نشریه علمی- پژوهشی سوخت و احتراق
سال شانزدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۲

مطالعه آزمایشگاهی اثر تزریق اتانول نبولایز شده بر انتقال حرارت تابشی و آلاینده ناکس شعله گاز طبیعی

امین جودت[۱*]، مجتبی نجفیان[۲*]، علی کاملی[۳]، امید ماهیان[۴]

۱- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بجنورد، بجنورد، a.jodat@ub.ac.ir
۲- رئیس اداره پژوهش، دانشگاه جامع علمی کاربردی خراسان شمالی، بجنورد، mn1362@gmail.com
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بجنورد، بجنورد، a.kameli@stu.ub.ac.ir
۴- استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه نینگبو، چین، omid.mahian@xjtu.edu.cn
* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۲، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۳/۰۳/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۴)

چکیده: گاز طبیعی در مقایسه با سوخت‌های مایع و جامد در هنگام احتراق، دوده بسیار کمتری تولید می‌کند و گداخت و واکنش در سطح این دوده‌ها یکی از عوامل اصلی تولید تشعشع در شعله است. استفاده از گاز طبیعی به‌عنوان جایگزین سوخت مایع در مشعل‌های صنعتی و خانگی به دلیل باندهای تابشی ضعیف سوخت گاز سبب کاهش راندمان حرارتی شده است ازاین‌رو احتراق گاز طبیعی در مقایسه با سوخت‌های مایع و جامد راندمان حرارتی پایین‌تری دارد و بهبود انتقال حرارت تابشی شعله گاز طبیعی جزو چالش‌های اصلی محققین فعال در این حوزه است. در این پژوهش سوخت اتانول توسط دستگاه نبولایزر به ابعاد میکرون درآمده و با آشفتگی جریان و در نتیجه اختلاط بهتری به شعله تزریق شده و اثرات آن بر روی انتقال حرارت تابشی شعله و همچنین کاهش آلاینده ناکس مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد تزریق یک درصد وزنی اتانول به‌صورت نبولایز شده موجب افزایش یک‌درصدی دمای متوسط شعله گاز طبیعی در طول دیگ و افزایش ۳/۵ درصدی شار انتقال حرارت تابش شده است و همچنین تزریق ذرات میکرونی اتانول سبب می‌شود تولید آلاینده ناکس حدود ۱۲/۵ درصد کاهش یابد.

کلیدواژگان: احتراق گاز طبیعی، نبولایزر، تزریق اتانول، آلاینده ناکس، انتقال حرارت تابشی

مقدمه

گاز طبیعی به دلیل در دسترس بودن، در سبد انرژی کشور ما بسیار محبوب است و اکنون بیش از ۵۹ درصد از مصرف سوخت‌های هیدروکربنی در کشور به گاز طبیعی اختصاص یافته است از این مقدار ۳۳ درصد سهم مصرف بخش خانگی و تجاری و ۵۰ درصد سهم بخش نیروگاهی است. در بخش خانگی و تجاری قسمت مهمی از این میزان به مشعل دیگ‌های بخار و آب‌گرم بخار تعلق می‌گیرد. ازاین‌رو بهبود راندمان مشعل‌های گاز طبیعی به‌منظور جایگزینی با سوخت‌های مایع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای بهبود راندمان شعله، بهبود انتقال حرارت تابشی که ۷۰ درصد سهم انتقال حرارت شعله را برعهده دارد بهترین گزینه است. دی‌اکسید کربن و بخارآب موجود در محصولات احتراق مهم‌ترین گازهای تشعشع کننده در احتراق هستند اما به دلیل باندهای تابشی ضعیف، باعث پایین آمدن انتقال حرارت تابشی شعله گاز طبیعی می‌شوند[۲،۱]. محققین به دنبال روش‌هایی هستند که ضمن افزایش راندمان شعله گاز طبیعی، انتشار آلاینده به محیط‌زیست را نیز کاهش دهند ازجمله این روش‌ها می‌توان به پیش گرمایش هوا و پیش گرمایش سوخت اشاره نمود [۳، ۴]. مطالعات محققین در زمینه‌ی اثرات پیش گرمایش هوا بر ساختار شعله نشان می‌دهد که بالارفتن دمای هوای ورودی به مشعل موجب افزایش دمای شعله و نرخ

تجزیه حرارتی سوخت ورودی به کوره و از این طریق سبب افزایش راندمان تشعشعی در شعله می‌شود اما برای افزایش راندمان تشعشعی از طریق پیش‌گرمایش هوا و سوخت ورودی به مشعل، نیاز به پیش گرمایش هوا تا دماهای بالای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد است که اصطلاحاً چنین سیستم‌هایی به‌عنوان سیستم‌های پیشرفته شناخته می‌شود در این دمای بالا بعضی از مولکول‌های سوخت شکسته و به کربن (دوده) تبدیل می‌شوند [۳، ۴]. راهکار دیگر برای افزایش راندمان تشعشعی شعله گاز طبیعی، اضافه کردن ذرات و ترکیبات با توانایی انجام واکنش در شعله و تولید رادیکال و یون است. تأثیر این روش بر بهبود انتقال حرارت تابشی از شعله‌های مختلف غیر درخشان به ثبت رسیده است [۵]. روش‌های مختلف درخشندگی شعله سوخت گاز طبیعی برای جایگزینی با سوخت مایع در کوره‌های صنعتی در سال ۱۹۹۰ توسط گرین و همکاران [۶] مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها برای ایجاد درخشندگی در شعله گاز از دو سوخت گاز و زغال‌سنگ استفاده کردند. در ادامه هانتی و لی [۵] بهبود انتقال حرارت تابشی از شعله سوخت هیدروژن را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با بررسی فرآیند تشکیل دوده توسط زغال‌سنگ و سهم و تأثیر آن بر انتقال حرارت تابشی از شعله، اضافه کردن پودر زغال‌سنگ به شعله غیر درخشان هیدروژن را برای تولید دوده و بهبود تابش در آن پیشنهاد کرده‌اند. استوارات گروز [۷] اثر تزریق ذرات اکسید آلومینیوم و اکسید منیزیم را بر انتقال حرارتی تابشی از شعله دیفیوژن متان هوا مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که این ذرات تأثیر قابل‌توجهی بر انتقال حرارت تابشی از شعله ندارند. کیم و همکاران [۴] در تحقیقی اثر احتراق با هوای پیش گرم شده را بر شعله سوخت LPG به‌طور آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش دمای هوای ورودی (دمای پیش گرمایش) رنگ شعله درخشان‌تر می‌شود. بیک و همکاران [۸] اثر تزریق ذرات جامد اکسید آلومینیوم و زغال را بر دما و انتقال حرارت تابشی در شعله هیدروژن ـ هوا مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که تزریق ذرات غیر واکنش‌دهنده اکسید آلومینیوم به شعله باعث کاهش شار حرارتی کل بر روی دیواره کوره می‌شود و هرچه دبی تزریق ذرات بیشتر باشد این کاهش بیشتر است. آن‌ها همچنین دریافتند که تأثیر تزریق ذرات کربن در انتقال حرارت جابجایی اندک بوده و بیشتر، انتقال حرارت تشعشع از شعله را تحت تأثیر قرار می‌دهد و انتقال حرارت تابشی مکانیزم اصلی مؤثر در انتقال حرارت مشعل‌ها است. گیو و همکاران [۹] اثر اضافه کردن هیدروژن بر تشکیل دوده در شعله آرام و دیفیوژن اتیلن- هوا را به‌صورت عددی بررسی کردند آن‌ها بیان داشتند که تزریق هیدروژن به سوخت باعث متوقف شدن و کاهش فرآیند تولید دوده می‌شود. ساجی و همکاران [۱۰] اثر تولید و اکسیداسیون دوده را در انتقال حرارت تابشی شعله دیفیوژن اتیلن مورد بررسی قرار دادند. علت انتخاب اتیلن به‌عنوان سوخت این است که کربن‌های اشباع مانند اتیلن، استیلن، و بنزن نقش مهمی در راندمان تشعشعی دارند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که شعله اتیلن در مقایسه با شعله متان بزرگ‌تر و درخشان‌تر است و درخشندگی آن به دلیل حضور ذرات کربن در آن است همچنین با در نظر گرفتن تابش ذرات کربن دمای ماکزیمم به اندازه ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد و همچنین مکان ماکزیمم شعله و مکان ماکزیمم انحراف در نمودار توزیع دما در حالت با تابش و بدون در نظر گرفتن تابش ذرات کربن بر هم منطبق است که نشان می‌دهد ذرات کربن نقش مهمی را در توزیع و پخش حرارت از طریق تابش دارند. اس سی پائول و ام سی پائول [۱۱] به روش عددی انتقال حرارت تابشی از شعله درهم و غیر پیش آمیخته پروپان هوا را در یک محفظه احتراق سه‌بعدی بررسی کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان می‌دهد که تابش از شعله‌های درخشان به‌عنوان یک جسم سیاه تابع دما و ضریب صدور است و ضریب صدور در این شعله‌ها تابع غلظت دی‌اکسید کربن، بخارآب، ذرات کربن و همچنین دما است؛ ولی ذرات کربن مهم‌ترین عنصر در ضریب صدور است. آن‌ها همچنین دریافتند در ناحیه‌ای از شعله که غلظت ذرات کربن بیشتر است، نرخ انتقال حرارت تابشی از شعله نیز بیشتر است. پورحسینی و مقیمان [۱۲] اثر هم‌سوزی گاز-گازوئیل را از طریق تزریق قطرات گازوئیل به درون شعله گاز طبیعی بر درخشندگی و انتقال حرارت تابشی آزمایش نمودند. تزریق قطرات با استفاده از یک نازل تک پاشش به قطر ۱۰۰ میکرومتر و فشار پاشش ۹ بار انجام شده است. آن‌ها نشان دادند که درخشندگی و سطح شعله در اثر هم-سوزی گاز-گازوئیل به ترتیب ۳۸ و ۲/۵ برابر افزایش می‌یابد و در نسبت جرمی گازوئیل به گاز ۱۰٪، انتقال حرارت تابشی ۵۲٪ بهبود یافته است. همچنین CO و NO در مقایسه با حالت بدون تزریق ۴ و ۳۵ppm

افزایش یافته است. چای بوسکی و همکاران [۱۳] در تحقیقات‌شان نشان دادند که تزریق بخارآب در داخل محفظه احتراق به دلیل کاهش دمای شعله و ایجاد مکانیزم‌های واکنشی شامل ترکیبات هیدروژن‌دار موجب کاهش انتشار آلاینده ناکس[1] می‌شود. بقراطی و همکاران [۱۴] اثر افزودن غلظت‌های مختلف نانولوله کربنی را مقایسه نمودند و افزایش نسبت جرمی C/H سوخت مایع بر رفتار احتراقی و تابش حرارتی شعله را بررسی کردند. نتایج بررسی ایشان نشان داد افزایش کربن به‌صورت نانوذرات، موجب افزایش سرعت واکنش‌ها، کاهش طول شعله، افزایش دما و افزایش تابش حرارتی شده است و افزایش کربن به‌صورت سوخت سنگین‌تر (C/H بیشتر) موجب کندی احتراق، افزایش طول شعله، افزایش دما و افزایش تابش حرارتی می‌شود. پورحسینی و همکاران [۱۵] اثر تزریق نانوسیال نقره را بر افزایش ویژگی‌های تشعشع و کاهش انتشار NOx بررسی نموده است. نتایج آزمایش ایشان نشان می‌دهد که تزریق نانوسیال، تابش امواج مادون‌قرمز شعله گاز طبیعی را افزایش می‌دهد و یک توزیع شار حرارتی تابشی با ارزش بالا و یکنواخت برای شعله ایجاد می‌کند و اگرچه تزریق نانوسیال به‌طور قابل‌توجهی غلظت انتشار آلاینده کربنی را تغییر نمی‌دهد اما انتشار NOx را تا ۲۲٪ کاهش می‌دهد. کاهش انتشار NOx ناشی از کاهش حداکثر دمای شعله، به دلیل جذب گرما توسط قطرات نانوسیال و افزایش غلظت رادیکال‌های OH، به دلیل تفکیک H2O در دماهای بالای منطقه واکنش شعله است. مظاهری و همکاران [۱۶] بررسی عددی افزودن بخارآب به هوای احتراق دیگ بخار صنعتی را انجام دادند مشاهده کردند در محفظه احتراق در حالت هوای خشک، دما و به‌تبع آن ناکس تولیدی زیاد است و دمای شعله در محفظه بعد از تزریق بخار کمتر شده و همچنین مقدار NO خروجی و مقدار NO2 خروجی کاهش پیدا کرد اما در گونه OH مقدار خروجی افزایش داشته است. مطالعه پورحسینی و قدرت [۱۷] بیودیزل روغن پالم تقویت شده با نانوذرات Al2O3 را به‌عنوان یک منبع انرژی تجدید پذیر مورد بررسی قرار دادند نتایج آن‌ها نشان می‌دهد تزریق این نانوذرات ویژگی‌های شعله را بهبود داده، درخشندگی و تابش مادون‌قرمز را افزایش می‌دهند و باعث کاهش گازهای NOx می‌شود با این حال باعث افزایش انتشارات مونواکسید کربن می‌شود. تای و همکاران [۱۸] بر روی کاربرد و فواید امواج فراصوت در کنترل پاشش قطرات سیال با قطرهای پایین ذرات مطالعه کردند و نشان دادند که روش تزریق با امواج فراصوت روشی کارآمد جهت تزریق و کنترل ذرات است. جودت و نجفیان[۱۹] با تزریق درصد وزنی مشخصی از ترکیبات نفتی که توسط دستگاه نبولایزر و با امواج التراسونیک به ابعاد میکرون درآمدند، توانستند مقدار CO و راندمان حرارتی را افزایش و مقدار اکسیدهای نیتروژن را کاهش دهند. در مطالعه فایرو و همکاران [۲۰] استفاده از اتانول به‌عنوان سوخت جایگزین برای موتورهای دیزل جهت کاهش قیمت و همچنین کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که ترکیب اتانول با دیزل در میکرو امولسیون‌ها و افزودن نانوذرات NiZnFe2O4، می‌تواند باعث افزایش راندمان و کاهش آلاینده محصولات احتراق شود. دچنگ لی و همکاران[۲۱] توانستند با تزریق مخلوط اتانول و آب به موتور احتراق داخلی بنزین سوز با نسبت‌های مختلف هوای اضافه و آب، انتشار گازهای گلخانه‌ای و مونوکسید کربن را کاهش دهند.

دمیر و همکاران [۲۲] با هدف بهبود انتشار آلاینده‌ها و عملکرد سوخت در یک موتور دیزل، اثر افزودن اوره و مخلوط‌های آن را مورد بررسی قرار دادند. مطالعه آزمایشگاهی کاهش قابل‌توجهی را در انتشار مونواکسید کربن، هیدروکربن‌های نسوخته و همچنین انتشار آلاینده ناکس نشان داد. اوزر و همکاران [۲۳] کارایی بوراکس دکاهیدرات را به‌عنوان یک ماده افزودنی به سوخت دیزل بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها کاهش قابل‌توجهی را در انتشار آلاینده‌هایی مانند هیدروکربن‌های نسوخته، مونوکسیدکربن، مصرف سوخت و غلظت دوده نشان داد، در حالی که اشاره کرد که انتشار اکسیدهای نیتروژن بدون تغییر باقی‌مانده است. دوگان و همکاران [۲۴] مطالعه‌ای بر روی مخلوط‌های سوخت حاوی نانوذرات سریم اکسید (CeO2) و نانوذرات آلومینیوم اکسید (Al2O3) با دیزل/روغن سوخت سنگین، در یک موتور احتراق تراکمی انجام دادند. هدف این مطالعه

[1] NOX

ارزیابی انرژی، کارایی و پایداری با مقایسه ترکیبات سوخت، با پارامترهایی ازجمله قدرت موتور، مصرف سوخت، و انتشار گازهای خروجی اگزوز بود. نتایج نشان‌دهنده افزایش اتلاف انرژی با افزودن نانوذرات نسبت به سوخت استاندارد بود.

بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که گرچه انتقال حرارت تابشی از شعله و راهکارهای بهبود آن یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای افزایش بهره‌وری حرارتی در مشعل‌ها است، اما روش‌های ارائه شده در مقالات به دلیل خطرات ناشی از مکانیزم تزریق و افزایش دما، حجم زیاد مواد افزودنی مورد استفاده و قیمت تمام شده بالا، برای صنایع، عملیاتی نشده است. در این مطالعه، به‌منظور رسیدن به روشی که بتواند در صنعت برای افزایش بهره‌وری و کاهش آلاینده‌ها استفاده شود، سوخت اتانول به شعله گاز طبیعی با استفاده از دستگاه نبولایزر تزریق می‌شود و تأثیر این فنّاوری تزریق که به همراه کاهش قطر ذرات و وجود جریان آشفته و اختلاط مناسب است بر افزایش راندمان حرارتی و تشعشعی شعله‌های گاز طبیعی و غلظت آلاینده ناکس موجود در محصولات احتراق بررسی می‌شود.

شرح دستگاه و روش انجام آزمایش

آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی با استفاده از مشعل گازی با حداکثر ظرفیت حرارتی ۱۲۰ کیلو وات نصب شده بر روی دیگ فولادی صنعتی ۳ پاس فایرتیوب به طول ۱۴۰۰ میلی‌متر و قطر ۹۰۰ میلی‌متر انجام شده است در قسمت ورودی این محفظه احتراق محلی برای نصب مشعل گازسوز و در قسمت خروجی نیز محلی برای اتصال دودکش وجود دارد جهت خروج محصولات احتراق از یک دودکش به قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۹ متر استفاده شده است. دودکش نصب شده یک متر بالاتر از موانع اطراف قرار گرفته است و داده‌های ثبت شده توسط دستگاه گاز آنالیزور بیانگر پایداری و عدم تأثیر شرایط باد منطقه بر نتایج اندازه‌گیری شده است. دبی جریان گاز ورودی به مشعل ۴/۳ متر مکعب بر ساعت است که اندازه‌گیری آن توسط یک عدد کنتور گاز با دقت ۱ لیتر در ثانیه انجام می‌شود. جهت ثابت نگه‌داشتن دمای آب ورودی به دیگ از دو عدد دستگاه یونیت هیتر به همراه پمپ استفاده شده است جهت اندازه‌گیری دبی آب عبوری از دیگ از روتامتر با بدنه فلزی مدل ACA01 و برای اندازه‌گیری دبی حجمی هوای ورودی به مشعل، از یک دبی- سرعت‌سنج دیجیتال کالیبره شده مدل TES-1340 Hot-Wire Anemometer استفاده شده است. در شکل ۱ بستر آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است.

Figure 1- Gas burner, boiler and nebulizer used in the experiment

شکل ۱- مشعل گازسوز، بویلر و دستگاه نبولایزر مورد استفاده در آزمایش

جهت اندازه‌گیری دما، تابش و آلاینده‌ها ۱۲ عدد دریچه بازدید به قطر ۵ سانتی‌متر و در زاویه ۴۵ درجه در بدنه دیگ تعبیه شده است. برای اندازه‌گیری دمای آب ورودی و خروجی به دیگ از سنسورهای PT-100 و برای اندازه‌گیری دمای شعله در این آزمایش‌ها از ترموکوپل نوع S با غلاف سرامیکی با دقت $\pm 2.5^{\circ}C$ استفاده شده است. در شکل ۲ محل قرارگیری سنسورهای دما، سنسور تشعشع و دریچه‌های تعبیه شده در بدنه دیگ نشان داده شده است.

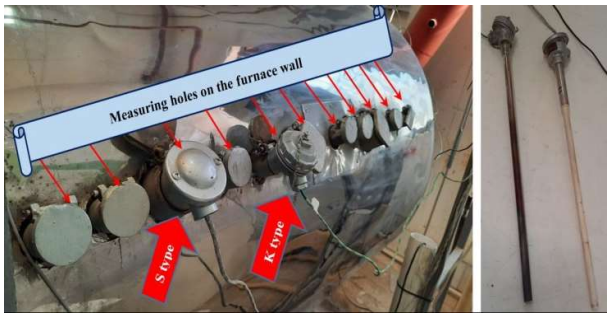

Figure 2- Placement of S and K type sensors in the 45 degree valves of the combustion chamber

شکل۲- محل قرارگیری سنسورها در دریچه‌های ۴۵ درجه بازدید محفظه احتراق

تشعشع ساطع شده از شعله توسط سنسور شار تشعشعی و درخشانی HFS01 ساخت شرکت هاکس فلوکس اندازه‌گیری می‌شود و برای تعیین دما و درصد حجمی آلاینده‌های CO و NOX در گاز خروجی از دودکش از دستگاه آنالیزور گاز TESTO350 استفاده شده است. در شکل ۳ سنسور شار تشعشعی و دستگاه آنالیزور گاز مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است

Figure 3- Heat flux sensor HFS01 and TESTO 350 gas analyzer

شکل۳- سنسور شار حرارتی HFS01 و دستگاه آنالیزور گاز TESTO350

جهت تزریق اتانول از دستگاه طراحی شده نبولایزر به ابعاد ۵۵×۲۵×۳۰ سانتی‌متر و متشکل از ۱۳ پیزو الکتریک در دو مخزن جداگانه که توان الکتریکی موردنیاز آن‌ها به‌وسیله یک منبع تغذیه تأمین می‌شود استفاده شده است. اتانول وارد شده به مخزن دستگاه نبولایزر به‌وسیله امواج مافوق صوت تولید شده توسط پیزوهای موجود در مخازن به‌صورت برش‌های میکرونی از سطح سیال جدا می‌شوند این ذرات به‌وسیله فن دمنده با قابلیت کنترل دور، از طریق لوله‌هایی به مسیر هوای ورودی مشعل، تزریق می‌شوند. شکل ۴ هندسه دستگاه نبولایزر مورد استفاده در این آزمایش و شکل ۵ نمای بالا و جانبی آن را نشان می‌دهد.

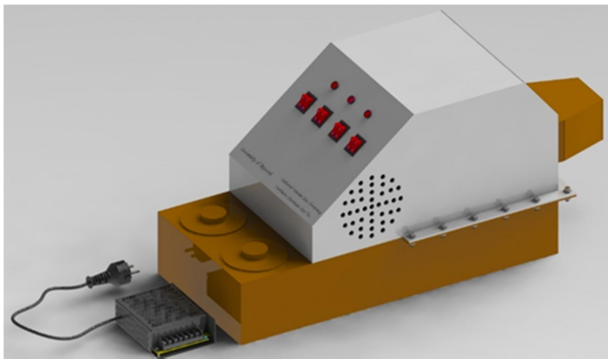

Figure 4- 3D design of nebulizer device (standard view)
شکل ۴- طراحی سه‌بعدی دستگاه نبولایزر (نمای استاندارد)

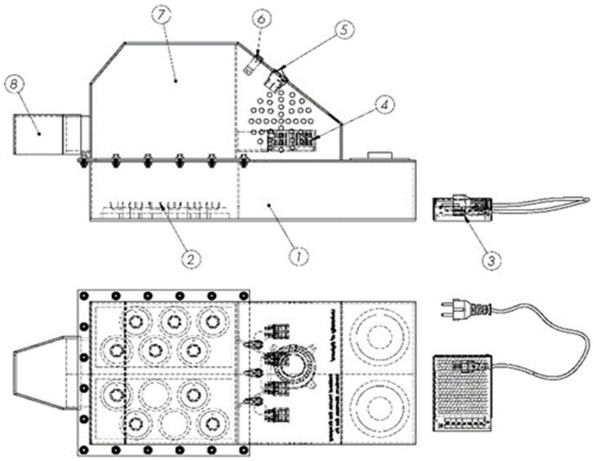

Figure 5- Side view and top view of the nebulizer
شکل ۵- نمای جانبی و نمای بالای دستگاه نبولایزر

برای انجام آزمایش و جهت دستیابی عملی به نسبت هم ارزی بهینه به این صورت عمل می‌شود که ابتدا گاز از طریق مشعل وارد محفظه احتراق می‌شود. هوای اضافه نیز از طریق فن داخل مشعل که دور آن به‌وسیله یک اینورتر کنترل می‌شود، با بیشترین مقدار وارد محفظه احتراق می‌شود سپس با تغییر فرکانس اینورتر، دور فن کاهش یافته و حجم هوای ورودی به مشعل نیز کاهش می‌یابد. با انجام این کار، پس از یکنواخت شدن شعله، مقدار CO موجود در محصولات احتراق اندازه‌گیری می‌شود. این فرایند تا مشاهده کمترین غلظت آلاینده مونوکسید کربن در محصولات احتراق ادامه می‌یابد. نسبت هم ارزی که در آن کمترین مقدار ممکن مونوکسید کربن در محصولات احتراق اندازه‌گیری می‌شود، نسبت هم ارزی بهینه مشعل است در ادامه با تزریق اتانول نبولایز شده به شعله، اثر این تزریق بر دما و انتقال حرارت تشعشعی توسط سنسورهای حرارتی نوع K و

S و سنسور تشعشعیHFS01 ثبت می‌شود لازم به ذکر است که پس از هر تزریق با گذشت حدود ۳۰ تا ۴۵ دقیقه به‌منظور رسیدن شعله به حالت پایدار، اطلاعات مربوط به دما، تشعشع شعله و آلاینده‌ها ثبت می‌شوند برای اطمینان از صحت نتایج به دست آمده آزمایش‌ها در دو نوبت تکرار شده و عدم قطعیت توسعه‌یافته ناشی از دقت تجهیزات‌گیری و تکرار آزمایش با سطح اطمینان ۹۵درصد محاسبه و در نمودارهای مربوطه نشان داده شده است. در شکل ۶ طرح‌واره بستر آزمایش مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است در این شکل محل قرارگیری سنسورهای دما و سنسور تشعشع، دستگاه گاز آنالایزر و نبولایزر تزریق ذرات نشان داده شده است همچنین مسیر حرکت گازهای حاصل از احتراق با فلش‌های به رنگ قرمز مشخص شده است.

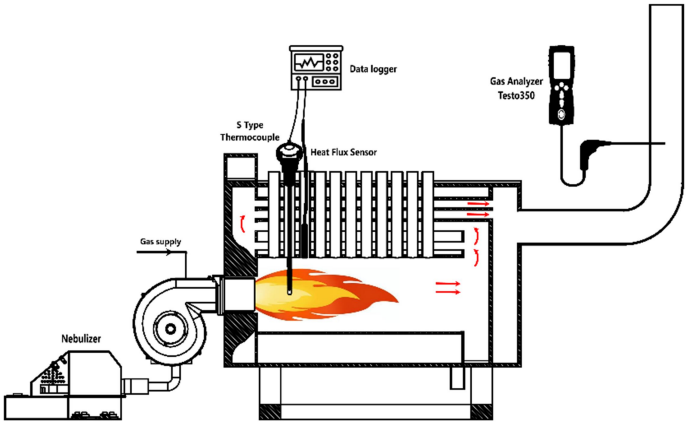

Figure 6- Schematic of the experimental setup used in this research

شکل ۶- طرح‌واره بسترآزمایش مورد استفاده در پژوهش

نتایج

با توجه به تجهیزات آزمایشگاهی تعبیه شده و داده‌های اندازه‌گیری شده در این قسمت به تجزیه‌وتحلیل داده‌ها و یافته‌های اندازه‌گیری شده پرداخته می‌شود.

در شکل ۷ تغییرات دمای محوری شعله در حالت تزریق ذرات اتانول نبولایز شده به سوخت گاز طبیعی و بدون آن نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد برای هردو شعله سوخت گاز طبیعی و گاز طبیعی غنی شده با ذرات نبولایز شده اتانول یک نقطه اوج در مشخصات دما وجود دارد که یک ویژگی قابل توجه شعله‌های دیفیوژن است و تزریق ذرات نبولایز شده اتانول باعث شده است دمای شعله در طول محفظه احتراق افزایش یابد. نتایج شکل ۷ نشان می‌دهد تزریق ذرات اتانول نبولایز شده موجب شده که دمای شعله در طول دیگ به‌طور متوسط حدود یک درصد افزایش یابد با توجه به اینکه در ابتدای شعله اتانول نبولایز شده برای تبدیل شدن به گاز و تجزیه شدن به گرما نیاز دارد و این حرارت از شعله جذب می‌شود این موضوع باعث می‌شود که اختلاف دمای شعله در ناحیه بالادست در حالت تزریق در مقایسه با حالت غیرتزریقی کمتر باشد و در فاصله ۳۰ سانتیمتری از ابتدای شعله اختلاف دما به بیشترین مقدار خود رسیده است. نتایج شکل نشان می‌دهد که در امتداد طول دیگ این اختلاف دما به تدریج کاهش می‌یابد به نحوی که در فاصله ۸۲/۵ سانتی‌متری از ابتدای دیگ، دمای شعله در حالت بدون تزریق و حالت با تزریق تقریباً با یکدیگر برابر شده است.

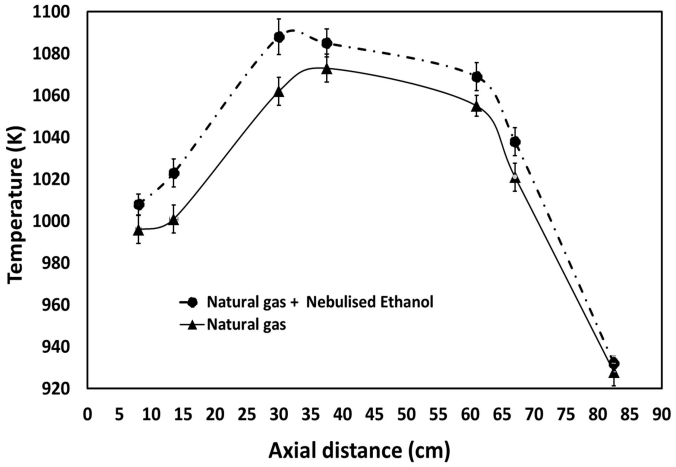

Figure 7- Comparison of axial temperature of the flame in the case of nebulized ethanol injection and without it

شکل ۷- مقایسه تغییرات دمای محوری شعله در حالت تزریق اتانول نبولایز شده و بدون آن

در شکل ۸ شار تشعشعی اندازه‌گیری شده در بدنه دیگ برای حالت با تزریق اتانول نبولایز شده به سوخت گاز طبیعی و بدون آن با هم مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تزریق ذرات میکرونی اتانول موجب افزایش ۳/۵ درصدی شار انتقال حرارت تابش شده است با توجه به قانون استفان بولتزمن جریان حرارتی تشعشعی تابعی از دما و ضریب تشعشعی است، از آنجا که تزریق ذرات اتانول نبولایز شده موجب شده که دمای شعله در طول دیگ به‌طور متوسط حدود یک درصد افزایش یابد بنابراین تغییرات دمایی بر انتقال حرارت تابشی متوسط شعله تأثیر زیادی نداشته و عامل اصلی و تأثیرگذار بر افزایش شار تابشی بهبود و افزایش ضریب صدور تابش شعله است. نتایج شکل ۸ نشان می‌دهد در حالت تزریق ذرات میکرونی اتانول، با عبور از ابتدای شعله شار تشعشعی، به دلیل کاهش دمای ناشی از جذب حرارت از شعله برای تبدیل شدن ذرات به گاز و تجزیه شدن به گرما کاهش می‌یابد و با حرکت به سمت جلو شعله با افزایش غلظت ذرات کربن و دوده درخشندگی شعله افزایش می یابد و سرانجام با حرکت به سمت پایین‌دست شعله، به دلیل کاهش غلظت اتانول، درخشندگی به‌شدت کاهش یافته و اختلاف درخشندگی دو شعله در حالت با تزریق و بدون تزریق نیز کاهش می‌یابد.

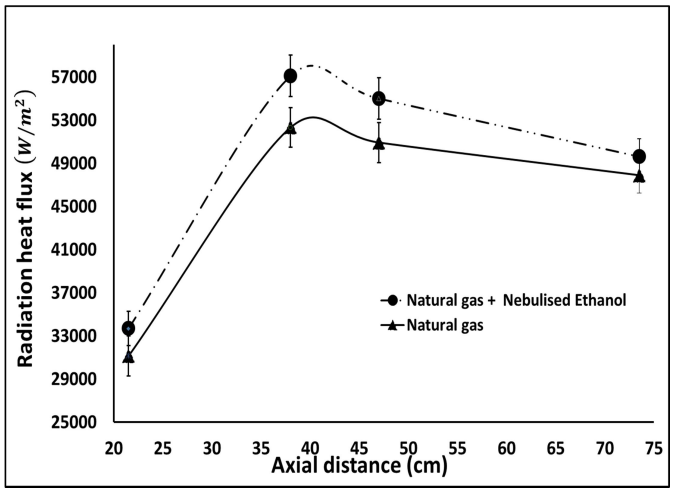

Figure 8- The effect of nebulized particles injection on the radiation flux measured in the body of the boiler

شکل۸- اثر تزریق ذرات نبولایز شده اتانول بر شار تشعشعی اندازه‌گیری شده در بدنه دیگ

در شکل ۹ اثر تزریق ذرات نبولایز شده اتانول بر اختلاف دما و اختلاف شار تشعشعی اندازه‌گیری شده در مقابل طول بدون بعد (نسبت فاصله نقطه اندازه‌گیری شده به کل طول دیگ) نشان داده شده است. نتایج بیان می‌دارد که اختلاف دما و اختلاف شار تشعشعی در حالت با تزریق و بدون آن با عبور از ابتدای شعله افزایش یافته و پس از رسیدن به بیشترین مقدار، با پیشروی به سمت پایین‌دست دیگ کاهش می‌یابد. در ابتدای شعله ذرات نبولایز شده برای تبدیل شدن به گاز و تجزیه شدن به گرما نیاز دارند که این حرارت از شعله جذب می‌شود، از طرف دیگر از فرآیند احتراق اتانول تزریقی انرژی آزاد می‌شود، برآیند این دو موضوع باعث می‌شود که اختلاف دمای شعله و شار تشعشعی برای حالت تزریق ذرات نبولایز شده و بدون آن در ابتدای دیگ کم باشد. پس از این مرحله با احتراق کامل ذرات و محصولات گازی، گرمای آزاد شده از فرآیند احتراق منجر به افزایش دما شده و افزایش غلظت ذرات کربن و دوده باعث افزایش ضریب صدور تابشی می‌شود. سرانجام در ناحیه پایین‌دست، به دلیل جذب انرژی توسط بدنه دیگ، درخشندگی به‌شدت کاهش یافته و اختلاف درخشندگی دو شعله در حالت با تزریق و بدون تزریق نیز کاهش می‌یابد.

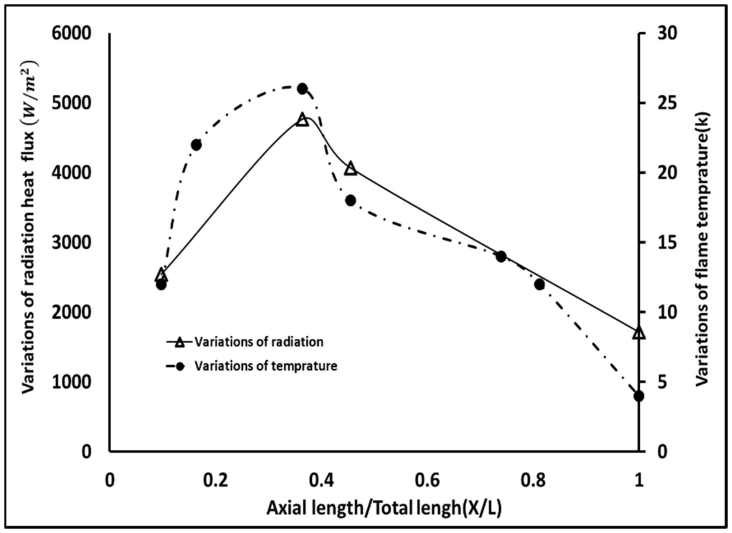

Figure 9- The effect of nebulized particles injection on variations of radiation heat transfer and flame temperatures

شکل ۹- اثر تزریق ذرات نبولایز شده بر تغییرات شار تشعشعی حرارتی و تغییرات دمای شعله

در شکل ۱۰ اثر تزریق ذرات نبولایزر شده اتانول بر تولید آلاینده ناکس شعله گاز طبیعی نشان داده شده است. یکی از ویژگی‌های منفی سوخت‌های فسیلی تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی در فرآیند احتراق آن‌ها است آلاینده ناکس و مونواکسید کربن جزو اصلی‌ترین آلاینده‌های زیست‌محیطی در فرآیند احتراق هستند. مشاهده می‌شود که تزریق یک درصد اتانول به‌صورت نبولایز شده موجب کاهش ۱۲/۵ درصد در تولید آلاینده ناکس می‌شود. با توجه به آنکه سوخت گاز طبیعی فاقد ترکیبات نیتروژن‌دار است بنابراین مکانیزم غالب تشکیل ناکس برای سوخت گاز طبیعی مکانیزم حرارتی زلدویچ است که از شکستن مولکول‌های نیتروژن هوای ورودی احتراق در دماهای بالا نشات می‌گیرد در زمان تزریق ذرات میکرونی اتانول، گروه OH موجود در این ذرات باعث کاهش غلظت اتم‌های اکسیژن و همچنین افزایش شکل‌گیری ترکیبات هیدورژنی مانند HCN و HCNO می‌شوند که شکل‌گیری این ترکیبات نیز موجب کاهش تولید آلاینده ناکس می‌شود در واقع از آنجا که NOX پس از پایان احتراق تشکیل می‌شود، گروه OH اتم‌های اکسیژن را مصرف می‌کنند تا ذرات کربن میانی را به CO و CO2 اکسید کنند در نتیجه، غلظت اتم‌های اکسیژن در منطقه واکنش شعله کاهش می‌یابد و عدد کمتری از اتم‌های اکسیژن برای ترکیب با

نیتروژن و تولید آلاینده NOX وجود خواهد داشت این موضوع که باعث کاهش تولید NOX می‌شود در نتایج سایر محققین[۱۷،۱۶] نیز مشاهده می‌شود. نتایج شکل ۱۰ نشان می‌دهد که این روش تزریق می‌تواند به‌عنوان روشی مؤثر در کاهش آلاینده ناکس، به خصوص در صنایعی که به سبب دمای بالای شعله تولید این آلاینده افزایش می‌یابد به کار رود.

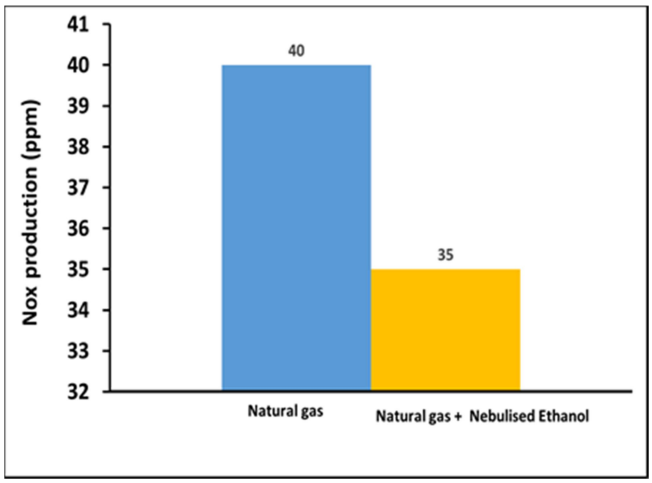

Figure 10- The effect of nebulized nanoparticles injection on NOX pollutant production

شکل ۱۰- اثر تزریق ذرات نبولایز شده اتانول بر تولید آلاینده ناکس

نتیجه‌گیری

بهبود راندمان و عملکرد حرارتی مشعل‌های صنعتی گازسوز مسئله‌ای حیاتی و مهم در صنایع مختلف نظیر سیمان، ذوب، چینی و سرامیک، نیروگاه‌ها و حتی صنایع غذایی است. خصوصیات استثنایی و کنترل پاشش ذرات سیال با قطرهای پایین، توسط امواج مافوق صوت ازجمله فناوری‌های جدیدی است که در سال‌های اخیر استفاده از آن‌ها در کاربردهای مهندسی کارایی بالایی دارد. در پژوهش حاضر به‌صورت آزمایشگاهی اثر تزریق ذرات نبولایز شده اتانول بر راندمان تشعشعی و تولید آلاینده ناکس بررسی شده است.

نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد تزریق یک درصد وزنی اتانول به‌صورت نبولایز شده موجب شده که دمای شعله گاز طبیعی در طول دیگ به‌طور متوسط حدود یک درصد افزایش یافته و موجب افزایش ۳/۵ درصدی شار انتقال حرارت تابش شده است. اختلاف دما و اختلاف شار تشعشعی در حالت با تزریق و بدون آن با عبور از ابتدای شعله افزایش یافته و پس از رسیدن به بیشترین مقدار، با پیشروی به سمت پایین‌دست دیگ کاهش می‌یابد همچنین مشاهده می‌شود تزریق یک درصد اتانول به‌صورت نبولایز شده موجب کاهش ۱۲/۵ درصد در تولید آلاینده ناکس می‌شود. استفاده از فناوری نبولایزر و تزریق اتانول به‌صورت ذرات با ابعاد میکرون به شعله، باعث اختلاط هرچه بیشتر آن با هوا، افزایش سطح ذرات و در نتیجه احتراق بهتر و کامل‌تر اتانول شده و تأثیر مطلوبی بر انتقال حرارت تابشی بر جای گذاشت. استفاده از تزریق سوخت اتانول که در دسترس و با آلایندگی پایین است می‌تواند به‌عنوان یک روش کاربردی در صنایع جهت افزایش انتقال حرارت تابشی و کاهش آلاینده ناکس به‌کار رود. مطالعه حاضر به پتانسیل امیدوارکننده استفاده همزمان از فنّاوری امواج مافوق صوت و کاربرد اتانول در جهت دستیابی به روشی کارآمد برای بهبود عملکرد و کاهش آلاینده ناکس در مشعل‌ها تأکید می‌کند.

تشکر و قدردانی

این پروژه با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی وزارت علوم تحقیقات و فناوری انجام شده است.

منابع

[1]mazaheri, K., and zarei, A. Numerical investigation of adding water vapor to air of combustion in an industrial boiler. Fuel and Combustion, Vol.13(4), pp.117-138, 2020.

[2]Küçükosman R. , Yontar A.A. and Ocakoglu K., "Nanoparticle additive fuels: Atomization, combustion and fuel characteristics", Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Vol. 165,p.105576,2022.

[3]Lim, J., Gore, J. and Viskanta R., "A Study of the Effects Air Preheat on the Structure of Methane/Air Counter Flow Diffusion Flames ", Combustion and Flame, Vol. 121, pp. 262-274, 2000.

[4]Kim, W.B., Chung, D.H., Yang, J.B., and Noh, D.S., " An Experimental Study on High Temperature and Low Oxygen Air Combustion ", Journal of Thermal Science, Vol. 9(2), pp. 169-175, 2000.

[5]W. Hutny, G. Lee,"Improved radiative heat transfers from hydrogen flames," International journal of hydrogen energy, Vol. 16, pp. 47-53,1991.

[6]A.E. Green, B.A. Green, J.C. Wagner, "Radiation enhancement in oil/coal boilers converted to Natural gas," Google Patents 4978367,1990.

[7]F. Steward, K. Guruz,"The effect of solid particles on radiative transfer in a cylindrical test furnace," Symposium (International) on Combustion, Elsevier, Vol. 15, pp. 1271-1283, 1975.

[8]S.W. Baek, J. Ju Kim, H.S. Kim, and S.H. Kang,"Effects of addition of solid particles on thermal characteristics in hydrogen-air flame," Combustion Science and Technology, vol.174, pp. 99-116, September 2010.

[9]H. Guo, F. Liu, G.J. Smallwood, and Ö.L. Gülder, 2006, "Numerical study on the influence of hydrogen addition on soot formation in a laminar ethylene–air diffusion flame," Combustion and Flame, Vol. 145(2), pp. 324-338, 2006.

[10]C. Saji, C. Balaji, and T. Sundararajan,"Investigation of soot transport and radiative heat transfer in an ethylene jet diffusion flame," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 51, pp. 4287-4299, 2008.

[11]Paul, S.C., and Paul, M.C., "Radiation Heat Transfer during Turbulent Combustion Process ", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 37, pp. 1-6, 2010

[12]S.H. Pourhoseini, and M. Moghiman, "Experimental and numerical investigation into enhancing radiation characteristics of natural-gas flame by injection of micro kerosene droplets," Journal of Enhanced Heat Transfer, Vol. 21, pp. 407-423, 2014

[13]L. Chybowski, R. Laskowski, and K. Gawdzińska, "An overview of systems supplying water into the combustion chamber of diesel engines to decrease the amount of nitrogen oxides in exhaust gas," Journal of Marine Science and Technology, Vol. 20, pp. 393-405, January 2015.

[14]Boghrati M, Moghiman M, and Pourhoseini S H. Comparison of effects of adding various carbon nanotube concentrations and increase C/H mass ratio of liquid fuels on combustion behavior and flame thermal radiation. Modares Mechanical Engineering.; 17 (9), pp. 205-213, 2017.

[15]S.H. Pourhoseini, "A novel configuration of natural gas diffusion burners to enhance optical, thermal and radiative characteristics of flame and reduce NOx emission," Energy journal, Elsevier, Vol.132, pp. 41-48, 2017.

[16]mazaheri, K.,and zarei, A. Numerical investigation of adding water vapor to air of combustion in an industrial boiler. Fuel and Combustion, Vol.13(4), 117-138. 2020.

[17]Pourhoseini S.H.,and Ghodrat M., "Experimental investigation of the effect of Al2O3 nanoparticles as additives to B20 blended biodiesel fuel: Flame characteristics, thermal performance and pollutant emissions", Case Studies in Thermal Engineering, Vol. 27, pp.1-9. 2021.

[18]S.C. Tsai, C.H. Cheng, N. Wang, Y.L. Song, C.T. Lee, and C.S. Tsai, "Silicon-based megahertz ultrasonic nozzles for production of monodisperse micrometer-sized droplets," IEEE transactions on ultrasonic, ferroelectrics, and frequency control, Vol. 56, pp. 1968-1979, 2009.

[19]A. Jodat, M. Najafian, A. Mohammadi , "Experimental Study of Injecting Water Vapor and Oil Compounds by Nebulizer on the Efficiency and Natural Gas Flame Pollution," Amirkabir J. Mech Eng., Vol. 53, pp.105-110 , 2021.

[20]Firew D., Nallamothu R.B., Alemayehu G. and Gopal R., "Performance and emission evaluation of CI engine fueled with ethanol diesel emulsion using NiZnFe2O4 nanoparticle additive", Heliyon, Vol. 8, 2022.

[21]Decheng Li, Xiumin Yu, Ping Sun, Yaodong Du, Mingjia Xu, Yinan Li, Tianqi Wang, and Zhe Zhao, "Effects of Water Ratio in Hydrous Ethanol on the Combustion and Emissions of a Hydrous Ethanol/Gasoline Combined Injection Engine under Different Excess Air Ratios," Acs omega, Vol. 6, pp. 25749-25761 ,September 2021.

[22]Demir U. , Kozan A. and Özer S., " Experimental investigation of the effect of urea addition to fuel on engine performance and emissions in diesel engines", Journal of Fuel, Vol. 311, 2022.

[23]Özer S., Demir U. and Koçyiğit S., " Effect of using borax decahydrate as nanomaterials additive diesel fuel on diesel engine performance and emissions", Journal of Energy, Vol. 266, 2023.

[24]Doğan B., Özer S., Vural E. and Haciyusufoğlu A.F., "Energy, exergy and sustainability analyses of nanoparticles added to fuels to reduce carbon footprint", Journal of Case Studies in Thermal Engineering, Vol. 56, 2024.

Experimental study of nebulized ethanol injection in radiative heat transfer and NOX pollutant of natural gas flame

Amin Jodat[1*], Mojtaba Najafian[2*], Ali Kameli[3], Omid Mahian[4]

1- Department of Mechanical Engineering, University of Bojnord, Bojnord, Iran, a.jodat@ub.ac.ir
2- Department of Research and Development, Technology Development Company, Bojnord, Iran, mn1362@gmail.com
3- Department of Mechanical Engineering, University of Bojnord, Bojnord, Iran, a.kameli@stu.ub.ac.ir
4- Zhejiang Provincial Engineering Research Center for the Safety of Pressure Vessel and Pipeline, Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China
*Corresponding author
(Received: 2024/03/31, Received in revised form: 2024/05/31, Accepted: 2024/06/13)

Compared to liquid and solid fuels, natural gas produces much less soot during combustion, and the melting and reaction on the surface of these soot is one of the main factors in the production of radiation in the flame. The use of natural gas as a substitute for liquid fuel in industrial and household burners has caused a decrease in thermal efficiency due to the weak radiation bands of gas fuel, therefore the combustion of natural gas has a lower thermal efficiency compared to liquid and solid fuels**.** And improving the radiant heat transfer of natural gas flame is one of the main challenges of active researchers in this field. In this research, the ethanol fuel was reduced to micron size by the nebulizer and injected into the flame with turbulent flow and as a result, better mixing, and its effects on the radiant heat transfer of the flame as well as the reduction of NOX pollutant were investigated. The results of the present research show that the injection of 1 percent by weight of ethanol in a nebulized form causes a 1 percent increase in the average temperature of the natural gas flame along the length of the boiler and a 3.5 percent increase in the radiant heat transfer flux, and also the injection of micron ethanol particles causes the production of NOX pollutants to decrease by 12.5 percent.

Keywords: Natural gas flame, Nebulizer, Ethanol injection, NOX Pollutant, Radiative heat transfer