مجموعه مقالات دهمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران
۱ تا ۳ اسفند ۱۴۰۲، ایران، تهران، دانشگاه تهران
FCCI-2024-1016

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]
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- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بجنورد، بجنورد، a.kameli@stu.ub.ac.ir

چکیده
گاز طبیعی در مقایسه با سوخت های مایع و جامد درهنگام احتراق، دوده بسیار کمتری تولید می‌کند و گداخت و واکنش در سطح این دوده‌ها یکی از عوامل اصلی تولید تشعشع در شعله می باشد. استفاده از گاز طبیعی به عنوان جایگزین سوخت مایع در مشعل های صنعتی و خانگی به دلیل باند های تابشی ضعیف سوخت گاز سبب کاهش راندمان حرارتی شده است از این رو احتراق گاز طبیعی در مقایسه با سوخت های مایع و جامد راندمان حرارتی پایین تری دارد و بهبود انتقال حرارت تابشی شعله گاز طبیعی جزو چالش‌های اصلی محققین فعال دراین حوزه است. در این پژوهش سوخت اتانول توسط دستگاه نبولایزر به ابعاد میکرون در آمده 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 به صورت نبولایز شده موجب افزایش یک درصدی 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.

کلمات کلیدی: 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 مشعل‌های دیگ‌های بخار و آب‌گرم بخار تعلق می‌گیرد. از این رو بهبود راندمان مشعل‌های گاز طبیعی به منظور 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 بر عهده دارد بهترین گزینه است. دی اکسید کربن و بخار آب 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.
برای بهبود انتقال حرارت تابشی شعله گاز طبیعی، محققان به دنبال روش‌های مختلفی هستند. برخی از این روش‌ها عبارتند از احتراق همزمان مشعل‌های گازی با ذرات زغال سنگ و نفت مایع، پیش گرمایش هوای ورودی به مشعل و پیش گرمایش سوخت گاز طبیعی ورودی به مشعل، در ادامه بخشی از تحقیقات انجام گرفته در این زمینه ارائه شده است:

استوارت و گروز [1] در سال ۱۹۷۴ نشان دادند که ذرات اکسید آلومینیوم و اکسید منیزیم بر انتقال حرارت تابشی از شعله دیفیوژن متان هوا اثر قابل توجهی دارند.
در سال ۱۹۹۰ گرین و همکاران [2] از دو سوخت گاز و زغال سنگ برای افزایش درخشندگی شعله گاز طبیعی استفاده کرده و افزایش درخشندگی شعله را مورد مطالعه قرار دادند .
در سال ۱۹۹۱ هانتی و لی [3] با اضافه کردن پودر زغال سنگ به شعله غیر درخشان هیدروژن ، فرایند تشکیل دوده، بهبود تابش شعله هیدروژن و بهبود انتقال حرارت تابشی آن را مورد مطالعه قرار دادند.
در سال ۱۹۹۴ بولت و همکاران [4] به تحقیق در مورد انتقال حرارت در یک کوره پودر زغال سنگ پرداختند و بیان داشتند که بیش از ۹۰ درصد شار حرارتی کل از طریق تابش منتقل می‌شود.
پژوهش بیک و همکاران [5] در سال ۲۰۰۲ نشان داد که تزریق ذرات غیر واکنش دهنده اکسید آلومینیوم و زغال به شعله هیدروژن هوا باعث کاهش فشار حرارتی کل در دیواره کوره می‌شود و با افزایش دبی تزریق ذرات، این کاهش بیشتر می‌شود. همچنین نشان دادند که تاثیر تزریق ذرات کربن در بهبود انتقال حرارت جابجایی اندک است و بیشتر انتقال حرارت تشعشعی شعله را مورد تاثیر قرار می‌دهد.
در سال ۲۰۰۶ گیو و همکاران [6] در پژوهش خود بیان داشتند که در بررسی عددی آنها بر روی تشکیل دوده بر اثر اضافه کردن هیدروژن به شعله آرام و دیفیوژن اتیلن هوا، تزریق هیدروژن به سوخت باعث توقف و کاهش تولید دوده می‌شود.
در سال ۲۰۰۸ ساچی و همکاران [7] اثر تولید و اکسیداسیون دوده در انتقال حرارت تابشی در شعله دیفیوژن اتیلن را مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که شعله اتیلن به دلیل داشتن دوده، بزرگتر و درخشان است و دمای بیشینه تابش دوده تا ۱۵۰ درجه سانتیگراد کاهش می‌یابد. همچنین مکان بیشینه دوده و بیشینه انحراف در نمودار توزیع دما در حللت با تابش و بدون در نظر گرفتن تابش بر هم منطبق هستند که بیانگر نقش مهم دوده در توزیع و پخش حرارت از طریق تابش است.
تای و همکاران [8] در سال ۲۰۰۹ بر روی کاربرد و فواید امواج فرا صوت در کنترل پاشش قطرات سیال با قطرهای پایین ذرات مطالعه کردند.
در سال ۲۰۱۰ سامانتا و همکاران [9] با تزریق صفر تا ۳۰ درصد دی اکسید کربن اثر گرمایش و رقیق سازی گاز بر ساختار شعله را مورد بررسی قرار داده و مشاهده کردند که با افزایش دی اکسید کربن، میزان NOX در شعله کاهش می‌یلبد و همچنین باعث کاهش دما، نرخ تولید دوده و طول شعله و در نهایت انتقال حرارت تابشی می‌شود.
پورحسینی و مقیمیان [10] در سال ۲۰۱۴ با تزریق گازوئیل توسط یک نازل با قطر ۱۰۰ میکرون در فشار ۹ بار مشاهده کردند که درخشندگی ۳۸ برابر و سطح شعله دو و نیم برابر افزایش یافت. همچنین در نسبت جرمی

۱۰ درصد، انتقال حرارت تابشی ۵۳ درصد، کربن ۴ ppm و NOX نیز ppm۳۵ افزایش یافت.

در سال ۲۰۱۵ چای بوسکی و همکاران [11] اثر تزریق بخار آب در محفظه احتراق را بر کاهش میزانNOX به دلیل ایجاد مکانیزم‌های واکنشی شامل ترکیبات هیدروژن دار بررسی کردند.

در سال ۲۰۱۷ پورحسینی و اسماعیلی [12] اثر تزریق امولسیون آب و ذرات نانو نقره در شعله نفت سفید بر انتشار NOX را بررسی کردند و نتایج آنها کاهش ۲۳.۷ درصدی در NOX، افزایش ۲۳ درصدی تشعشع شعله و کاهش دمای شعله را نشان داد. آنها همچنین اثر ریز انفجار قطرات آب بر سرعت اختلاط سوخت و هوای اکسید کننده را نشان دادند.

پورحسینی [13] در سال ۲۰۱۷ با تزریق مقداری از گاز به درون شعله با تکنیک پیرولیز توانست ذرات دوده با دما و گسیل کنندگی بالاتر ایجاد کند. او توانست با نرخ تزریق ثانویه ۴۰ درصد، آلاینده‌های CO و UHC را در محدوده استاندارد حفظ کرده و تشعشع شعله را افزایش و همچنین با کاهش دمای بیشینه شعله، مقدار تولید NOX را نیز تا ۳۵ درصد کاهش دهد.

مینکچن و همکاران [14] در سال ۲۰۱۸ با استفاده از روش احتراق فشرده با اکسیژن رقیق (MILD) که دارای احتراق همگن است، مقدار NOX تولیدی در یک کوره احتراق افقی زغال سنگ را کاهش دادند.

جودت و نجفیان [15] در سال ۲۰۱۹ 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.

همچنین در سال ۲۰۲۰ پورحسینی [16] با تزریق مقدار ۰.۰۰۹ لیتر بر دقیقه نانو سیال آب نقره با غلظت ppm۱۰۰ به شعله گاز طبیعی با نسبت هم ارزی ۰/۶۵ موجب شار حرارتی بیشتر، توزیع دمای یکنواخت تر و کاهش ۲۳ درصدی NOX تولیدی(با کاهش بیشینه دمای شعله) شد.

دچنگ لی و همکاران [17] در سال ۲۰۲۱ توانستند با تزریق مخلوط اتانول و آب به موتور احتراق داخلی بنزین سوز با نسبت‌های مختلف هوای اضافه و آب موجود در اتانول انتشار گازهای گلخانه‌ای و مونوکسید کربن را کاهش دهند.

مطالعه تحقیقات انجام شده در زمینه بهبود رلندمان احتراق گاز طبیعی نشان می‌دهد که روش‌های ارائه شده در بسیاری از مقالات به دلیل مشکلات مربوط به هزینه، مخاطرات موجود و بحث کنترل آلاینده ها به مرحله صنعتی وکاربردی نرسیده اند. در این آزمایش به منظور رسیدن به روشی کاربردی در صنعت برای افزایش انتقال حرارت تابشی و کاهش آلاینده‌ها، ذرات سوخت اتانول با خواص تابشی و احتراقی مطلوب از طریق استفاده از تکنولوژی نبولایزر به واکنش احتراق سوخت گاز طبیعی تزریق می گردد و تاثیر این تکنولوژی تزریق که به همراه کاهش قطر ذرات و وجود جریان آشفته و اختلاط مناسب است بر افزایش راندمان حرارتی و تشعشی شعله‌های گاز طبیعی، غلظت آلاینده‌های موجود در محصولات احتراق بررسی می‌شود.

شرح دستگاه و روش انجام آزمایش

در این آزمایش از یک مشعل گاز سوز ایران رادیاتور RAN-25 با ظرفیت حرارتی۴۰تا۱۲۰ کیلووات بر روی یک دیگ فلزی سه پاس با ظرفیت حرارتی ۱۲۰۰۰۰کیلوکالری بر ساعت (که دمای آن به وسیله جریان آب سیرکوله شده بین دیگ و یونیت هیتر کنترل می‌شود) نصب شده است.

جهت تزریق سوخت زیستی اتانول از دستگاه طراحی شده نبولایزر به ابعاد ۵۵×۲۵×۳۰ سانتیمتر و متشکل از ۱۳پیزو الکتریک در دو مخزن جداگانه که توان الکتریکی مورد نیاز آنها به وسیله یک منبع تغذیه تامین می شود استفاده شده است. اتانول وارد شده به مخزن دستگاه نبولایزر به وسیله امواج مافوق صوت تولید شده توسط پیزوهای موجود در مخازن به صورت برش‌های میکرونی از سطح سیال جدا می شوند. این ذرات به وسیله فن دمنده با قابلیت کنترل دور، از طریق لوله‌هایی به مسیر هوای ورودی شعله در مشعل تزریق می شوند.

دبی جریان گاز ورودی به مشعل ۴/۳ متر مکعب بر ساعت می‌باشد. دبی جرمی مصرف اتانول یک درصد دبی جرمی سوخت گاز طبیعی است. دمای مرکز شعله توسط سنسور ترموکوپل نوع S با دقت $\pm 1^{\circ}C$ ،تشعشع ساطع شده از شعله توسط سنسور اندازه گیری شار تشعشعی و درخشانی HFS01 ساخت شرکت هاکس فلوکس اندازه‌گیری می‌شود. همچنین برای تعیین دما و درصد حجمی آلاینده ها در گاز خروجی از دودکش از دستگاه آنالیزور گاز TESTO350 استفاده شده است.

برای انجام آزمایش، ابتدا شعله گاز طبیعی باید در حالت بهینه خود باشد. در این حالت CO تولیدی حداقل مقدار و CO2 نیز بیشترین مقدار خواهد بود.

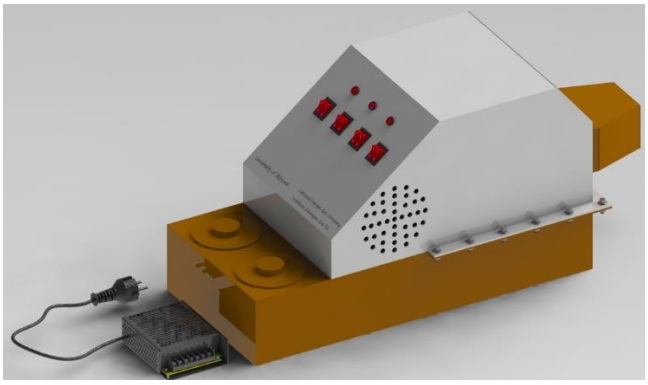
برای دستیابی عملی به نسبت هم ارزی بهینه به این صورت عمل می‌شود که ابتدا گاز از طریق مشعل وارد محفظه احتراق می‌شود. هوای اضافه نیز از طریق فن داخل مشعل که دور آن به وسیله یک اینورتر کنترل می‌شود، با بیشترین مقدار وارد محفظه احتراق می‌شود. سپس با تغییر فرکانس اینورتر، دور فن کاهش یافته و حجم هوای ورودی 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.

شکل ۱ بستر آزمایش و دستگاه نبولایزر مورد استفاده را نشان می‌دهد.

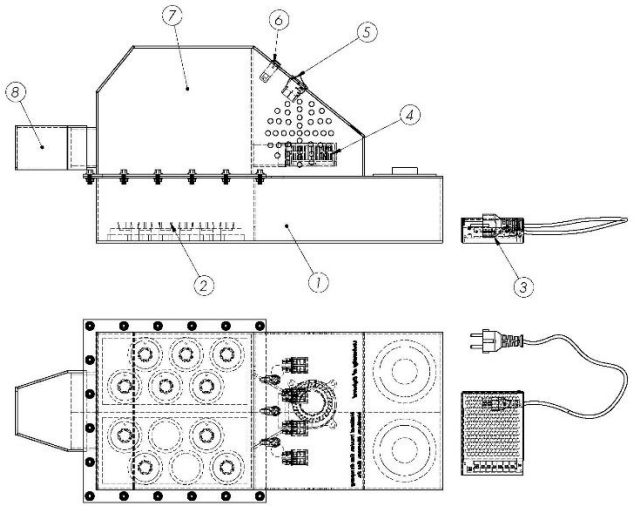
شکل۱: مشعل گاز سوز ، بویلر و دستگاه نبولایزر مورد استفاده در آزمایش

پس از یافتن نسبت هم ارزی بهینه، اتانول مایع به وسیله امواج اولتراسونیک دستگاه نبولایزر، به صورت برش‌های میکرونی از سطح مایع جدا شده و توسط فن دمنده موجود در دستگاه به مسیر هوای ورودی احتراق وارد می‌شود.

شکل ۲ هندسه دستگاه نبولایزر مورد استفاده در این آزمایش و شکل ۳ نمای بالا و جانبی آن را نشان می‌دهد.



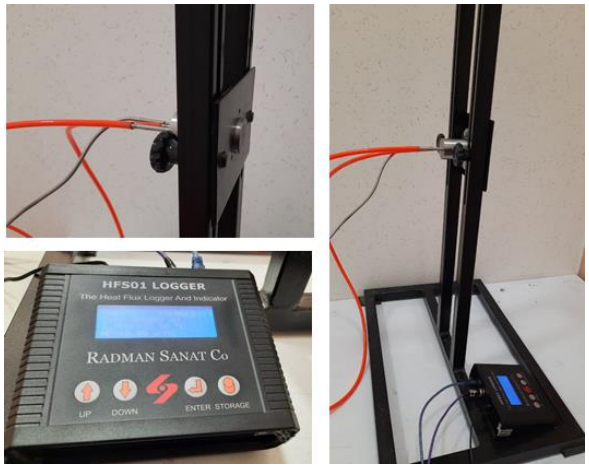
شکل ۲: طراحی سه‌بعدی دستگاه نبولایزر (نمای استاندارد)



شکل ۳: نمای جانبی و نمای بالای دستگاه نبولایزر

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 تشعشعی HFS01 ثبت می‌شود. شکل ۴ محل قرارگیری سنسورهای حرارتی در دریچه‌های بازدید دیگ و شکل ۵ سنسور شار تشعشعی HFS01 مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

شکل۴: محل قرارگیری سنسورهای نوع SوK در دریچه های ۴۵ درجه بازدید محفظه احتراق



شکل۵: سنسور شار حرارتی HFS01

غلظت آلاینده‌های CO و NOX در محصولات احتراق توسط دستگاه آنالیزور گاز TESTO350 اندازه‌گیری می‌شود.
در شکل ۶ دستگاه آنالیزور گاز مورد استفاده در این پژوهش مشاهده می‌شود.

شکل ۶: دستگاه آنالیزور گاز TESTO350

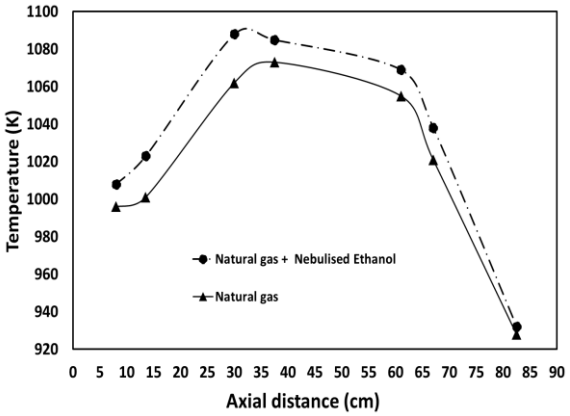
لازم به ذکر است که پس از هر تزریق با گذشت حدود ۳۰ تا ۴۵ دقیقه به منظور رسیدن شعله به حالت پایدار، اطلاعات مربوط به دما و تشعشع شعله و آلاینده ها ثبت می شوند.

. همچنین به منظور اطمینان از صحیح بودن نتایج به دست آمده، کلیه آزمایش‌ها در دو نوبت تکرار گردید.

نتایج

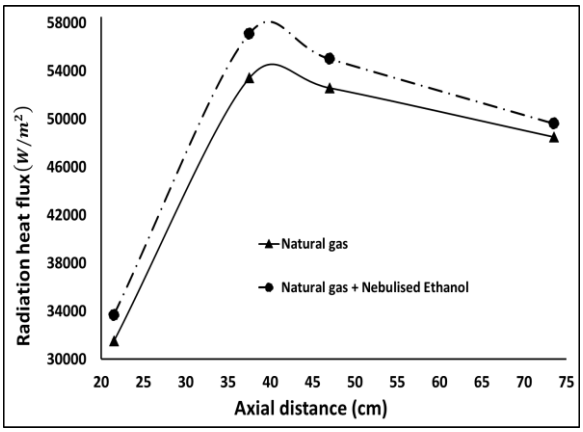
با توجه به تجهیزات آزمایشگاهی تعبیه شده و داده‌های اندازه‌گیری شده در این قسمت به تجزیه و تحلیل داده‌ها و یافته‌های لندازه‌گیری شده پرداخته می‌شود.

در شکل ۷ تغییرات دمای محوری شعله در حللت 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 یک نقطه اوج در مشخصات دما وجود دارد که یک ویژگی قابل توجه شعله های دیفیوژن است و تزریق ذرات نبولایز شده اتانول باعث شده است دمای شعله در طول محفظه احتراق افزایش یابد. نتایج شکل (۵-۵) نشان می‌دهد تزریق نانوذرات نبولایز شده موجب شده که دمای شعله در طول دیگ بطور متوسط حدود یک درصد افزایش یابد باتوجه 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 غیر تزریقی 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 تقریبا با یکدیگر برابر شده است.



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

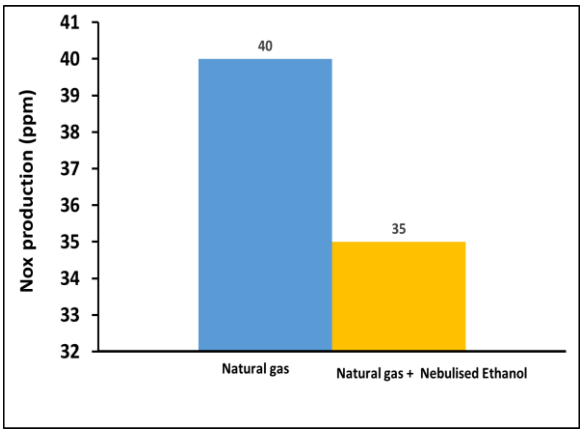
در شکل ۸ شار تشعشعی اندازه‌گیری شده در بدنه دیگ برای حالت با تزریق اتانول نبولایز شده به سوخت گاز طبیعی و بدون آن با هم مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تزریق ذرات میکرونی اتانول موجب افزایش ۳/۵ درصدی شار انتقال حرارت تابش شده است باتوجه به قانون استفان بولتزمن جریان حرارتی تشعشعی تابعی از دما و ضریب تشعشعی است، از آنجا که تزریق نانوذرات نبولایز شده موجب شده که دمای شعله در طول دیگ بطور متوسط حدود یک درصد افزایش یابد بنابراین تغییرات دمایی بر انتقال حرارت تابشی متوسط شعله تاثیرزیادی نداشته و عامل اصلی و تاثیرگذار 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، بدلیل 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 می‌یابد و سرانجام با حرکت به سمت پایین دست شعله، به دلیل کاهش غلظت اتانول، درخشندگی به شدت کاهش یافته و اختلاف درخشندگی دو شعله در حالت با تزریق و بدون تزریق نیز کاهش می‌یابد



شکل۸: اثر تزریق نانو ذرات نبولایز شده بر شار تشعشعی اندازه‌گیری شده در بدنه دیگ

در شکل ۹ 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 زیست محیطی در فرآیند احتراق آنها است آلاینده ناکس و مونواکسید کربن جزو اصلی‌ترین آلاینده‌های زیست محیطی در فرآیند احتراق هستند. مشاهده می‌شود که تزریق یک درصد اتانول بصورت 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 شکل گیری این ترکیبات نیز، موجب کاهش تولید آلاینده ناکس می‌گردد 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 می‌یلبد و عدد کمتری از اتم‌های اکسیژن برای ترکیب با نیتروژن و تولید آلاینده NOx وجود خواهد داشت. این باعث کاهش تولید NOx می‌شود

نتایج شکل ۹ نشان می‌دهد که این روش تزریق می‌تواند به عنوان روشی موثر در کاهش آلاینده ناکس، به خصوص در صنایعی که به سبب دمای بالای شعله تولید این الاینده افزایش می‌یابد به کار رود.



شکل ۹: اثر تزریق نانوذرات نبولایز شده 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 نانو ذرات و کنترل پاشش ذرات سیال با قطرهای پایین، توسط امواج مافوق صوت از جمله فناوری‌های جدیدی است که در سال‌های اخیر استفاده از آن‌ها درکاربردهای مهندسی کارایی بالایی دارد. در این پژوهش به صورت 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 به صورت نبولایز شده موجب شده که دمای شعله گاز طبیعی در طول دیگ بطور متوسط حدود یک درصد افزایش یافته و موجب افزایش ۳/۵ درصدی شار انتقال حرارت تابش شده است و همچنین مشاهده می‌شود که تزریق یک درصد اتانول بصورت نبولایز شده موجب کاهش ۱۲/۵ درصد در تولید آلاینده ناکس می‌گردد.

نتایج نشان داد که استفاده از فناوری نبولایزر و تزریق اتانول به صورت 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 تاثیر مطلوبی بر انتقال حرارت تابشی بر جای گذاشت. استفاده از تزریق سوخت اتانول که یک سوخت زیستی در دسترس و با آلایندگی پایین است می تولند به عنوان یک روش کاربردی در صنایع جهت افزایش انتقال حرارت تابشی و کاهش آلاینده ناکس بکار رود.

مراجع

1- F. Steward, K. Guruz, 1975, The effect of solid particles on radiative transfer in a cylindrical test furnace, in: Symposium (International) on Combustion, Elsevier, pp. 1271-1283.

2- A.E. Green, B.A. Green, J.C. Wagner, 1991, Radiation enhancement in oil/coal boilers converted to Natural gas, in, Google Patents,.

3- W. Hutny, G. Lee, 1991, Improved radiative heat transfers from hydrogen flames, International journal of hydrogen energy, 16(1) 47-53.

4- B. Butler, M. Denison, B. Webb, 1994, Radiation heat transfer in a laboratory-scale, pulverized coal-fired reactor, Experimental thermal and fluid science, 9(1) 69-79.

5- S.W. Baek, J. Ju Kim, H.S. Kim, S.H. Kang, 2002, Effects of addition of solid particles on thermal characteristics in hydrogen-air flame, Combustion Science and Technology, 174(8) 99-116.

6- H. Guo, F. Liu, G.J. Smallwood, 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, 145(1-2) 324-338.

7- C. Saji, C. Balaji, T. Sundararajan, 2008, Investigation of soot transport and radiative heat transfer in an ethylene jet diffusion flame, International Journal of Heat and Mass Transfer, 51(17-18) 4287-4299.

8- S.C. Tsai, C.H. Cheng, N. Wang, Y.L. Song, C.T. Lee, C.S. Tsai, 2009, Silicon-based megahertz ultrasonic nozzles for production of monodisperse micrometer-sized droplets, IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, 56(9)1968-1979.

9- A. Samanta, R. Ganguly, A. Datta,2010, Effect of CO2 dilution on flame structure and soot and NO formations in CH4-air nonpremixed flames, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 132(12) 124501.

10- S.H. Pourhoseini, M. Moghiman, 2014, Experimental and numerical investigation into enhancing radiation characteristics of natural-gas flame by injection of micro kerosene droplets, Journal of Enhanced Heat Transfer, 21(6)

11- L. Chybowski, R. Laskowski, K. Gawdzińska, 2015, 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, 20(3) 393-405.

12- S. H. Pourhoseini and R. Esmaeeli,2017, Effect of Nanosilver/Water-in-Kerosene Emulsion on NOx Reduction and Enhancement of Thermal Characteristics of a Liquid Fuel Burner, DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b02981

13- S.H. Pourhoseini,2017, A novel configuration of natural gas diffusion burners to enhance optical, thermal and radiative characteristics of flame and reduce NOx emission

14- Mingchen Xua,b, Yaojie Tua,b, Wenbin Yua,b, Wenming Yanga,b, Keng Boon Siahc, Subbaiah Prabakaranc, 2018, On the Combination of fuel-rich/lean burner with MILD combustion for further NOx emission reduction, 10th International Conference on Applied Energy (ICAE2018), Hong Kong, China

15- A. Jodat1, M. Najafian, A. Mohammadi ,2021, Experimental Study of Injecting Water Vapor and Oil Compounds by Nebulizer on the Efficiency and Natural Gas Flame Pollution, Amirkabir J. Mech Eng., 53(1)

16- S.H. Pourhoseini, 2020, Enhancement of radiation characteristics and reduction of NOx emission in natural gas flame through silver-water nanofluid injection, https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116900

17- Decheng Li, Xiumin Yu,Ping Sun, Yaodong Du, Mingjia Xu, Yinan Li, Tianqi Wang, and Zhe Zhao, 2021, 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, https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04065