Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(1) (2021) 11-14
DOI: 10.22060/mej.2019.16049.6262

Experimental Study of Injecting Water Vapor and Oil Compounds by Nebulizer on the Efficiency and Natural Gas Flame Pollution

A. Jodat[1*], M. Najafian[2], A. Mohammadi[1]

[1] Engineering Department, University of Bojnord, Bojnord, Iran
[2] Research Institute, Applied Science University of North Khorasan, Bojnord, Iran

ABSTRACT: In this study, by using nebulizer technology commonly used for the delivery of aerosolized drugs in pulmonary patients, the effect of injecting oil compounds and water vapor by nebulizer on the thermal efficiency and production of pollutants in gas emissions of natural gas diffusion flame is studied. The Nebulizer device creates micron incisions of injected liquid and, due to the reduced injection particle diameter, existing highly turbulent outflow and proper mixing of oil and water vapor compounds with gas and air inlet to the burner, effectiveness of the injection increases to enhance efficiency and reduce pollutants. In the experimental setup, the injection of 1 wt% of oil compounds into the natural gas flame by a nebulizer improves thermal efficiency by 2.5%, decreases the temperature of the exhaust gases from the chimney by 12%, and also NO_x pollutants by 13%, and increases carbon monoxide pollutant by 6%. Also, the injection of 2 wt.% of water drops as well as 1 wt.% of oil compounds will increase thermal efficiency by more than 1%, reduce the temperature of chimney exhaust gases by 6 %, reduce pollutants by more than 42 % and carbon monoxide pollutant by 26%.

Review History:

Received: 2019-03-27
Revised: 2019-07-27
Accepted: 2019-09-02
Available Online: 2019-09-15

Keywords:

Experimental system
Natural gas flamenebulizer
Thermal and radiation efficiency
Pollutants

1. INTRODUCTION

An important characteristic of solid and liquid fossil fuel flames is the luminosity of the flame and high heat transfer rate compared to the blue flame of natural gas. Using natural gas rather than liquid and solid fuels has reduced thermal efficiency and this has caused many problems for industrial producers. Researchers are looking for ways to improve the radiant heat transfer of a natural gas flame. Researchers have investigated different methods of the luminosity of natural gas fuel flame through gas fuel and coal combination, improvement of radiative heat transfer from fuel flame through carbon dioxide dilution, the effect of injection of metal oxide particles on radiative thermal transfer, and gas-gasoline co-firing effect on luminosity and radiant heat transfer [1-4]. Using ultrasonic waves in the production of droplets with small particle diameters applied in combustion chambers has also been investigated by researchers [5]. Past studies show that although flame heat transfers and its improvement strategies are considered as one of the most important methods for increasing thermal efficiency today, no operational and cost-effective method has been proposed for improving flame radiation properties. In the present work, to achieve the applicable method in the industry, liquid fuel is injected in micron dimensions using a nebulizer to increase efficiency and reduce pollutants.

*Corresponding author's email: amin.jodat@yahoo.com

2. EXPERIMENTAL SETUP

The experimental setup consists of a gas burner with a capacity of up to 100,000 kcal/h installed on a cast iron boiler. A nebulizer is used to inject oil compounds into the burner. Dimensions of nebulizer device made are $55cm \times 25cm \times 30cm$ the underside of which has two fully independent tanks and 10 adjustable ultrasonic piezoelectric tubes. The fluid existing in the tanks is diffused by ultrasonic waves as micron cuts and separated from the fluid surface. The flame thermal efficiency is measured by measuring the flow rate and the temperature difference of the inlet and outlet water to the boiler. A heat exchanger is used to keep the water temperature inlet to the boiler constant. The S-type thermocouple is used to measure the temperature with the accuracy of $\pm 2.5^{\circ}C$. The concentration of different gases in the chimney exhaust is measured using the TESTO350 model gas combustion analyzer. An analog flow meter with the precision of liters per minute is used to measure the flow rate of the heat exchanger. To perform the test, first in the non-nebulizer injection mode, the gas burner is installed on the cast iron boiler and, after reaching the boiler in the steady-state, the test data are measured and recorded; then, the burner is switched off and after the system reaches its initial state, the above steps are repeated for different values of nebulizer injection. Also, to ensure the accuracy of the results obtained, the experiments are repeated twice and the developed uncertainty of the measurement of each parameter is calculated at 90% confidence level.

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

3. RESULTS AND DISCUSSION

In Fig 1, the effect of the injection by nebulizer on the chimney outlet temperature is shown.

Fig. 2 shows the effect of nebulizer injections of various compounds on thermal efficiency. As demonstrated, the injection of oil compounds and oil compounds - water vapor will have a positive effect on increasing thermal efficiency.

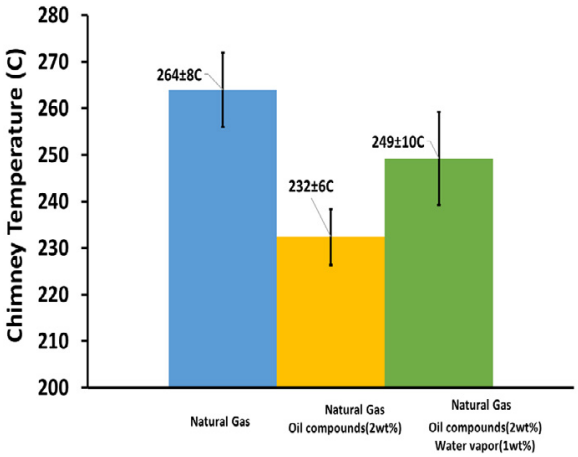


Fig. 1. Effect of nebulizer injection of various compounds on the chimney outlet temperature

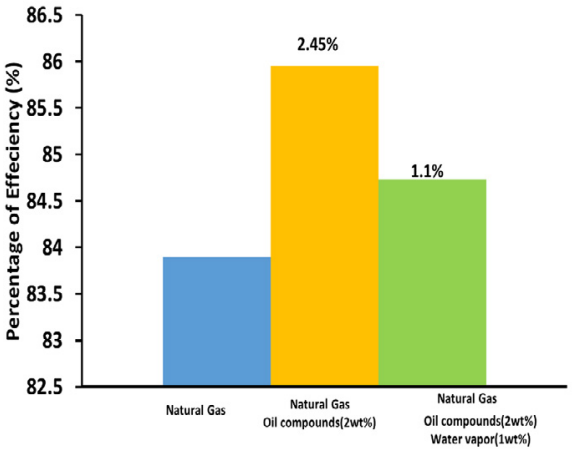


Fig. 2. Effect of nebulizer injection of various compounds on thermal efficiency

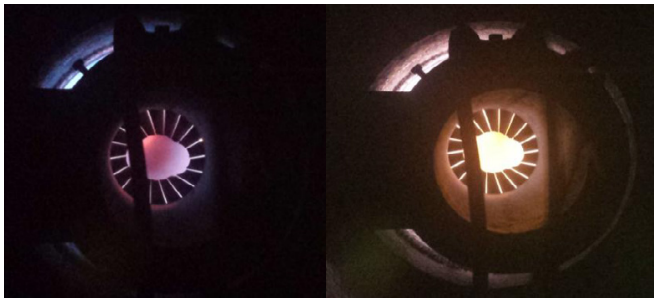


Fig. 3. Flame picture of before injection (left) and after injection (right)

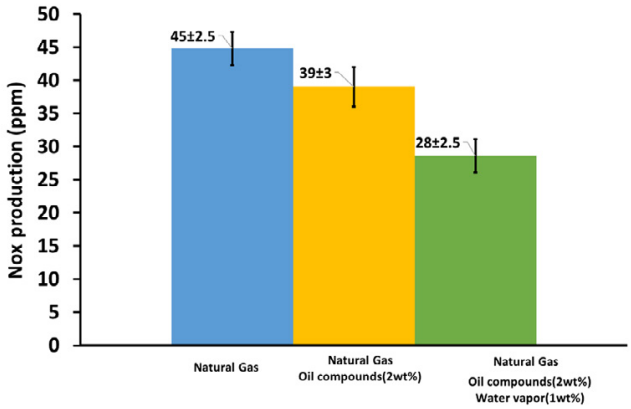


Fig. 4. Effect of nebulizer injection of various compounds on NOx emissions

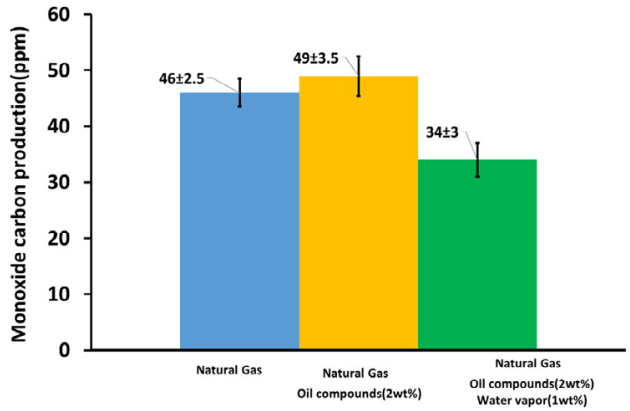


Fig. 5. Effect of nebulizer injection of various compounds on CO emissions

Fig. 3 compares the color of the flame in the non-injection mode with the injection mode of the oil compounds. The change in flame color from blue to yellow indicates that the soot particle concentration has increased in the core of the flame by injecting oil compounds into the flame.

Fig. 4 shows the effect of the injection of various compounds by the nebulizer on NO_x emissions. It is found that, in general, the injection of oil compounds by the nebulizer device, will reduce NO_x emissions.

Fig. 5 shows the effect of the injection of various compounds on CO emissions. It can be seen that the injection of oil compounds will increase the carbon monoxide, the concentration in combustion products reaches 49 ppm, which is less than the standard carbon monoxide concentration for gas burners.

4. CONCLUSIONS

The methods presented in many articles for increasing the luminosity and enhancing the radiant efficiency of natural gas flames have not been applicable in industries due to various problems such as implementation costs, hazards in some of these methods, increased pollutants, etc. The laboratory results of the

present study showed that using nebulizer technology not only could increase the thermal and radiation efficiency of natural gas flames, but also significantly reduced the concentration of pollutants in combustion products due to the decrease in particle diameter, existing highly turbulent outflow, and proper mixing of hydrocarbon compounds with gas and inlet air into the burner. The laboratory results of this study showed that the method of injection of particles by nebulizer can be used as a practical method to increase the radiation efficiency of natural gas flame and reduce the chimney exhaust pollutants.

REFERENCES

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

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

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

[4] S.H. Pourhoseini, 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, 21(6) (2014).

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

HOW TO CITE THIS ARTICLE

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., 53(1) (2021) 11-14.

DOI: 10.22060/mej.2019.16049.6262

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۱، سال ۱۴۰۰، صفحات ۳۱ تا ۴۰
DOI: 10.22060/mej.2019.16049.6262

مطالعه آزمایشگاهی تزریق بخار آب و ترکیبات نفتی توسط نبولایزر بر راندمان و آلایندگی شعله گاز طبیعی

امین جودت[۱،*]، مجتبی نجفیان[۲]، ابوالفضل محمدی[۱]

[۱] دانشکده مهندسی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران
[۲] اداره پژوهش، دانشگاه جامع علمی کاربردی خراسان شمالی، بجنورد، ایران

خلاصه: استفاده از گاز طبیعی به جای سوخت‌های مایع و جامد، باعث کاهش راندمان حرارتی شده و تولیدکنندگان صنعتی را با مشکلات زیادی مواجه نموده است. در این پژوهش با استفاده از تکنولوژی نبولایزر که به طور شایع برای انتقال دارو در بیماران ریوی استفاده می‌شود، اثر تزریق ترکیبات نفتی و بخار آب، بر بازده حرارتی و تولید آلاینده‌ها در شعله گاز طبیعی مورد بررسی قرار گرفته است. دستگاه نبولایزر باعث ایجاد برش‌های میکرونی مایع تزریقی می‌گردد و با توجه به کاهش قطر ذرات، وجود جریان به شدت آشفته خروجی و اختلاط مناسب ترکیبات، اثرگذاری تزریق جهت افزایش بازده و کاهش آلاینده‌ها افزایش می‌یابد. در نمونه بستر آزمون، تزریق یک درصد وزنی ترکیبات نفتی به شعله گاز طبیعی توسط دستگاه نبولایزر، موجب افزایش ۲/۵ درصدی راندمان حرارتی، کاهش ۱۲ درصدی دمای گازهای خروجی از دودکش، کاهش ۱۳ درصدی آلاینده ناکس و افزایش آلاینده مونواکسید کربن به میزان ۶ درصد خواهد شد، همچنین تزریق ۲ درصد وزنی قطرات آب به همراه ۱ درصد وزنی ترکیبات نفتی، موجب افزایش بیش از یک درصد بازده حرارتی، کاهش ۶ درصدی دمای گازهای خروجی از دودکش، کاهش بیش از ۴۲ درصد آلاینده ناکس و کاهش آلاینده مونواکسید کربن به میزان ۲۶ درصد خواهد شد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۰۷-۰۱-۱۳۹۸
بازنگری: ۰۵-۰۵-۱۳۹۸
پذیرش: ۱۱-۰۶-۱۳۹۸
ارائه آنلاین: ۲۴-۰۶-۱۳۹۸

کلمات کلیدی:
سامانه آزمایشگاهی
شعله گاز طبیعی
راندمان حرارتی و تشعشعی،
نبولایزر
آلاینده

۱- مقدمه

سرعت نفوذ گاز طبیعی در سبد انرژی مصرفی کشور باعث شده است که در حال حاضر بیش از ۵۹ درصد سبد انرژی سوخت‌های هیدروکربونی توسط گاز طبیعی تأمین گردد. سهم بخش خانگی و تجاری از مصرف گاز طبیعی ۳۳ درصد و سهم بخش صنعتی و نیروگاه‌ها از مصرف گاز طبیعی بیش از ۵۰ درصد می‌باشد. یکی از استفاده‌های انرژی در بخش خانگی و صنعتی که سهم قابل توجهی از مصرف گاز طبیعی را در بر می‌گیرد مشعل دیگ‌های آب و بخار می‌باشد. لذا بحث مربوط به بازده در این بخش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از گاز طبیعی به عنوان جایگزین سوخت مایع در این تجهیزات، کاهش شدید راندمان حرارتی را به دنبال داشته است. به دلیل وجود دماهای بالا، انتقال حرارت تابشی یکی از روش‌های مهم انتقال حرارت از شعله بوده و حدود ۷۰ درصد از انتقال حرارت شعله، از طریق تابش انجام می‌شود. دی اکسیدکربن و بخار آب مهم‌ترین گازهای جاذب و تشعشع‌کننده در محصولات احتراق شعله گاز طبیعی می‌باشند. اما این گازها باندهای تابشی بسیار ضعیفی دارند که باعث می‌شود تا شعله گاز طبیعی انتقال حرارت تابشی بسیار پایینی داشته باشد. بنابراین محققین به دنبال روش‌هایی هستند که باعث بهبود انتقال حرارت تابشی شعله گاز طبیعی گردد.

در سال ۱۹۹۰ گرین و همکاران [۱] روش‌های مختلف درخشندگی شعله سوخت گاز طبیعی را برای جایگزینی در کوره‌های صنعتی با سوخت مایع مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها برای ایجاد درخشندگی در شعله گاز از دو سوخت گاز و زغال سنگ استفاده کردند. در سال

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Amin.jodat@yahoo.com

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

۱۹۹۱هانتی و لی [۲] بهبود انتقال حرارت تابشی از شعله سوخت هیدروژن را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با بررسی فرآیند تشکیل دوده توسط زغال سنگ و سهم و تأثیر آن بر انتقال حرارت تابشی از شعله، اضافه کردن پودر زغال سنگ به شعله غیر درخشان هیدروژن را برای تولید دوده و بهبود تابش در آن پیشنهاد کرده‌اند. بولتر و همکاران [۳] در سال ۱۹۹۴ در تحقیقات خود در زمینه انتقال حرارت بر روی یک کوره پودر زغال سنگ، بیان داشتند که بیش از ۹۰٪ شار حرارتی کل از طریق تابش حرارتی منتقل می‌شود. استوارات و گروز [۴] در سال ۱۹۷۴ اثر تزریق ذرات اکسید آلومینیوم و اکسید منیزیم را بر انتقال حرارتی تابشی از شعله دیفیوژن متان هوا مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آنان نشان داد که این ذرات تأثیر قابل توجهی بر انتقال حرارت تابشی از شعله ندارند. در سال ۲۰۰۲بیک و همکاران [۵] اثر تزریق ذرات جامد اکسید آلومینیوم و زغال را بر دمای انتقال حرارت تابشی در شعله هیدروژن ـ هوا مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داده که تزریق ذرات غیر واکنش دهنده 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. یافته‌های آنها نشان داده که تأثیر تزریق ذرات کربن در افزایش انتقال حرارت جابجایی اندک بوده و بیشتر انتقال حرارت تشعشع، از شعله را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در سال ۲۰۰۶ گیو و همکاران [۶] اثر اضافه کردن هیدروژن بر تشکیل دوده در شعله آرام و دیفیوژن اتیلن-هوا را به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها بیان داشتند که تزریق هیدروژن به سوخت باعث متوقف شدن وکاهش فرآیند تولید دوده می‌شود. در سال ۲۰۰۸ ساجی و همکاران [۷] به بررسی اثر تولید و اکسیداسیون دوده بر روی انتقال حرارت تابشی در شعله دیفیوژن اتیلن پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که شعله اتیلن در مقایسه با شعله متان بزرگتر و درخشان‌تر است که درخشندگی آن به دلیل حضور ذرات دوده در آن است. همچنین با در نظر گرفتن تابش دوده دمای ماکزیمم به اندازه ۱۵۰ درجه سانتی گراد کاهش یافته و مکان ماکزیمم دوده در شعله و مکان ماکزیمم انحراف در نمودار توزیع دما در حالت با تابش و بدون در نظرگرفتن تابش دوده بر هم منطبق می‌گردد که این موضوع نشان می‌دهد دوده نقش مهمی را در توزیع و پخش حرارت از طریق تابش بازی می‌کند.

در سال ۲۰۱۰سامانتا و همکاران [۸] اثر گرمایش و رقیق سازی گاز با دی اکسید کربن را بر ساختار شعله، تشکیل دوده و ناکس در شعله دیفیوژن گاز طبیعی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها کسر جرمی دی اکسید کربن را از صفر تا ۳۰٪ تغییر داده و مشاهده کردند که با افزایش کسر جرمی دی اکسید کربن در سوخت، میزان تولید و انتشار دوده و ناکس کاهش می‌یابد. آن‌ها همچنین دریافتند که رقیق سازی متان با دی اکسید کربن در سرعت ثابت، به علت کاهش گونه‌های قابل احتراق در شعله باعث کاهش طول شعله شده و کاهش دما، نرخ تولید دوده و طول شعله، سبب کاهش میزان انتقال حرارت تابشی خواهد شد.

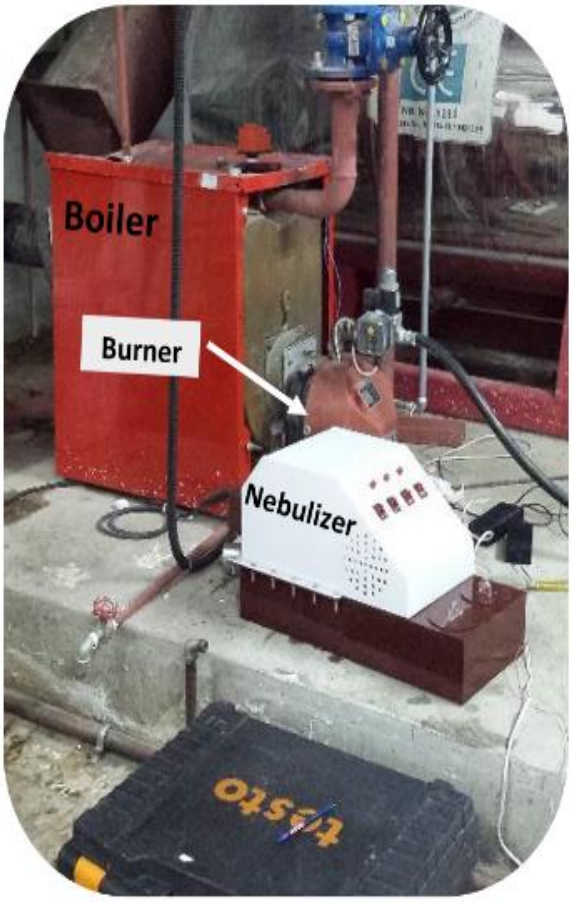
در سال ۲۰۱۴ پورحسینی و مقیمان [۹] اثر هم‌سوزی گاز-گازوئیل را از طریق تزریق قطرات گازوئیل به درون شعله گاز طبیعی بر درخشندگی و انتقال حرارت تابشی آزمایش نمودند. تزریق قطرات با استفاده از یک نازل تک پاشش به قطر ۱۰۰ میکرومتر و فشار پاشش ۹ بار انجام شده است. آن‌ها نشان دادند که درخشندگی و سطح شعله در اثر هم‌سوزی 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 مونواکسید کربن و ناکس در مقایسه با حالت بدون تزریق ۴ و ۳۵ ذره در میلیون[1] افزایش یافته است.

در سال ۲۰۰۹ تای و همکاران [۱۰] در تحقیقات آزمایشگاهی در رابطه با کاربرد امواج فراصوت در کنترل پاشش قطرات سیال با قطرهای پایین ذرات، مطالعه نمودند نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از امواج فراصوت در تولید قطرات با قطرهای کوچک ذرات می‌تواند بسیار مفید باشد.

در سال ۲۰۱۵ چای بوسکی و همکاران [۱۱] در تحقیقات‌شان نشان دادند که تزریق بخار آب در داخل محفظه احتراق به دلیل کاهش دمای شعله و ایجاد مکانیزم‌های واکنشی شامل ترکیبات هیدوژن‌دار موجب کاهش انتشار آلاینده ناکس می‌گردد.

بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که با وجود آنکه انتقال حرارت تابشی شعله و راهکارهای بهبود آن امروز به عنوان یکی از مهمترین روش‌های افزایش بازده حرارتی مطرح است اما هنوز روش عملیاتی و کم هزینه جهت بهبود خصوصیات تابشی شعله پیشنهاد نشده است. در پژوهش حاضر، جهت رسیدن به روش قابل کاربرد در

1 ppm



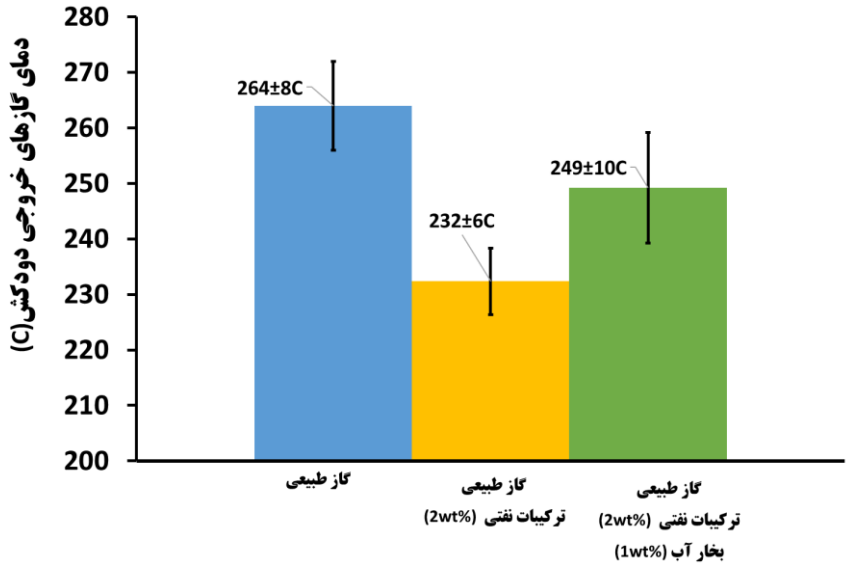
شکل ۱. تصویر دستگاه مورد استفاده جهت آزمایش
Fig. 1. The picture of experimental setup

صنایع بابت افزایش بازده و کاهش آلاینده‌ها، سوخت مایع در ابعاد میکرونی با استفاده از دستگاه نبولایزر تزریق می‌گردد. در این روش به علت اندازه بسیار ریز ذرات سوخت در خروجی نبولایزر، پیش‌بینی می‌شود که درصد جرمی سوخت مصرفی نسبت به گاز تاحد بسیار زیادی پایین باشد و آلاینده‌های ناکس و مونوکسیدکربن به حداقل ممکن برسند.

۲- شرح دستگاه و روش انجام آزمایش

بستر آزمایش متشکل است از یک عدد مشعل گازسوز با ظرفیت حداکثر یکصد هزار کیلوکالری بر ساعت که بر روی یک دیگ چدنی نصب شده است. جهت تزریق ترکیبات هیدروکربنی به مشعل از دستگاه نبولایزر استفاده شده است. بستر آزمون و دستگاه نبولایزر استفاده شده، در شکل ۱ نمایش داده شده است. دستگاه نبولایزر در ابعاد ۵۵cm×۲۵cm×۳۰cm ساخته شده است که قسمت زیرین آن دارای دو مخزن کاملاً مستقل بوده و دارای ۱۰ عدد پیزوالکتریک مافوق صوت با قابلیت تنظیم می‌باشد، سیال موجود در مخازن توسط امواج مافوق صوت به صورت برش‌های میکرونی منتشر شده و از سطح سیال جدا می‌گردد. منبع تغذیه مقدار جریان و ولتاژ مورد نیاز قطعات برقی را تأمین نموده و قطرات ریز سیال توسط دمنده با قابلیت کنترل دور و لوله خروجی بخار از دستگاه خارج و به هوای ورودی مشعل تزریق می‌گردد.

دبی جریان گاز ورودی به مشعل ۷/۳ متر مکعب برساعت می‌باشد. راندمان حرارتی شعله از طریق اندازه‌گیری دبی و اختلاف دمای آب ورودی و خروجی به دیگ اندازه‌گیری می‌شود. جهت ثابت نگه داشتن دمای آب ورودی به دیگ از مبدل حرارتی موجود در موتورخانه استفاده شده است. جریان آب در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد وارد دیگ شده و بعد از جذب حرارت از شعله در دمایی بالاتر، از آن خارج می‌شود. بر مبنای قانون اول ترمودینامیک راندمان حرارتی را می‌توان



شکل ۲. اثر تزریق ترکیبات مختلف توسط نبولایزر بر دمای گازهای خروجی دودکش

Fig. 2. Effect of nebulizer injection of various compounds on the chimney outlet temperature

به صورت ذیل بیان نمود:

$$\eta_{th.} = \frac{\dot{Q}_{absorb}}{\dot{Q}_{in}} \quad (۱)$$

در رابطه (۱) $\dot{Q}_{absorb}$ گرمای جذب شده توسط جریان آب عبوری از مبادله‌کن بوده و $\dot{Q}_{in}$ مجموع انرژی ورودی حاصل از سوخت گاز و ترکیبات تزریق شده توسط نبولایزر می‌باشد، که از ضرب ارزش حرارتی آن‌ها در دبی حجمی‌شان محاسبه می‌شود، همچنین بر اساس اختلاف دمای ایجاد شده بین جریان آب ورودی و خروجی از دیگ $\dot{Q}_{absorb}$ از رابطه زیر تعیین می‌شود:

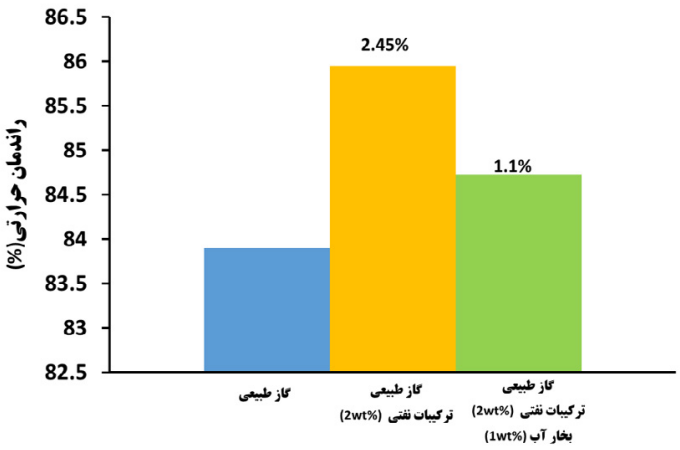
$$\dot{Q}_{absorb} = \dot{m}C\Delta T \quad (۲)$$

در رابطه (۲)، $\dot{m} = ۱/۵\text{kgs}^{-1}$، دبی جرمی جریان آب عبوری از دیگ $C = ۴/۱۸۴\text{kJkg}^{-1}\text{C}^{-1}$ ظرفیت گرمایی ویژه آب و ΔT اختلاف دما بین آب ورودی به دیگ و آب خروجی از آن در حالت پایدار می‌باشد. جهت اندازه گیری دما از ترموکوپل نوع S با دقت $\pm ۲/۵^{\circ}\text{C}$ استفاده شده است. غلظت گازهای مختلف در خروجی دودکش با استفاده از دستگاه آنالیزور گازهای حاصل از احتراق مدل تستو ۳۵۰[1] اندازه‌گیری شده است. برای اندازه‌گیری دبی آب عبوری از مبدل حرارتی، از یک دبی سنج آنالوگ با دقت $\pm ۰/۱$ ± 0.1 لیتر بر دقیقه استفاده شده است. برای انجام آزمایش ابتدا در حالت بدون تزریق نبولایزر، مشعل گاز سوز بر روی دیگ چدنی نصب گردیده و بعد از رسیدن دیگ به شرایط پایدار، اندازه‌گیری و ثبت اطلاعات آزمایش انجام گرفته است، سپس مشعل خاموش شده و بعد از رسیدن سیستم به حالت اولیه، مراحل فوق برای مقادیر مختلف تزریق توسط نبولایزر تکرار گردید. همچنین برای اطمینان از صحیح بودن نتایج به دست آمده، آزمایش‌ها در دو نوبت تکرار و عدم قطعیت توسعه یافته اندازه‌گیری هر پارامتر با سطح اطمینان ۹۰٪ محاسبه شده است.

۳-نتایج

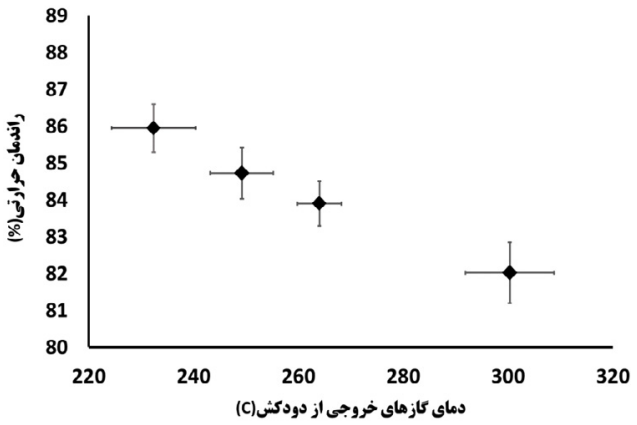
در شکل۲، اثر تزریق توسط دستگاه نبولایزر برای گاز طبیعی - ترکیبات نفتی، گاز طبیعی - ترکیبات نفتی- بخار آب، بر دمای خروجی دودکش نشان داده شده است، همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود تزریق یک درصد وزنی ترکیبات نفتی به شعله گاز طبیعی توسط دستگاه نبولایزر، دمای گازهای خروجی از دودکش را تا ۱۲درصد کاهش داده و تزریق یک درصد وزنی ترکیبات نفتی به همراه ۲ درصد وزنی بخار آب به شعله گاز طبیعی توسط دستگاه نبولایزر، باعث شده دمای گازهای خروجی از دودکش نزدیک به ۶

1 TESTO350



شکل ۳. اثر تزریق ترکیبات مختلف توسط نبولایزر بر راندمان حرارتی

Fig. 3. Effect of nebulizer injection of various compounds on thermal efficiency



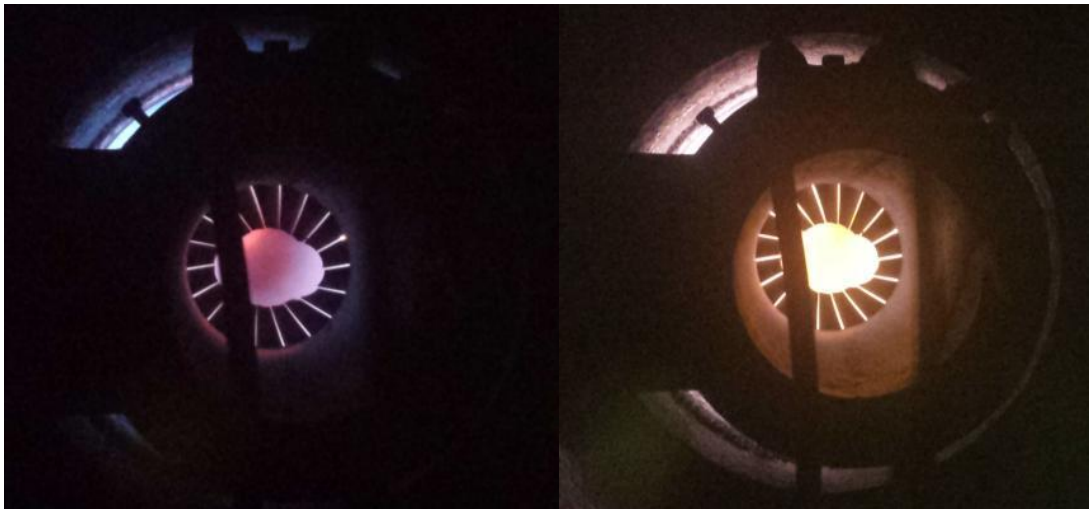
شکل ۴. تغییرات بازده سیستم نسبت به تغییرات دمای گازهای خروجی از دودکش

Fig. 4. Variations of thermal efficiency for temperature at the chimney outlet

درصد کاهش یابد. در حالت تزریق ترکیبات نفتی با توجه به آنکه تغییر شدت طیف مرئی گسیل شده از شعله صرفاً متناسب با تغییر غلظت ذرات دوده درون شعله است و بدلیل افزایش طیف مرئی زرد رنگ ناشی از تشکیل ذرات دوده درون شعله، بازده تابشی افزایش یافته که این موضوع سبب کاهش دمای گازهای خروجی دودکش می‌گردد.

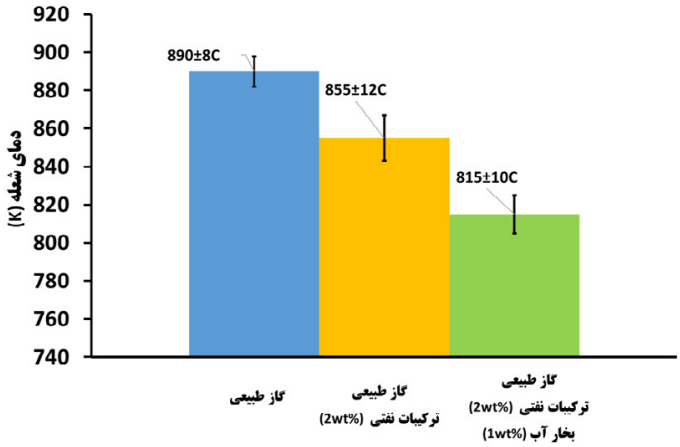
در شکل ۳ اثر تزریق ترکیبات مختلف توسط نبولایزر بر بازده حرارتی نشان داده شده است. در این شکل دیده می‌شود که تزریق ترکیبات نفتی و تزریق ترکیبات نفتی – بخار آب، اثر مثبت بر افزایش بازده حرارتی خواهد داشت، به طوریکه تزریق یک درصد وزنی از ترکیبات نفتی موجب افزایش ۲/۴۵ درصد بازده حرارتی و تزریق ۲ درصد وزنی بخار آب به همراه یک درصد ترکیبات نفتی موجب افزایش بیش از یک درصد بازده حرارتی خواهد شد، ترکیبات نفتی در اثر قرارگرفتن در محیط داغ و کم اکسیژن به ذرات دوده تجزیه حرارتی می‌شوند ذرات دوده رفتاری نزدیک به جسم سیاه دارند و چون برای جسم سیاه ضریب جذب و صدور تابش با هم برابر است بنابراین در مورد ذرات دوده نیز ضریب صدور تابش در محدوده مادون قرمز نزدیک به مرئی بسیار بالا و نزدیک به یک است که این امر بهبود انتقال گرمای تابشی شعله و در نتیجه افزایش راندمان حرارتی را به دنبال دارد. نکته قابل توجه اینست که برای دستگاه نبولایزر مورد استفاده در این پژوهش که نسبت‌های هم‌سوزی کوچک، در آن اتفاق می‌افتد تأثیر بهبود ضریب صدور تابش شعله در افزایش شار انتقال گرمای تابشی بیشتر از افزایش دماست.

در شکل ۴ تغییرات بازده سیستم نسبت به تغییرات دمای



شکل ۵. مقایسه رنگ شعله گاز قبل تزریق (شکل سمت چپ) و رنگ شعله بعد تزریق (شکل سمت راست)

Fig. 5.Flame picture of before injection (left) and after injection (right)



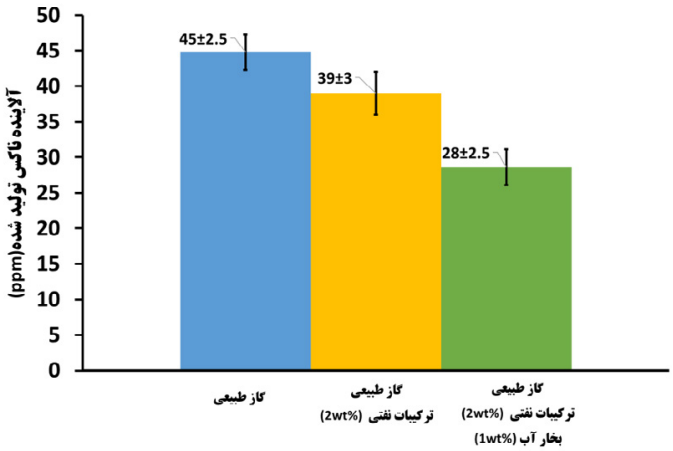
شکل ۶. اثر تزریق ترکیبات مختلف توسط نبولایزر بر دمای شعله

Fig. 6. Effect of nebulizer injection of various compounds on flame temperature

گازهای خروجی دودکش نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که با افزایش دمای گازهای خروجی از دودکش بازده سیستم کاهش می‌یابد، زیرا در این صورت انرژی کمتری از گازها جذب گرم کردن آب در حال چرخش درون دیگ خواهد شد و در نتیجه گازهای گرم بدون آن که انرژی خودشان را به آب در حال چرخش سیستم بدهند خارج شده‌اند.

در شکل ۵ رنگ شعله در حالت بدون تزریق با حالت تزریق ترکیبات نفتی با یکدیگر مقایسه شده است. با تزریق ترکیبات نفتی به درون شعله، با توجه به تجزیه حرارتی ترکیبات نفتی در اثر قرار گرفتن در محیط داغ گازهای درون شعله غلظت ذرات دوده در شعله به طور چشمگیری افزایش می‌یابد که در نتیجه آن، میزان زردسوزی شعله نیز افزایش خواهد یافت. هم سوزی قطرات سوخت مایع در درون شعله گاز طبیعی باعث افزایش ناحیه واکنشی و حجم شعله در مقایسه با شعله گاز طبیعی شده و سبب بهبود انتقال گرما از شعله خواهد شد.

در شکل ۶ اثر تزریق ترکیبات مختلف توسط نبولایزر بر دمای شعله نشان داده شده است. نتایج این شکل نشان می‌دهد تزریق یک درصد وزنی ترکیبات نفتی توسط دستگاه نبولایزر باعث کاهش ۳/۹ درصد دمای شعله می‌شود همچنین تزریق ترکیبات نفتی- بخار آب، دمای شعله را به میزان ۸/۴ درصد کاهش خواهد داد. تزریق



شکل ۷. اثر تزریق ترکیبات مختلف توسط نبولایزر بر تولید آلاینده ناکس

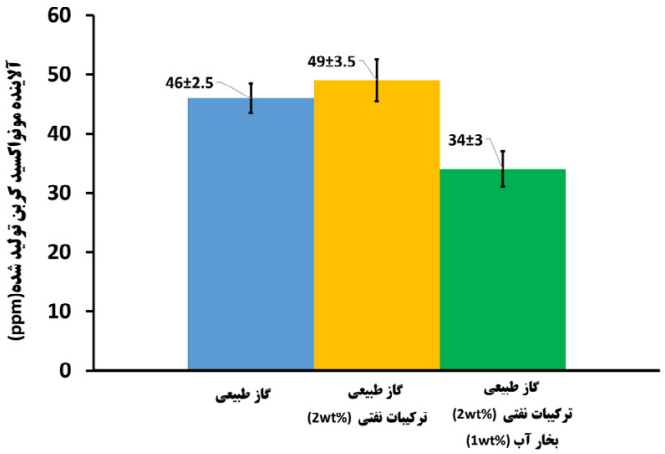
Fig. 7. Effect of nebulizer injection of various compounds on NOx emissions

ترکیبات نفتی توسط دستگاه نبولایزر باعث یکنواختی بیشتر دمای شعله و کاهش نقاط تمرکز دما خواهد شد، در شعله گاز طبیعی به دلیل اختلاط سریع گاز طبیعی و هوا دمای حداکثر شعله به ورودی مشعل نزدیک است، این درحالی است که سوخت‌های مایع دارای زمان واکنش احتراق طولانی‌تری هستند و دمای حداکثر آن‌ها نسبت به شعله گاز طبیعی در فاصله دورتر از ابتدای کوره اتفاق می‌افتد. بنابراین با هم سوزی ترکیبات نفتی و گاز طبیعی این دو توزیع دما با هم ترکیب شده و شعله‌ای با توزیع یکنواخت دما ایجاد می‌شود، به طوریکه قطرات سوخت مایع در قسمت ابتدایی شعله گاز طبیعی گرما را از شعله جذب کرده و با تبخیر و تجزیه حرارتی سبب کاهش دما در ابتدای شعله گاز طبیعی می‌گردند، اما این ذرات در پایین دست شعله محترق شده و سبب افزایش دما در این ناحیه می‌شوند که تلفیق این دو ناحیه سبب ایجاد شعله‌ای با توزیع دمای یکنواخت خواهد شد. تزریق قطرات ریز آب توسط دستگاه نبولایزر سبب کاهش دمای بیشتر شعله خواهد شد.

در شکل ۷ اثر تزریق ترکیبات مختلف توسط نبولایزر بر آلاینده ناکس تولید شده، نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که در حالت کلی تزریق ترکیبات نفتی توسط دستگاه نبولایزر سبب کاهش آلاینده ناکس خواهد شد، تزریق یک درصد وزنی ترکیبات نفتی توسط دستگاه نبولایزر باعث کاهش ۱۳/۵ درصد آلاینده ناکس می‌شود همچنین تزریق ترکیبات نفتی- بخار آب، آلاینده ناکس را به میزان بیش از ۴۲ درصد کاهش خواهد داد. کاهش انتشار آلاینده ناکس در زمان تزریق ترکیبات نفتی توسط دستگاه نبولایزر، می‌تواند به دلیل کاهش دمای ماکزیمم شعله باشد، با توجه به آنکه سوخت گاز طبیعی فاقد ترکیبات نیتروژن دار است بنابراین مکانیزم غالب تشکیل ناکس برای سوخت گاز طبیعی مکانیزم حرارتی است و چون واکنش‌های مربوط به تشکیل ناکس حرارتی (مکانیزم زلدویچ) در دماهای بالا سرعت می‌گیرد، لذا با کاهش دمای شعله در حالت تزریق ترکیبات نفتی و قطرات ریز آب توسط دستگاه نبولایزر میزان آلاینده ناکس کاهش می‌یابد. همچنین قطرات آب تزریق شده توسط دستگاه نبولایزر 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 می‌گردد.

در شکل ۸ اثر تزریق ترکیبات نفتی و تزریق ترکیبات نفتی- بخار آب، بر تولید آلاینده مونو اکسید کربن نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که تزریق ترکیبات نفتی با وجود آن که موجب افزایش بازده حرارتی خواهد شد آلاینده مونواکسید کربن را افزایش خواهد داد به نحوی که غلظت آن در محصولات احتراق به ۴۹ ذره در یک میلیون[1] رسیده است، البته این مقدار کمتر از حد استاندارد غلظت مونواکسید کربن (۱۵۰ ذره در یک میلیون) برای مشعل‌های گازسوز می‌باشد. تزریق ترکیبات نفتی- بخار آب علاوه بر افزایش بازده حرارتی باعث کاهش آلاینده مونواکسید کربن به میزان ۲۶ درصد می‌گردد. کاهش تولید نرخ مونو اکسید کربن با تزریق بخار آب، می‌تواند در اثر افزایش ایجاد رادیکال هیدروژن با توجه به معادلات واکنشی ارائه شده در

1 ppm



شکل ۸. اثر تزریق ترکیبات مختلف توسط نبولایزر بر تولید آلاینده مونواکسید کربن

Fig. 8. Effect of nebulizer injection of various compounds on CO emissions

رابطه (۳) باشد.

$$\begin{aligned} &H_2O + H \rightarrow H_2 + OH \\ &H_2O + O \rightarrow OH + OH \\ &H_2 + O \rightarrow OH + H \\ &CO + OH \rightarrow CO_2 + H \end{aligned} \qquad (۳)$$

نتایج نشان می‌دهد با توجه به کاهش قطر ذرات به زیر ۱۰ میکرومتر، وجود جریان به شدت آشفته خروجی و اختلاط مناسب ترکیبات هیدروکربنی با سوخت گاز و هوای ورودی به مشعل، میزان آلاینده‌ها در روش تزریق توسط دستگاه نبولایزر بسیار کمتر از روش‌های ارائه شده در تحقیقات گذشته است.

۴-نتیجه‌گیری

استفاده از گاز طبیعی به جای سوخت‌های فسیلی مایع و جامد در کشور باعث کاهش راندمان حرارتی شده و این موضوع تولیدکنندگان صنعتی را با مشکلات زیادی مواجه نموده است امروزه بسیاری از محققین و صنعتگران به دنبال روش‌هایی هستند که باعث افزایش درخشندگی شعله و بالابردن راندمان تابشی شعله‌های گاز طبیعی گردد، روش‌های ارائه شده در بسیاری از مقالات با توجه به مشکلات مختلفی نظیر هزینه اجرا، مخاطرات موجود در بعضی از این روش‌ها، افزایش آلایندگی‌ها و غیره، هنوز نتوانسته‌اند در صنایع، کاربردی گردند، در پژوهش حاضر با استفاده از تکنولوژی نبولایزر که به طور شایع برای انتقال داروهای افشانه‌ای (ایروسل شده) در بیماران ریوی استفاده می‌شود، روشی کاربردی و با هزینه پایین جهت افزایش راندمان مشعل‌های گازی پیشنهاد شده است. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که از طریق استفاده از تکنولوژی نبولایزر، با توجه به کاهش قطر ذرات به زیر ۱۰ میکرومتر، وجود جریان به شدت آشفته خروجی و اختلاط مناسب ترکیبات هیدروکربنی با سوخت گاز و هوای ورودی به مشعل، می‌توان علاوه بر افزایش راندمان حرارتی و تشعشی شعله‌های گاز طبیعی، غلظت آلاینده‌های موجود در محصولات احتراق را به میزان قابل توجهی کاهش داد. نتایج آزمایشگاهی پژوهش حاضر نشان می‌دهد تزریق یک درصد وزنی ترکیبات نفتی به شعله گاز طبیعی توسط دستگاه نبولایزر، موجب افزایش ۲/۵ درصدی راندمان حرارتی، کاهش ۱۲ درصدی دمای گازهای خروجی از دودکش، کاهش ۱۳ درصدی آلاینده ناکس و افزایش آلاینده مونواکسید کربن به میزان ۶ درصد خواهد شد، همچنین تزریق ۲ درصد وزنی بخار آب به همراه ۱ درصد وزنی ترکیبات نفتی، موجب افزایش بیش از یک درصد بازده حرارتی، کاهش ۶ درصدی دمای گازهای خروجی از دودکش، کاهش بیش از ۴۲ درصد آلاینده ناکس و کاهش آلاینده مونو اکسید کربن به میزان ۲۶ درصد خواهد شد، نتایج آزمایشگاهی این پژوهش نشان می‌دهد که روش تزریق ذرات توسط دستگاه نبولایزر می‌تواند به عنوان روشی کاربردی، جهت افزایش راندمان تشعشعی شعله گاز طبیعی و کاهش آلاینده‌های گازهای خروجی از دودکش استفاده شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت گاز استان خراسان شمالی، به جهت حمایت معنوی و مالی از پژوهش حاضر اعلام می‌دارند.

مراجع

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

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

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

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

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

[6] H. Guo, F. Liu, G.J. Smallwood, Ö.L. Gülder, Numerical study on the influence of hydrogen addition on soot formation in a laminar ethylene–air diffusion flame, Combustion and Flame, 145(1-2) (2006) 324-338.

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

[8] A. Samanta, R. Ganguly, A. Datta, 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) (2010) 124501.

[9] S.H. Pourhoseini, 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, 21(6) (2014).

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

[11] L. Chybowski, R. Laskowski, 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, 20(3) (2015) 393-405.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

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., 53(1) (2021) 31-40.

DOI: 10.22060/mej.2019.16049.6262

این صفحه عمداً خالی است