معلق نیز کاهش یافته است. ماکرو و پاولو [۱۲] عملکرد و انتشار آلاینده های احتراق بیودیزل در یک دیگ بخار را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آنها آلاینده های CO ، SO_2 ، NO_x ، ذرات معلق، هیدروکربن های آروماتیک حلقوی و ترکیبات آلی فرار را اندازه گیری کردند. نتایج آنها کاهش بسیار زیادی در انتشار آلاینده CO و ذرات معلق را برای بیودیزل نسبت به روغن حرارتی نشان می داد. علاوه بر این مقادیر انتشار ترکیبات آلی فرار کاهش یافته است. ولی میزان انتشار آلاینده SO_2 با توجه به اینکه بیودیزل حاوی اندکی گوگرد می باشد و روغن حرارتی فاقد آن است، افزایش یافته است. آنها نتیجه گیری کردند که می توان از بیودیزل در مصارف خانگی و فرآیندهای صنعتی استفاده نمود. هوت کیات و سوین گان [۱۳] عملکرد احتراقی و انتشار آلاینده های احتراق مخلوط بیودیزل روغن خرما را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد با افزایش درصد حجمی بیودیزل در مخلوط سوخت میزان انتشار آلاینده مونوکسید کربن کاهش یافته است، در حالیکه میزان انتشار اکسیدهای ازت افزایش یافته است. در این تحقیق، تأثیر احتراق مخلوط های مختلف سوخت گازوئیل و بیودیزل با درصدهای مختلف صفر تا چهل درصد حجمی ($B0$, $B10$, $B20$, $B30$, $B40$) بر دمای گازهای خروجی و انتشار آلاینده ها مورد بررسی قرار گرفته است. بیودیزل استفاده شده از روغن های پسماند خوراکی فرآوری شده است. با توجه به اینکه تاکنون در خصوص تأثیر سوخت جدید بیودیزل در احتراق وسایل غیرنقلیه تحقیقات کمی در کشور انجام شده است، اهمیت تحقیق حاضر بیشتر نمود می یابد.

۲- تجهیزات آزمایشگاهی

جهت بررسی پارامترهای احتراقی سوخت بیودیزل و گازوئیل از یک کوره آزمایشگاهی به شکل استوانه افقی با طول ۱۸۰ سانتی متر و قطر ۳۶ سانتی متر استفاده شده است. بدنه کوره از فولاد AISI 316 ساخته شده که در دماهای بالا مقاوم می باشد. سطح داخلی کوره کاملاً صیقلی است تا هیچ گونه مقاومتی در مقابل گازهای داغ بوجود نیاید. اطراف کوره توسط عایق حرارتی از جنس پشم سنگ ۱۲۶۰ به ضخامت ۴۰ mm پوشیده شده است. کوره به مشعلی مایع سوزی با توان ۲۴۰ W مجهز شده است که سوخت را با دبی ۴/۵ lit/hr از منبع سوخت دریافت کرده و با زاویه ۶۰ درجه تحت فشار ۱۴ بار به داخل کوره پاشش می کند. دبی سوخت ورودی توسط دبی سنج Satronic SOG960 و سرعت هوای ورودی به مشعل نیز توسط یک سرعت سنج دیجیتال پروانه ای Hotek AM 4206 اندازه گیری شده است. از یک ترموکوپل تیپ R برای اندازه گیری دما گازهای احتراق استفاده شده است. جهت اندازه گیری دما و آلاینده های احتراق از دستگاه آنالیزور گاز Testo 350-XL استفاده شده است که خصوصیات عملکرد آن و سایر وسایل اندازه گیری در جدول ۱ ارائه شده است. در این تحقیق از سوخت بیودیزل که بر پایه روغن های گیاهی پسماند تولید می شود، استفاده شده که نتایج حاصل با سوخت گازوئیل مقایسه گردیده است. مشخصات سوخت های مورد آزمایش در جدول شماره ۲ ارائه شده است. شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- شماتیک تجهیزات آزمایشگاهی

جدول ۱- خصوصیات عملکرد دستگاه اندازه گیری

وسيله اندازه گيری	واحد	دامنه	دقت	صحت
دبی سنج دیجیتال هوا Hotek AM 4206	m/s	۰/۴ - ۲۵	۰/۱	± ۲
دبی سنج سوخت Satronic SOG960	lit/hr	۱ - ۴۰	± ۰/۰۱	± ۲/۵
ترموکوپل تیپ R	°C	۰ - ۱۸۰۰	± ۱	± ۱/۱
سنسور O ₂	%	۰ - ۲۵	± ۰/۱	± ۰/۲
سنسور CO ₂	%	۰ - ۲۰	± ۰/۱	± ۲
سنسور CO	ppm	۰ - ۱۰,۰۰۰	± ۱	± ۲
سنسور SO ₂	ppm	۰ - ۵,۰۰۰	± ۱	± ۲
سنسور NO	ppm	۰ - ۳,۰۰۰	± ۱	± ۲
سنسور NO ₂	ppm	۰ - ۵۰۰	± ۰/۱	± ۲

جدول ۲ - خواص سوخت گازوئیل و بیودیزل

خصوصیت	واحد	استاندارد ASTM	گازوئیل	بیودیزل خالص
چگالی در دمای ۱۵ °C	g/cm ³	D4052	۰/۸۱۵	۰/۸۸
ویسکوزیته سینماتیکی در دمای ۴۰ °C	Cst	D445	۲/۵۴	۴/۷۹
ارزش حرارتی	MJ/kg	D240	۴۲/۵	۳۸/۷
عدد ستان	-	D613	۵۷/۳	۶۲
نقطه اشتعال	°C	D93	۶۱	۱۴۷
نقطه ابری شدن	°C	D2500	-۴	-۳/۲
کربن	%	D6548	۸۵/۰۵	۷۷
هیدروژن			۱۴/۹	۱۲/۵
اکسیژن			۰	۱۰/۵
گوگرد			۰/۰۵	۰

۳- شرایط آزمایش

هوای لازم برای احتراق به صورت محوری پس از عبور از سرعت سنج دیجیتالی وارد مشعل شده و پس از عبور از شعله پخش کن به صورت جریان گردابه ای وارد ناحیه شعله می گردد. تمامی آزمایشات، اندازه گیری دما و آلاینده ها در شرایط پایا و یکنواخت صورت گرفته است. برای اطمینان از صحت نتایج، هر آزمایش سه مرحله تکرار شده است. آزمایشات در نسبت هوای اضافی مختلفی که توسط رابطه زیر تعریف می گردد، صورت گرفته است [۱۴]:

$$\lambda = ExcessAir = \frac{100 \times [O_2] \times [CO] / 2}{0.2682 \times \left(100 - [O_2] - [CO_2] - [CO] - [O_2] + [CO] / 2 \right)} \quad (1)$$

۴- عدم قطعیت

در این پژوهش ابتدا برای هر نقطه، سه داده آزمایشگاهی جمع آوری شده است و سپس میانگین حسابی داده ها محاسبه و به عنوان داده نهائی آزمایشگاهی استفاده می شود. مقدار خطای احتمالی یا عدم قطعیت داده ها از فرمول زیر محاسبه شده است [۱۵ و ۱۶].

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{n^{0.5}} \quad (2)$$

در این فرمول σ_m انحراف معیار مقدار میانگین و σ انحراف معیار مجموعه اندازه گیریها و n تعداد اندازه گیریها در هر نقطه می باشد. با توجه به اینکه برای کلیه نتایج تجربی n عدد ۳ می باشد. فرمول فوق به صورت زیر در تحلیل نتایج تجربی استفاده شده است.

$$\sigma_m = 0.577\sigma \quad (3)$$

انحراف معیار مجموعه اندازه گیری ها به صورت زیر محاسبه می شود.

$$\sigma = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

مقدار درصد عدم قطعیت (x) داده های آزمایشگاهی از رابطه زیر محاسبه شده است.

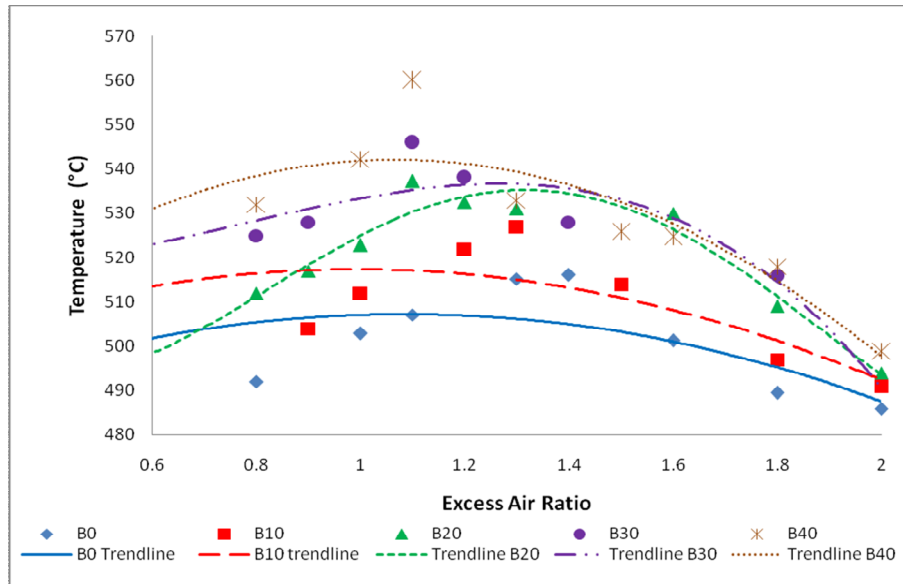
$$x = 100 \sigma_m / \bar{x} \quad (5)$$

که در آن \bar{x} مقدار میانگین حسابی داده های آزمایشگاهی می باشد.

۵- نتایج و بحث

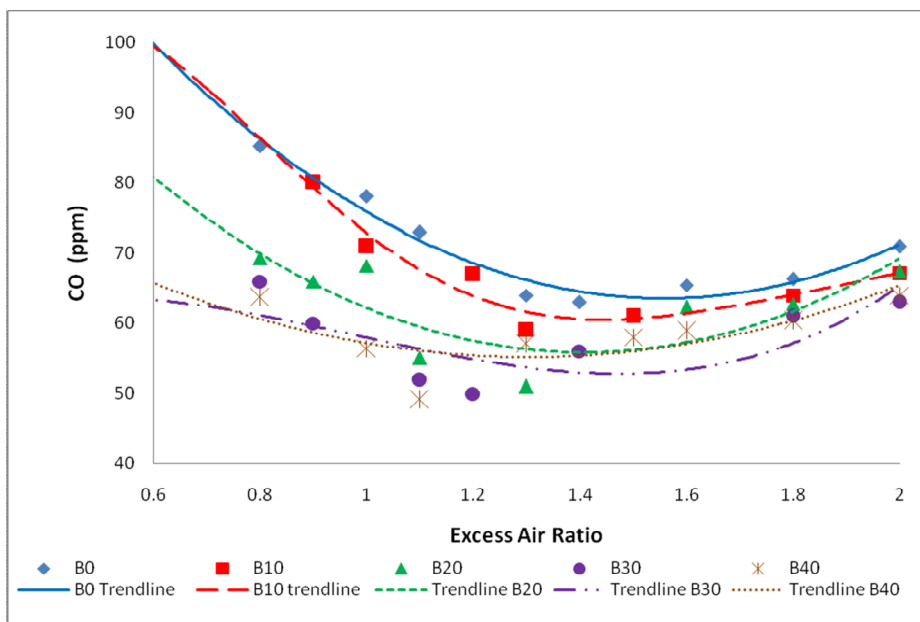
شکل ۲ نتایج آزمایشگاهی تأثیر استفاده از سوخت بیودیزل بر روی دمای گازهای خروجی حاصل از احتراق را در نسبت های هوای اضافی متنوع نشان می دهد. مشاهده می شود با افزایش درصد حجمی سوخت بیودیزل از ۰ تا ۴۰٪، دمای گازهای حاصل از احتراق افزایش می یابد. زنجیره طولیل هیدروکربنی بیودیزل و وجود اکسیژن در مخلوط سوختی منجر به بهبود احتراق، افزایش راندمان حرارتی و در نتیجه افزایش دما می شود [۱۰ و ۱۳]. علاوه بر این مشاهده می شود که دمای ماکزیمم محصولات احتراق برای تمامی مخلوط های سوختی در نسبت هوای بزرگتر از ۱ رخ می دهد. با افزایش هوای اضافی اختلاط سوخت و هوا بهبود یافته و احتراق به سمت کامل شدن میل می کند که این امر منجر به افزایش دما می گردد و سپس با بیشتر شدن نسبت هوای اضافی دما کاهش می یابد. در این شرایط هوای اضافی مانند یک چاه حرارتی عمل کرده و دمای

گازهای حاصل از احتراق را کاهش می دهد [۱۷ و ۱۸]. علاوه بر این، افزایش نسبت هوای اضافی از دید سرعت گازهای احتراق را به همراه دارد که این امر مدت زمان باقی ماندن گازها در محفظه احتراق برای انجام احتراق کامل را کاهش می دهد [۱۹].



شکل ۲ - تأثیر استفاده از بیودیزل بر دمای گازهای خروجی

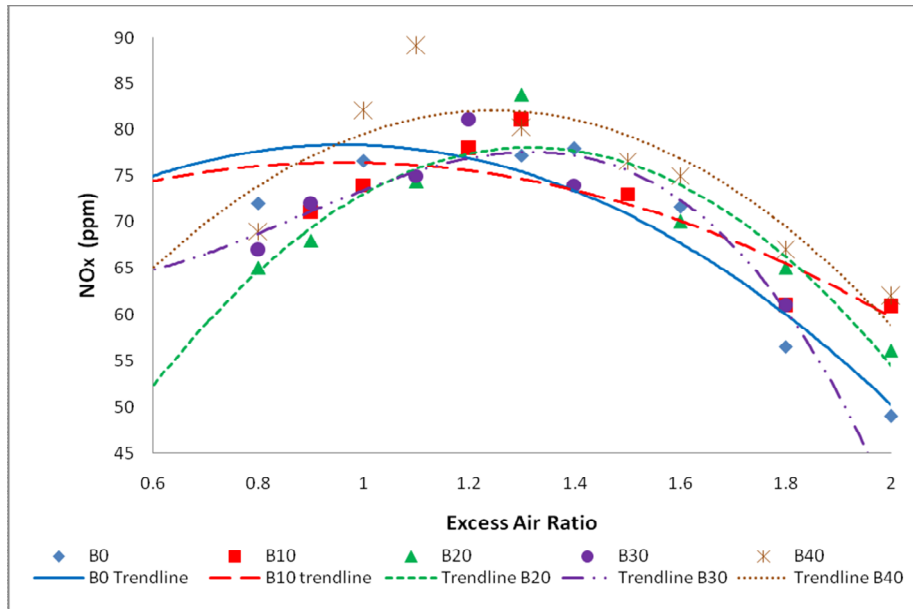
شکل ۳ اثر استفاده از سوخت بیودیزل در نسبت حجمی ۰ تا ۴۰٪ بر روی تشکیل آلاینده CO ناشی از احتراق را نشان می دهد. CO یک محصول واسطه احتراق می باشد که عمدتاً در اثر احتراق ناقص سوخت تولید می شود، احتراق ناقص در اثر کمبود هوا و یا دمای پایین گازها صورت می گیرد. اگر احتراق کامل گردد، CO به CO₂ تبدیل می شود. معمولاً بیشترین انتشار آلاینده CO ناشی از احتراق گازوئیل در مخلوط های غنی اتفاق می افتد و با افزایش بیش از حد هوا که طی آن مخلوط فقیر می گردد، میزان انتشار CO کاهش می یابد. استفاده از بیودیزل منجر به کاهش تولید این آلاینده شده است زیرا بیودیزل حاوی اکسیژن در ترکیب خود می باشد که منجر به کامل شدن احتراق و تأمین اکسیژن لازم جهت تبدیل CO به CO₂ می گردد [۲۰ و ۲۱]. با افزایش درصد وزنی اکسیژن در مخلوط سوخت، بهبود احتراق و افزایش دما، اکسیژن کافی و همچنین انرژی مناسب جهت واکنش اکسیداسیون CO به CO₂ وجود دارد، لذا میزان CO تولیدی با افزایش درصد حجمی بیودیزل در مخلوط سوختی کاهش می یابد [۲۰]. علاوه بر این مشاهده می شود با افزایش نسبت هوای اضافی، تولید و انتشار CO کاهش می یابد تا به مقدار مینیمم خود می رسد سپس به مقدار بسیار کمی افزایش می یابد. افزایش نسبت هوای اضافی موجب بهبود اختلاط سوخت و هوا و بهبود احتراق شده که واکنش تبدیل CO به CO₂ را تسریع می کند و غلظت CO کاهش می یابد، این روند تا انجام احتراق کامل سوخت و هوا ادامه می یابد [۱۰، ۲۲ و ۲۳]. با افزایش بیشتر نسبت هوای اضافی غلظت CO به مقدار بسیار کمی افزایش می یابد زیرا افزایش دبی هوا و بالطبع افزایش سرعت گازهای احتراق، زمان ماند واکنش دهنده ها در محفظه احتراق برای انجام واکنش کامل را کم می کند [۱۵ و ۱۹].



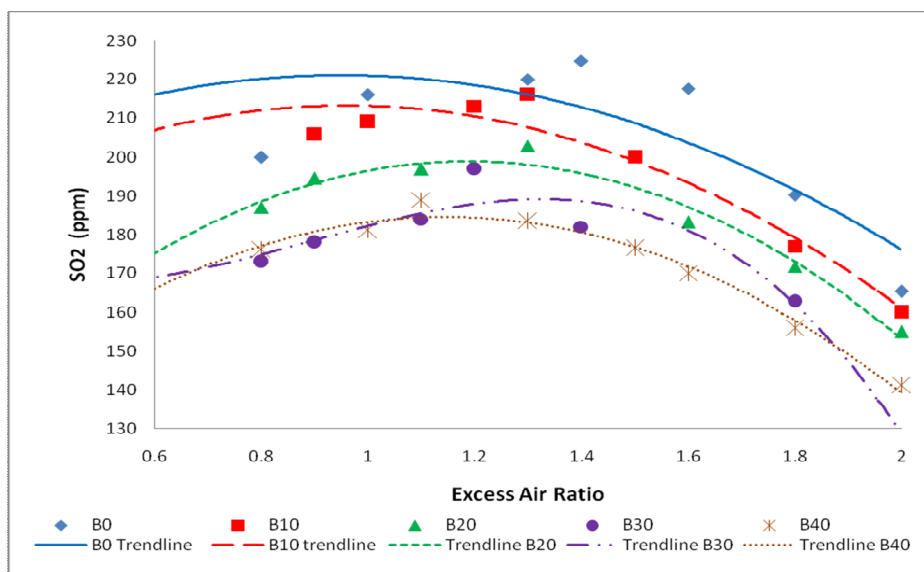
شکل ۳ - تأثیر استفاده از بیودیزل بر انتشار CO

می دانیم نیتروژن یک گاز بی اثر می باشد که تا دمای 1100°C بدون واکنش باقی می ماند ولی در دماهای بالاتر بی اثر نمانده، وارد واکنش شیمیایی با اکسیژن موجود در محفظه شده و تشکیل اکسیدهای ازت می دهد. این فرآیند در دماهای حدود 1500°C اتفاق می افتد [۲۱]. اثر استفاده از سوخت بیودیزل بر تولید آلاینده NO_x در شکل ۴ نشان داده شده است. با افزایش درصد حجمی بیودیزل به گازوئیل و تولید سوخت های بیودیزل B10 تا B40 دمای احتراق افزایش می یابد و احتراق نیز بهبود خواهد یافت، از طرفی محتوای اکسیژن موجود در سوخت نیز افزایش می یابد. می دانیم که مکانیزم غالب در تولید آلاینده NO_x بویژه در دماهای بالا مکانیزم حرارتی زلاوویچ می باشد [۲۴]. لذا با افزایش درصد حجمی سوخت بیودیزل در مخلوط سوختی پارامترهای مؤثر برای تولید آلاینده NO_x یعنی دمای بالا و اکسیژن کافی فراهم شده و تولید این آلاینده افزایش می یابد [۲۰]. عدد ستان بیودیزل بیشتر از گازوئیل می باشد، لذا انتظار می رود که احتراق بهبود یافته و انتشار آلاینده NO_x کاهش یابد. ولی انتشار آلاینده NO_x افزایش می یابد زیرا خواص ترموفیزیکی بیودیزل مانند چگالی که بر روی پاشش سوخت تأثیرگذار است، موجب افزایش انتشار این آلاینده می شود [۲۵]. مقدار ماکزیمم آلاینده NO_x در احتراق گازوئیل ۷۸ ppm می باشد که در احتراق بیودیزل B20 این مقدار ماکزیمم به ۸۴ ppm و در احتراق بیودیزل B40 به ۸۹ ppm رسیده است. نمودار ذیل نشان می دهد که بهبود احتراق و افزایش دما باعث افزایش ۸ و ۱۴٪ انتشار آلاینده NO_x گردیده است. علاوه بر این نتایج نشان می دهد که در تمامی اعداد چرخش، با افزایش نسبت هوای اضافی نرخ تولید NO_x تا یک مقدار افزایش و سپس کاهش می یابد. شکل ۵ تأثیر استفاده از سوخت بیودیزل بر روی آلاینده SO_2 را نشان می دهد. ملاحظه می شود با افزایش درصد حجمی بیودیزل خالص در مخلوط سوخت از ۰ تا ۴۰٪ میزان آلاینده تولید شده SO_2 کمتر می شود. بیودیزل خالص عاری از هرگونه گوگرد می باشد، لذا مخلوط کردن آن با گازوئیل منجر به کاهش محتوای گوگرد کل مخلوط می گردد و در نتیجه در اثر محترق شدن این مخلوط سوختی میزان دی اکسید گوگرد تولیدی کاهش خواهد یافت [۱۰]. مقدار گونه های گوگرد دار در بیودیزل B20 با توجه به اینکه تنها ۲۰ درصد حجمی مخلوط بیودیزل خالص است، بیشتر از بیودیزل B40 می باشد. مقدار ماکزیمم دی اکسید گوگرد تولید شده برای گازوئیل در عدد چرخش ۰/۷۲ برابر ۲۲۵ ppm می باشد که این مقدار در احتراق بیودیزل B20 و B40 به ترتیب به ۲۰۳ ppm و ۱۸۹ ppm رسیده که کاهشی برابر با ۱۰ و ۱۶٪ نسبت به گازوئیل را نشان می دهد. با افزایش نسبت هوای اضافی نرخ تولید SO_2 افزایش و سپس کاهش می یابد [۱۰]. در این شکل دیده می شود با افزایش دما که ناشی از بهبود احتراق و کامل شدن نسبی آن می باشد، SO_2 نیز افزایش می یابد، سپس با

کاهش دما مقدار انتشار این آلاینده نیز کاهش یافته است. مقدار ماکزیمم آلاینده SO_2 برای تمامی مخلوط های سوختی در نسبت هوای اضافی بزرگتر از ۱ رخ داده است.



شکل ۴ - تأثیر استفاده از بیودیزل بر انتشار NO_x



شکل ۵ - تأثیر استفاده از بیودیزل بر انتشار SO_2

۶- نتیجه گیری

در این مقاله اثر جایگزینی سوخت بیودیزل و مخلوط های آن با گازوئیل بر دمای گازهای خروجی و تولید و نشر آلاینده ها با استفاده از روش تجربی در یک کوره آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به مباحث ارائه شده، نتایج حاصله به شرح ذیل می باشد.

- با افزایش نسبت هوای اضافی ابتدا احتراق کامل شده و دمای گازهای حاصل از احتراق و انتشار آلاینده های NO_x و SO_2 افزایش یافته و سپس با بیشتر شدن مقدار هوای اضافی، کاهش می یابد.
- انتشار آلاینده CO با افزایش نسبت هوای اضافی ابتدا کاهش یافته و سپس به مقدار کمی افزایش می یابد.
- در احتراق بیودیزل، با افزایش درصد حجمی بیودیزل خالص از ۰ تا ۴۰٪ در مخلوط سوخت، دمای گازهای حاصل از احتراق افزایش می یابد در حالیکه انتشار آلاینده CO کاهش می یابد.
- با افزایش درصد حجمی بیودیزل خالص از ۰ تا ۴۰٪ در مخلوط سوخت، انتشار آلاینده NO_x افزایش می یابد، در صورتیکه انتشار آلاینده SO_2 با توجه به اینکه بیودیزل خالص عاری از ترکیبات گوگرد دار می باشد، کاهش می یابد.

مراجع

- 1- Yusuf Chisti, "Biodiesel from microalgae", Biotechnology Advances, Vol. 25, pp. 294-306, 2007.
- 2- Schuchardt U., Serchelia R., Vargas R. M., "Transesterification of Vegetable Oils: a Review", Journal of the Brazilian Chemical Society, Vol. 9, pp. 199-210, 1998.
- 3- James P. Szybist, Juhun Song, Mahabubul Alam, André L. Boehman, "Biodiesel combustion, emissions and emission control", Fuel Processing Technology, V. 88, pp. 679-691, 2007.
- 4- Jinlin Xue, Tony E. Grift, Alan C. Hansen, "Effect of biodiesel on engine performances and emissions", Renewable and Sustainable Energy Reviews, V. 15, PP. 1098-1116, 2011.
- 5- Qi D.H., Chen H., Geng L.M., Bian Y.ZH., Ren X.CH., "Performance and combustion characteristics of biodiesel-diesel-methanol blend fuelled engine", Applied Energy, V. 87, pp. 1679-1686, 2010.
- 6- Xiangmei Meng, Guanyi Chen, Yonghong Wang, "Biodiesel production from waste cooking oil via alkali catalyst and its engine test", Fuel Processing Technology, Vol.89, pp. 851-857, 2008.
- 7- Flavio Caresana, "Impact of biodiesel bulk modulus on injection pressure and injection timing. The effect of residual pressure" Fuel, Vol. 90, pp. 477-485, 2011
- 8- Tesfa B., Mishra R., Powles F. Gu. N., "Prediction models for density and viscosity of biodiesel and their effects on fuel supply system in CI engines", Renewable Energy, Vol. 35, Pages 2752-2760, 2010.
- 9- Lei Zhu C.S. Cheung W.G. Zhang, Zhen Huang, "Emissions characteristics of a diesel engine operating on biodiesel and biodiesel blended with ethanol and methanol", Science of The Total Environment, Vol. 408, pp. 914-921, 2010.
- 10- Tashtoush G., Al-Widyan M. I., Al-Shyoukh A. O., "Combustion performance and emissions of ethyl ester of a waste vegetable oil in a water-cooled furnace", Applied thermal Engineering, Vol. 23, pp. 285-293, 2003.
- 11- Lapuerta M., Armas O., Fernandez J. R., "Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 34, pp. 198-223, 2008.
- 12- Macor A., Pavanello P., "Performance and emissions of biodiesel in a boiler for residential heating", Energy, Vol. 34, pp. 2025-2032, 2009.
- 13- Hoon Kiat Ng, Suyin Gan, "Combustion performance and exhaust emissions from the non pressurised combustion of palm oil biodiesel blends", Applied Thermal Engineering, Vol. 30 pp. 2476-2484, 2010.
- 14- http://www.testo350.com/pdfs/Inst_Man_350_v1.30.pdf [Accessed 10 October 2011].
- ۱۵- بشیرنژاد ک.، "اندازه گیری و شبیه سازی اثر زاویه پاشش سوخت و شدت چرخش هوای ورودی بر تشکیل دوده و دوده صنعتی"، پایان نامه دکتری (تبدیل انرژی)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۶.
- ۱۶- ملکی م.، دیبایی نیا ب.، روش های اندازه گیری در مهندسی، چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۶۹.
- 17- Zhou L. X., Chen X. L., Zhang J., "Studies on the effect of swirl on NO formation in Methane/Air turbulent combustion", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 29, pp. 2235-2242, 2002.

- 18- Habib M. A., Elshafei M., Dajani M., "Influence of Combustion parameters on NOx production in an industrial boiler", Computers & Fluids, Vol. 37, pp. 12-23, 2008
- 19- Laryea G.N., Young N., "Spray and Combustion Characteristics of Hydrocarbon Fuel Injected from Pressure-Swirl Nozzles", ILASS Conference, Korea, 2004.
- 20- Evaluation of Emissions and Performance of NJ Transit Diesel Locomotives with B20 Biodiesel Blends, Research Project Summary, New Jersey, Missouri, 1994.
- 21- Siva Kumar A., Maheswar D., Vijaya Kumar Reddy K., "Comparision of Diesel Engine Performance and Emissions from Neat and Transesterified Cotton Seed Oil", JJMIE, Vol. 3, pp. 190-197, 2009.
- 22- Shaiful Ashrul Ishak M., Nazri Mohd Jaafar M., "The effect of swirl number on reducing emissions from liquid fuel burner system", Jurnal Mekanikal, No. 19, pp. 48-56, 2005.
- 23- Shaiful Ashrul Ishak M., Nazri Mohd Jaafar M., Yehia A. Eldrainy, "The Effect of Radial Swirl Generator on Reducing Emissions from Bio-Fuel Burner System", Modern Applied Science, Vol. 3, No. 6, 2009.
- 24- Glassman, I., "Combustion", Academic Press, New York, 1996.
- 25- Hess M. A., Haas M. J., Foglia T. A., "Attempts to reduce NOx exhaust emissions by using reformulated biodiesel", Fuel Processing Technology, Vol. 88, pp. 693-699, 2007.