مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1393، دوره 14، شماره 9، ص‌ص 57-64

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

ساخت و بررسی عملکرد لایه تشعشعی کاتالیستی برای احتراق بدون شعله گاز طبیعی در شرایط آب و هوایی مختلف

سیدمصطفی حسینعلی‌پور[1*]، محمدمهدی نمازی[2]، آروین بهروان[3]، خشایار قدیری[4]، مسعود مددالهی[5]

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
2- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
3- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
4- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
5- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
* تهران، صندوق پستی 163-16765، alipour@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 19 اردیبهشت 1393
پذیرش: 31 اردیبهشت 1393
ارائه در سایت: 30 شهریور 1393

کلید واژگان:
احتراق کاتالیستی
پنل تشعشعی
تهیه کاتالیست پلاتین
تست شرایط محیطی

چکیده

در مطالعه حاضر، به ساخت و بررسی عملکرد لایه تشعشعی کاتالیستی در شرایط کارکردی و آب و هوایی مختلف پرداخته شده است. برای تهیه کاتالیست از 1g هگزا کلروپلاتینیک اسید شش آبه در 0/5 لیتر حلال شامل 50% آب مقطر و 50% اتانول استفاده شده و محلول حاصل روی پایه از جنس پتوی آلومینا-سیلیکاتی اسپری گردید. لایه آغشته شده، پس از خشک شدن و کلسیناسیون در کوره، آماده استفاده شد. عملکرد لایه کاتالیستی با طراحی و ساخت دستگاه تست با قابلیت اندازه‌گیری پارامترهایی نظیر دمای سطح و عمق لایه کاتالیستی، میزان آلاینده‌های CO و NO_x، دبی و فشار سوخت و دبی گردش هوای اجباری روی سطح پنل، مورد ارزیابی قرار گرفت. با قرار دادن پنل حاوی لایه کاتالیستی در یک محفظه تست محیطی، اثر شرایط آب و هوایی زمستانی چند شهر ایران نظیر بروجرد، خلخال، لاوان، ماهشهر و پولادشهر روی عملکرد پنل بررسی شد. دمای سطح پنل به‌طور میانگین برابر با 350°C بوده و میزان تولید آلاینده‌های NO_x برابر با صفر و میزان CO زیر 5 ppm اندازه‌گیری شد. همچنین در شهر خلخال با کمترین دما و رطوبت، بیشترین میزان دمای سطح ثبت گردید و بیشترین میزان انتشار CO (حدود 3 ppm) در شهر ماهشهر با بیشترین دما و رطوبت، ثبت شد. نشان داده شد که افزایش دبی سوخت سبب افزایش دمای سطح و افزایش میزان آلاینده CO می‌شود و با کاهش دما و رطوبت محیط، دمای سطح افزایش می‌یابد.

Fabrication and performance study of the radiative catalytic pad for flameless combustion of natural gas in different climate conditions

Sayed Mostafa Hosseinalipour*, Mohammadmehdi Namazi, Arvin Behravan, Khashayar Ghadiri, Masoud madadelahi

Department of Mechanical Engineering, Iran University of science and technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 16765-163 Tehran, Iran, alipour@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 9 May 2014
Accepted 21 May 2014
Available Online 21 September 2014

Keywords:
catalytic combustion
radiative catalytic pad
impregnation of support
Pt on Alumina fiber
Environmental test

ABSTRACT

In the present study, fabrication and performance testing of a flameless catalytic pad has been investigated. The catalyst was prepared with 1g of $H_2PtCl_6.6H_2O$ solved in 0.5 liter solvent contains 50% water and 50% ethanol and sprayed on the alumina - silica fiber mat as the catalyst support. The wet pad was dried and calcined before usage. The performance of the heater was evaluated by design and fabrication of a test stand which was capable of measuring parameters such as temperature at surface and in depth of the catalyst layer, the amount of pollutants such as CO and NO_x, flow rate and pressure of the fuel and surface air circulation in front of the pad. In addition, by placing the panel containing the pad in an environmental test chamber, the effect of different climate conditions in five cities of Iran, i.e., Borojerd, Khalkhal, Lavan, Mahshahr and Puladshahr were investigated. Average surface temperature of the pad was measured about 350°C. No NO_x was detected and CO emission of the burner was measured up to 5ppm. In Khalkhal conditions with the lowest temperature and humidity, the highest temperature at surface was recorded and the maximum CO emissions in Mahshahr with the highest temperature and humidity was about 3ppm. It was shown that increasing the fuel flow rate increases the surface temperature and CO emissions. It was also shown that an increase of environment temperature and humidity, increases the surface temperature. floor region.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
S.M. Hosseinalipour, M. Namazi, A. Behravan, Kh. Ghadiri, M. Madadelahi, Fabrication and performance study of the radiative catalytic pad for flameless combustion of natural gas in different climate conditions, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 9, pp. 57-64, 2014 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.9.24.9]

1- مقدمه

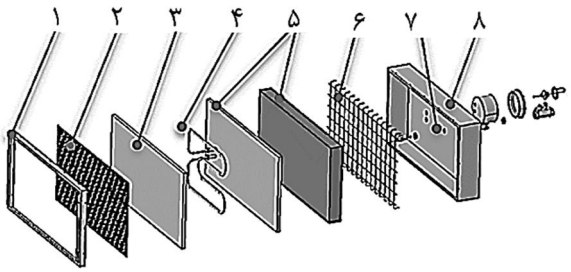
یکی از آلاینده‌هایی که حین کارکرد سامانه‌های تولید حرارت از انرژی سوخت‌های فسیلی در محیط‌زیست منتشر می‌شود، اکسیدهای نیتروژن است. یکی از علل ایجاد این نوع آلاینده‌ها، دمای بالای شعله حین احتراق متداول سوخت‌های فسیلی است. بنابراین باید به دنبال روشی بود که با کاهش دمای احتراق، از تولید اکسیدهای نیتروژن حرارتی جلوگیری شود. یکی از این روش‌ها استفاده از کاتالیست در واکنش احتراق سوخت است. احتراق کاتالیستی برای نخستین بار با آزمایش‌های دیوی کشف شد. در این آزمایش نشان داده شد که رشته‌های پلاتین می‌توانند مخلوط قابل اشتعال سوخت- هوا را بدون ایجاد شعله و با مقدار قابل‌توجهی شار تشعشعی از سطوح داغ کاتالیست محترق نمایند [1].

قدیمی‌ترین مشعل‌های کاتالیستی، گرم‌کن‌های کاتالیستی بدون شعله است که در گرمایش محیطی در فضاهای باز اردوگاهی مورد استفاده قرار می‌گرفت. در این نوع سامانه‌ها، سوخت از میان یک ساختار الیافی که سطح آن با یک ماده کاتالیستی پوشیده شده است، عبور کرده و با اکسیژن محیط که به داخل آن نفوذ کرده است، واکنش می‌داد. این شیوه طراحی، مانع از تشکیل شعله در کارکرد گرم‌کن شده که این امر ایمنی سامانه را بالا می‌برد. سابقه استفاده از این سامانه‌ها به سال 1958 در آلمان می‌رسد که شرکت گوگاس چنین مشعل‌هایی را تولید کرد. در این نوع از مشعل‌ها که با گاز شهری و در بیشینه دمای 400°C کار می‌کرد، از کاتالیست‌های پلاتین به‌کاررفته در داخل یک لایه از پشم کوارتز استفاده می‌شد [2].

امروزه با توجه به لزوم طراحی و ساخت سامانه‌های تولید حرارت با بازدهی بالا و سازگار با محیط‌زیست، گرم‌کن‌های تشعشعی کاتالیستی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. ساختار کاتالیستی در این پنل‌ها سبب کاهش انرژی فعال‌سازی و دمای واکنش اکسیداسیون بین هوا و سوخت می‌شود. بنابراین با استفاده از پدیده احتراق کاتالیستی در پنل‌های تشعشعی برای ایجاد حرارت، همچنین حذف خطر حضور شعله، آلاینده‌های کم‌تری به محیط‌زیست وارد می‌شود. بعلاوه با استفاده از گرمایش تابشی در دمای پایین، اثرات گرمایش نیتروژن موجود در هوا که در بیشتر سامانه‌های متداول به دلیل خروج محصولات احتراق دمابالا از سامانه، سبب کاهش بازدهی حرارتی می‌شود، کاهش یافته، بنابراین می‌توان به بازدهی بیشتر دست‌یافت.

در پنل‌های تشعشعی کاتالیستی همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است، معمولاً از یک لایه کاتالیست فلزات نجیب که در کنار یک یا چند لایه عایق قرار گرفته است، استفاده می‌شود. لایه‌های عایق از طرفی وظیفه جلوگیری از اتلاف حرارت از پشت پنل را داشته و از طرف دیگر وظیفه پخش سوخت در لایه کاتالیستی را بر عهده دارند. مکانیسم انجام واکنش در لایه کاتالیستی به این صورت است که ابتدا این لایه به‌وسیله المنت الکتریکی تا دمای حدود 120°C گرم می‌شود. به این صورت انرژی اولیه برای شروع واکنش کاتالیستی تأمین می‌گردد. سپس المنت الکتریکی از مدار خارج شده و سوخت از پشت پنل وارد می‌شود. اکسیژن مورد نیاز نیز از سطح جلویی وارد شده و واکنش احتراق در حضور کاتالیست در سطح پنل آغاز می‌شود و به‌صورت خودبه‌خودی ادامه می‌یابد.

دمای حاصل از احتراق کاتالیستی در سطح پنل معمولاً در محدوده 400°C است. کاتالیست مورد استفاده در این پنل‌ها، معمولاً کاتالیست فلزات نجیب مانند پلاتین و پالادیم روی پایه فیبر آلومینا است.



شکل 1 شماتیک پنل تشعشعی کاتالیستی. (1) قاب نگهدارنده، (2) توری، (3) لایه کاتالیستی، (4) المنت الکتریکی، (5) لایه عایق، (6) محفظه آرامش، (7) ورودی گاز، (8) بدنه پنل [3].

رادکلیف و هیکمن آزمایش‌های گسترده‌ای را با استفاده مواد الیافی مختلف به‌عنوان پایه که سطح جلویی آن‌ها با پلاتین پوشانده شده بود، برای احتراق کاتالیستی متان به انجام رساندند. بازده، شدت گرمایی و بیشینه دمای به‌دست‌آمده در کار ایشان به ترتیب در بازه 95-74 درصد، $9\text{-}29 kW/m^2$ و 480°C گزارش شد. هم‌چنین نتایج حاصل از بررسی محصولات احتراق، حاکی از میزان کم مونوکسید کربن (در حدود10ppm) و اکسیدهای نیتروژن (در حدود 0/1ppm) بود [4].

تریم و لام، احتراق کاتالیستی متان روی فیبر آلومینای متخلخل و غیر متخلخل را مورد مطالعه قراردادند. در کار آن‌ها مشخصات کاتالیست‌های مستعمل و جدید به‌دقت ارزیابی گردیده و سینتیک واکنش در دماهای بالاتر و نیز پایین‌تر از 813K، اندازه‌گیری شده است. پایه مورد استفاده در مطالعه ایشان فیبر آلومینا با سطح ویژه بسیار بالای $150\ m^2/g$ با قطر فیبر در محدوده 2-5μm بود [5]. در کار دیگری که توسط همین گروه انجام شد، یک محفظه احتراق کاتالیستی جریان متقابل جهت مطالعه اکسایش کامل متان با کاتالیست پلاتین روی آلومینا، به‌صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار گرفت. توزیع دما روی سطح و عمق پد کاتالیستی، انرژی تشعشعی و ترکیب محصولات احتراق در نزدیکی پد به‌عنوان تابعی از دبی متان، اندازه‌گیری شده که کربن دی‌اکسید و بخار آب به‌عنوان تنها محصولات واکنش ثبت گردیده‌اند. دبی سوخت تنها متغیر مورد بررسی در کار آن‌ها بوده است. این گروه نتیجه گرفتند که بیشینه دما با افزایش دبی سوخت، به سمت جلویی پنل حرکت کرده و به علت عدم جذب سوخت روی سطوح کاتالیستی، بازدهی احتراق با افزایش دبی افت می‌کند. ایشان ضخامت‌های مختلف لایه الیافی (بین 5 تا 40 میلی‌متر) را مورد مطالعه قراردادند و درنهایت توانستند به شدت گرمایی $10\ kW/m^2$ دست یابند [6].

ساداموری برای بررسی توزیع دما و ترکیب گاز در عمق لایه کاتالیستی برای ترکیب‌های سوخت مختلف، از یک لایه با کاتالیست رادیم روی فیبر آلومینای متخلخل استفاده نمود. در کار وی، با افزایش دبی سوخت، موقعیت دمای بیشینه به سطح نزدیک‌تر شد که نشان‌دهنده کنترل احتراق با نفوذ اکسیژن به داخل پد کاتالیستی است و همچنین در زاویه نصب عمودی پنل بازدهی احتراق 99.5% گزارش گردیده است [7].

در مطالعه سئو و همکاران، عملکرد گرماسازهای تشعشعی کاتالیستی با سوخت پروپان و کاتالیست پلاتین روی فیبر آلومینا برای کاربرد در فرایند خشک‌کردن اکرلیک پوشش داده شده روی پارچه مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مطالعه مذکور نشان داده شد که حالت نصب عمودی و رو به بالای پنل منجر به بالاترین بازده شده و با افزایش دبی سوخت، بازدهی افت می‌کند. در حالت نصب رو به پایین، محصولات احتراق در زیر سطح پنل

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.9.24.9]

تجمع یافته و مانع از نفوذ اکسیژن به سطح خواهد شد [8]. در مطالعه دیگر این گروه، از سه گرماساز تشعشعی با تغییر جریان اکسیژن به ترتیب به‌صورت جریان طبیعی هوا روی سطح کاتالیست، جریان اجباری هوا و نیز به‌صورت پیش آمیخته استفاده شد. در پژوهش یادشده نشان داده شد که ظرفیت حرارتی در مشعل پیش آمیخته کاتالیستی دو برابر مقدار اندازه‌گیری شده در گرماسازهای جریان طبیعی و اجباری است [9]. لازم به یادآوری است که پیش‌آمیخته کردن هوا و سوخت، علی‌رغم افزایش بازدهی، بار حرارتی و دمای سطح، موجب ناایمن شدن کارکرد به دلیل وجود مخلوط قابل اشتعال سوخت و هوا می‌گردد. بنابراین نمی‌توان از آن در مناطق با طبقه‌بندی پرخطر بهره برد. همچنین افزایش دمای لایه کاتالیستی احتمال کاهش فعالیت کاتالیستی ناشی از وقوع پدیده زینترینگ را در آن افزایش می‌دهد [3].

در مطالعه‌ای که جدیری و همکاران انجام دادند، اثر تغییرات دبی گاز طبیعی به‌عنوان سوخت روی بازدهی واکنش بررسی شد، نشان داده شد که با افزایش نرخ تغذیه، به دلیل نبود اکسیژن مورد نیاز احتراق، نرخ واکنش کاهش می‌یابد، همچنین با بالا بردن غلظت هیدروکربن‌های دیگر در کنار گاز طبیعی در جریان تغذیه سوخت، بازدهی واکنش کاهش یافته و در صورت دمیدن اکسیژن لازم به سطح، می‌توان میزان بازدهی را حفظ کرد [10].

گروه احتراق کاتالیستی در سال 1389 با هدف تدوین دانش فنی، طراحی و ساخت گرماسازهای تشعشعی کاتالیستی در آزمایشگاه تحقیقاتی انرژی، آب و محیط‌زیست دانشگاه علم و صنعت ایران شکل گرفت. در این گروه تاکنون مطالعات گسترده‌ای در زمینه پنل‌های تشعشعی کاتالیستی برای اولین بار در کشور انجام گرفته است. در سال 91 و 92 عملکرد دو گرماساز تشعشعی کاتالیستی دو پنله تجاری جهت گرمایش سیال فرایندی عبوری از درون لوله به‌صورت عددی و تجربی مورد ارزیابی قرار گرفته که در هر مطالعه نشان داده شد که یکی از اصلی‌ترین بخش‌های اتلاف حرارت در گرماسازهای تشعشعی، خروج تشعشع و محصولات احتراق از سامانه است [11-12]. در پژوهش دیگر که در این گروه در سال 92 جهت دستیابی به دانش طراحی پنل‌های تشعشعی انجام شد، عملکرد یک پنل تشعشعی تجاری به‌صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته که در این مطالعات نشان داده شد که اصلی‌ترین عامل کنترل‌کننده ظرفیت پنل‌های تشعشعی، نفوذ اکسیژن به درون ساختار متخلخل لایه کاتالیستی است [13-15].

در پژوهش حاضر یک لایه کاتالیست پلاتین بر پایه فیبرهای آلومینا- سیلیکاتی تهیه شده و در یک پنل تشعشعی قرار داده شد. به‌طورکلی روند ساخت این لایه شامل توزین پایه، توزین نمک کاتالیست، تهیه محلول با استفاده از نمک کاتالیست، آغشته‌سازی پایه با محلول، خشک‌کردن و کلسیناسیون می‌شود. در ادامه شرح مختصری از مطالعات انجام‌شده در ادبیات فن درزمینه روند تهیه لایه کاتالیستی به‌کاررفته در پنل‌های تشعشعی ارائه شده است. پس از ساخت پنل، با طراحی و ساخت یک دستگاه تست با قابلیت اندازه‌گیری پارامترهایی نظیر دمای سطح و عمق لایه کاتالیستی، میزان آلاینده‌های CO و NO_x، دبی و فشار سوخت و دبی گردش هوای اجباری روی سطح پنل، مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین برای اولین بار، اثر شرایط آب و هوایی مختلف بر عملکرد آن به‌صورت تجربی بررسی شد.

برای تهیه لایه کاتالیستی پنل معمولاً از فلزات نجیبی نظیر پلاتین و رادیم به‌عنوان فاز فعال و از فیبرهای آلومینا به‌عنوان پایه استفاده می‌شود. پاتریک و همکاران، یک لایه کاتالیستی شامل 4.5 میلی‌گرم فلز پلاتین روی پایه 22 گرمی فیبر آلومینا به‌وسیله اسپری کردن محلول آبی کلروپلاتینیک اسید روی یک طرف پتوی فیبری، تهیه نمودند. لایه استفاده‌شده دارای ابعاد 35/5 در 28 سانتی‌مترمربع و چگالی توده برابر 94 kg/m^3 بود. دبی سوخت‌های مورد آزمایش در محدوده 22 تا 90 لیتر بر ساعت و حداکثر دما در پد 500°C تا 600°C ثبت گردید. در این حالت سوخت غیرنسوخته‌ای ثبت نشد [16]. در نمونه دیگر که توسط همین گروه تهیه شده، برای مقایسه اثر نوع پایه کاتالیست، از دو نوع پایه فیبر آلومینا با سطح ویژه بالا و یک پایه فیبر آلومینا- سیلیکاتی با سطح ویژه کمتر از 0/5m^2/g استفاده شد. وزن فیبر آلومینا با سطح ویژه بالا 48g بوده و برای نمونه با سطح ویژه پایین از 80g فیبر آلومینا- سیلیکاتی با چگالی توده 96 kg/m^3 استفاده گردیده است. برای آغشته‌سازی لایه از 180cc محلول شامل 0/14g کلروپلاتینیک اسید در حلال شامل 50% آب و 50% متانول استفاده شده است. دوسوم این محلول روی سطح جلویی و یک‌سوم آن روی سطح پشتی پتو اسپری شده و برای تست لایه کاتالیستی، از بوتان به‌عنوان سوخت با دبی 40l/h استفاده گردیده است. در صد لغزش سوخت برای نمونه آماده شده با فیبر آلومینا از 0.4% تا 0.9% بوده است که این عدد برای نمونه آماده شده با فیبر آلومینا - سیلیکاتی به مقدار 5.1% تا 6.3% افزایش یافته است [16].

لایه کاتالیستی تهیه شده در مطالعه ساداموری و همکاران، دارای 1.5% وزنی پلاتین روی فیبر آلومینا است که برای ساخت آن، 6l محلول هگزاکلروپلاتینیک اسید تهیه شده و به مدت یک ساعت حین هم‌زدن روی پایه فیبر آلومینا با سطح ویژه 150m^2/g و وزن 300g اسپری شده است. برای کارکرد با گاز شهری در این نمونه، پس از 5000 ساعت، بازدهی احتراق از 98.4% به 89.0% کاهش یافته و مقداری CO در محصولات احتراق گزارش شده است [17].

در کار سئو و همکاران که برای استفاده از گرماساز کاتالیستی برای سیستم گرمایش در خط تولید موکت انجام شده است، روند آماده‌سازی کاتالیست برای احتراق پروپان به این صورت بوده که ابتدا پایه فیبری به روش تلقیح با محلول آبی H_2PtCl_6 آغشته شده است. برای بررسی فعالیت کاتالیستی نمونه آماده شده در این کار، T_{10} که بیان‌گر دمایی است که در آن نرخ تبدیل سوخت به 10% می‌رسد، اندازه‌گیری و برای سوخت پروپان، از 250°C تا 320°C گزارش شده است [9].

2- ساخت و تست عملکرد لایه کاتالیستی

برای تهیه کاتالیست از 1g هگزا کلروپلاتینیک اسید شش آبه در 0/5 لیتر حلال شامل 50% آب مقطر و 50% اتانول استفاده شد و محلول حاصل روی پایه از جنس پتوی آلومینا-سیلیکاتی اسپری گردید. شایان ذکر است که برای پایه کاتالیست از عایق نسوز آلومینا- سیلیکاتی با قابلیت تحمل دمای 1260°C استفاده شد. پس از خشک‌کردن و کلسیناسیون کاتالیست، لایه مذکور در بدنه پنل تشعشعی قرار گرفت.

برای اندازه‌گیری میزان پلاتین موجود در لایه کاتالیستی، پس از تهیه کاتالیست، از سه بخش مختلف برای آزمایش XRF[1]، نمونه‌برداری شد. درصد پلاتین لایه کاتالیستی در نواحی مرکزی حدود 0/8% و در نواحی کناری در حدود 0/4% گزارش شد. همچنین برای اندازه‌گیری سطح ویژه پایه مورد استفاده، یک نمونه برای انجام تست BET[2] تهیه گردید. طبق نتایج تست مذکور، سطح ویژه، حجم کلی حفرات و قطر متوسط حفره به ترتیب 1/677m^2/g، 2/4624×10^{-3} cm^3/g و 6/063 nm گزارش شد.

1- X-ray fluorescence
2- Brunauer Emmett Teller

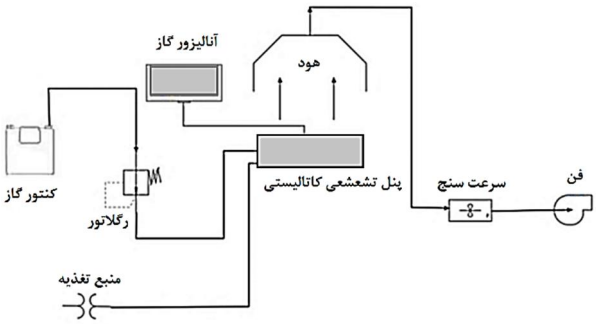
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.9.24.9]

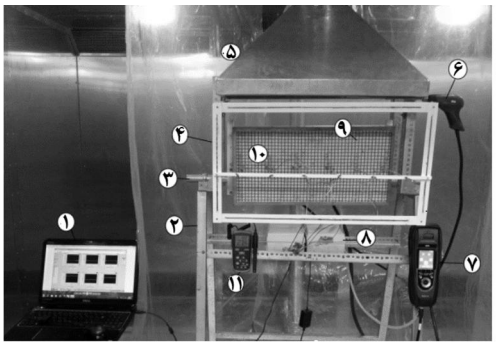
جهت بررسی نحوه عملکرد پنل، یک دستگاه تست طراحی و ساخته شد. دستگاه تست قابلیت اندازه‌گیری پارامترهایی نظیر دمای سطح پنل، دما در عمق لایه کاتالیستی، فشار و دبی سوخت مصرفی، دبی جریان اجباری هوا روی سطح را دارا است. پارامترهایی که اثر آن‌ها بر عملکرد پنل در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفته است، تغییر دبی سوخت مصرفی، دبی جریان اجباری هوا روی سطح و شرایط محیطی شامل دما و رطوبت است.

با توجه به پارامترهای هدف، ابزارهای اندازه‌گیری مناسب انتخاب گردید. برای اندازه‌گیری دمای سطح پنل، از پیرومتر استفاده شد که با استفاده از امواج مادون‌قرمز منتشرشده از سطح، دما را اندازه‌گیری می‌کند. برای اندازه‌گیری دمای عمق از ترموکوپل نوع K استفاده شد که قابلیت تحمل دماهای بالا تا 800°C را داشته و به راحتی داخل لایه کاتالیستی قرار می‌گیرد. برای ثبت دبی سوخت، از یک کنتور گاز G4 که دارای دقت 200cc است استفاده گردید و با اندازه‌گیری حجم گاز مصرفی در بازه‌های یک‌دقیقه‌ای، میزان دبی مصرفی به‌دست آمد. برای آنالیز محصولات احتراق از یک دستگاه آنالیز گاز ساخت شرکت KIMO بهره گرفته شد که قابلیت اندازه‌گیری NO_x و CO را دارا است. همچنین از یک فن که در بالای یک هود قرار داشت برای جمع‌آوری محصولات احتراق و نیز بررسی اثر گردش اجباری هوا روی سطح جلوی پنل، استفاده شد. میزان دبی مکش محصولات احتراق توسط یک سرعت‌سنج پروانه‌ای اندازه‌گیری شد. شکل 2 شماتیک مجموعه تست عملکرد پد تشعشعی را نشان می‌دهد.

پیش از راه‌اندازی پنل، زاویه قرارگیری پنل داخل مجموعه تنظیم شد. کاتالیست توسط المنت الکتریکی تا دمای حدود 120°C گرم گردید و انرژی مورد نیاز جهت شروع واکنش کاتالیستی تأمین شده و پس از آغاز واکنش، المنت از مدار خارج و شیر گاز باز شد. شکل 3 مجموعه تست عملکرد پنل تشعشعی را نشان می‌دهد.



شکل 2 شماتیک مجموعه تست عملکرد پد تشعشعی کاتالیستی [18]



شکل 3 مجموعه تست عملکرد پنل تشعشعی کاتالیستی؛ (1) رایانه، (2) پایه دستگاه تست، (3) محور اتصال پنل به پایه، (4) پایه نگهدارنده ترموکوپل‌ها، (5) هود، (6) پراب آنالیزور گاز، (7) آنالیزور گاز، (8) سامانه جمع‌آوری داده، (9) پنل تشعشعی کاتالیستی، (10) ترموکوپل، (11) رطوبت‌سنج [18].

ثبت اندازه‌گیری‌ها پس از سی دقیقه کارکرد مداوم پنل و رسیدن به حالت پایا انجام شد. داده‌برداری در سه مرحله با فاصله زمانی 5 دقیقه انجام پذیرفت. قابل یاد است که جهت ثابت نگه‌داشتن شرایط محیط پیرامون در تست‌های مختلف، پنل درون یک محفظه تست محیطی قرار داده شد و دما و رطوبت محیط در حین تست‌های استاندارد به ترتیب در 25°C و 50% ثابت نگه‌داشته شد.

برای بررسی تکرارپذیری تست‌ها، ابتدا برای دبی مشخص 3/6 l/min، دمای سطح لایه کاتالیستی، میزان CO در چهار روز مختلف اندازه‌گیری شد. سپس انحراف معیار داده‌ها از مقدار میانگین (در هر نقطه روی سطح برای دما و در یک نقطه برای CO) محاسبه شد. نتایج در شکل‌های 4 تا 6 مشاهده می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، به‌طورکلی انحراف معیار از مقدار میانگین دما روی سطح در چهار روز مختلف اندازه‌گیری، کمتر از 2/9°C به‌دست آمد. این عدد برای اندازه‌گیری CO برابر 0/7 ppm محاسبه شد. مقادیر انحراف معیار داده‌های ثبت‌شده قابل قبول بوده و با توجه تکرارپذیری تست‌ها، سایر آزمایش‌ها انجام شد.

3- نتایج

یکی از مهم‌ترین پارامترهای عملکردی پنل به‌عنوان یک گرماساز تشعشعی، دمای سطح آن است. در مطالعه حاضر اثر سه پارامتر دبی گاز مصرفی، جریان اجباری هوا روی سطح پنل و شرایط محیطی شامل دما و رطوبت روی دمای سطح و میزان آلاینده CO مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل 6 تغییرات دمای سطح پد با تغییر دبی گاز مصرفی در شرایط محیطی استاندارد (دمای 25°C و رطوبت 50%) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دبی گاز مصرفی، دمای سطح پد افزایش یافته است. درواقع با افزایش دبی گاز، به علت محدودیت نفوذ اکسیژن در پنل، واکنش به سمت سطح متمایل شده و بنابراین دمای سطح افزایش می‌یابد.

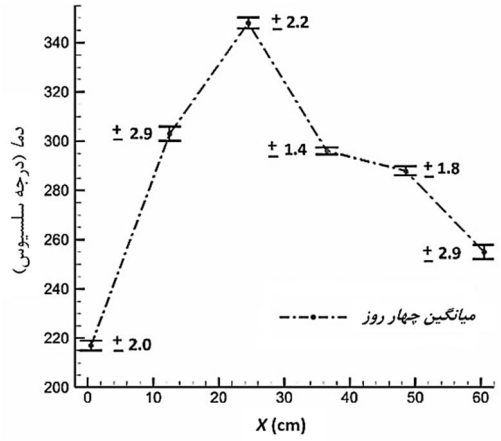
برای بررسی اثر تغییر دبی گاز بر توزیع دما در عمق پد کاتالیستی، دماها در چند عمق به کمک ترموکوپل ثبت شد. نتایج در شکل 7 نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش دبی گاز، دما افزایش یافته و ماکزیمم آن به سمت سطح پنل متمایل می‌گردد و این امر همان‌طور که ذکر شد به دلیل متمایل شدن واکنش احتراق به سمت سطح کاتالیست به دلیل محدودیت نفوذ اکسیژن به درون ساختار پد است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اصلی‌ترین عامل محدودکننده عملکرد پنل‌های تشعشعی کاتالیستی، نفوذ اکسیژن است [13-15].

در شکل 8، میزان CO و در محصولات احتراق با افزایش دبی سوخت نشان داده شده است. همچنان که مشاهده می‌شود، با افزایش دبی سوخت، میزان CO تولیدی افزایش یافته است. در تمامی حالات آزمایش، میزان CO از 5ppm تجاوز نکرده است. قابل توجه است که آلاینده‌های NO_x در محصولات احتراق در هیچ‌یک از شرایط کاری مشاهده نشد.

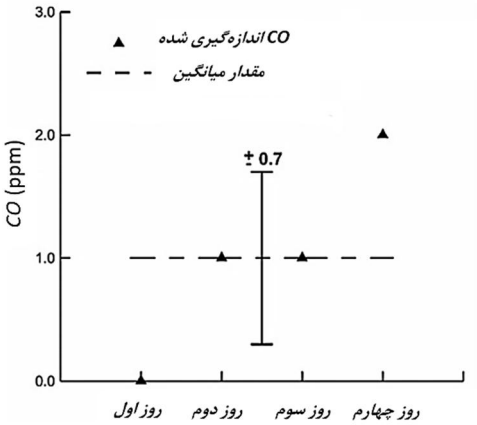
محدودیت نفوذ اکسیژن در پنل‌های تشعشعی به‌واسطه مقاومت انتقال جرم عبور اکسیژن از لایه مرزی جلوی پنل و منافذ لایه کاتالیستی است [13-15]. بنابراین به نظر می‌رسد که جهت بهبود عملکرد پنل می‌توان با ایجاد جریان اجباری هوا در سطح پنل با استفاده از مکش محصولات احتراق، اکسیژن کافی برای شرکت در واکنش کاتالیستی را فراهم کرد. بدین منظور

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]

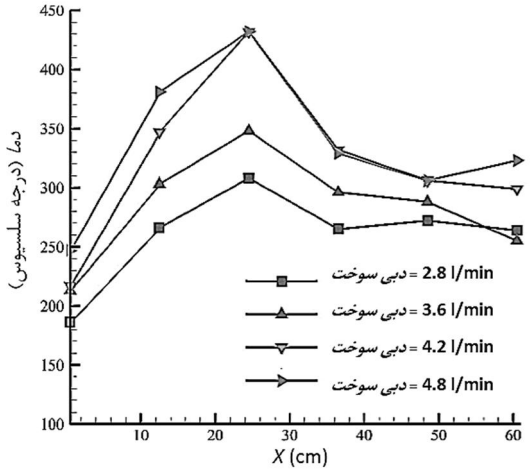
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.9.24.9]



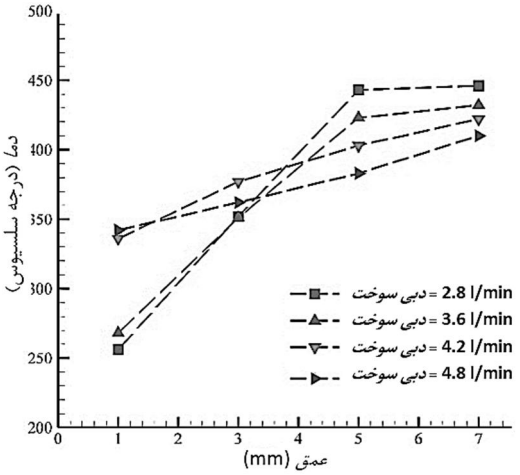
شکل 4 میانگین نتایج اندازه‌گیری دمای سطح در چهار روز مختلف و انحراف معیار از مقدار میانگین در هر نقطه برای دبی سوخت 3/6 l/min و در شرایط محیطی استاندارد 25°C و رطوبت 50%



شکل 5 نتایج اندازه‌گیری CO در چهار روز مختلف و انحراف معیار از مقدار میانگین در هر نقطه برای دبی سوخت 3/6 l/min و در شرایط محیطی استاندارد 25°C و رطوبت 50%



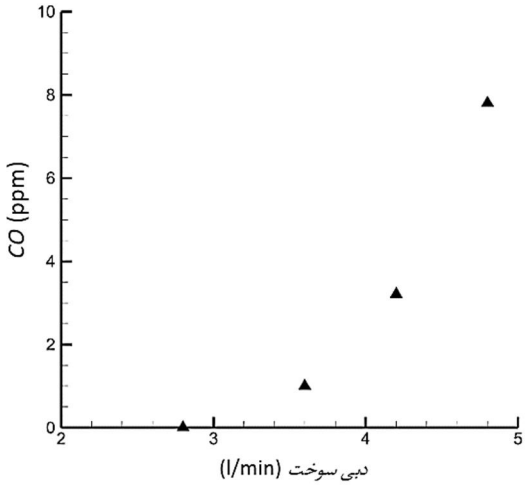
شکل 6 دما روی خط افقی وسط پد ساخته شده در دبی‌های مختلف گاز ورودی در شرایط محیطی استاندارد 25°C و رطوبت 50%



شکل 7 توزیع دما در عمق پد ساخته شده به ازای دبی‌های مختلف گاز ورودی در شرایط محیطی استاندارد دمای 25°C و رطوبت 50%

اثر مکش محصولات احتراق (جریان اجباری هوا روی سطح پنل) بر توزیع دمای سطح و عمق پد مورد ارزیابی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل 9 مشاهده می‌شود، با اعمال مکشِ محصولات احتراق، دمای سطح پد در ابتدا افزایش یافته و سپس به دلیل خنک شدن سطح به دلیل جریان اجباری هوا روی آن، کاهش می‌یابد.

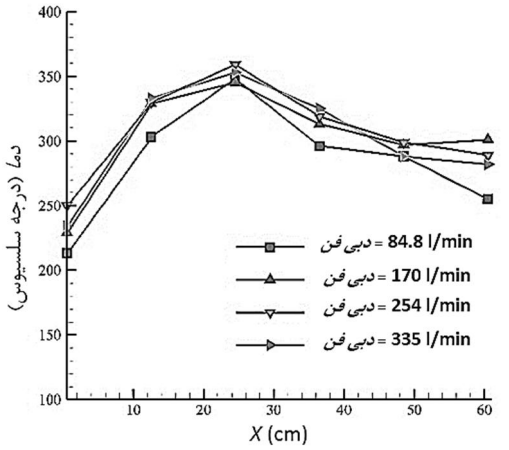
در شکل 10 اثر جریان اجباری هوا روی سطح بر توزیع دما در عمق پد نشان داده شده است. با افزایش دبی مکش، نفوذ اکسیژن به درون لایه کاتالیستی بیش‌تر شده و بنابراین پروفیل دما تخت‌تر می‌گردد. همان‌طور که اشاره شد، با افزایش بیش‌ازحد دبی مکشِ محصولات احتراق، دمای پد به علت افزایش انتقال حرارت آن با محیط اطراف کاهش یافته و باعث کاهش نرخ واکنش می‌گردد. این درحالی است که در عمق پد، دما همچنان بالا است. با توجه به نتایج می‌توان به این برداشت دست‌یافت که افزایش دبی مکش محصولات احتراق اثری متضاد با افزایش دبی سوخت دارد. بدین معنی که با افزایش دبی مکش، به دلیل نفوذ بیشتر اکسیژن به عمق لایه کاتالیستی، واکنش به سمت عمق متمایل می‌گردد. از طرفی، همان‌طور که پیش‌تر عنوان شد،



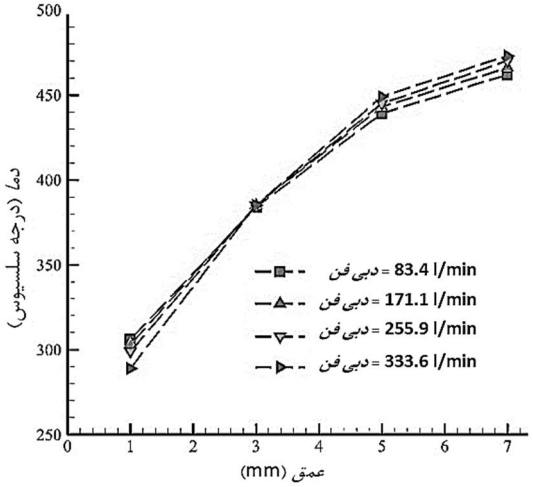
شکل 8 آنالیز CO در محصولات احتراق در دبی‌های مختلف گاز ورودی پد ساخته شده در شرایط محیطی استاندارد دمای 25°C و رطوبت 50%

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.9.24.9]



شکل 9 دما روی خط افقی وسط پد ساخته شده برحسب دبی فن مکش محصولات در دبی ثابت گاز ورودی (3/5 l/min) در شرایط محیطی استاندارد دمای 25°C و رطوبت 50%



شکل 10 توزیع دما در عمق پنل به ازای دبی‌های مختلف فن مکش محصولات در شرایط محیطی استاندارد دمای 25°C و رطوبت 50%

افزایش دبی سوخت، مانع از نفوذ اکسیژن به عمق پنل می‌شود. بنابراین باید جهت بهبود عملکرد پنل جریان اجباری هوا در کنار افزایش دبی سوخت قرار گیرد.

برای مشاهده عملکرد پنل تحت شرایط مختلف آب و هوایی، چند شهر از نقاط مختلف کشور که دارای آب و هوای متمایز ازنظر دما و رطوبت بودند، انتخاب شدند. انتخاب شهرها به‌گونه‌ای انجام شد که برای مشاهده اثر هر یک از پارامترها به تفکیک، دو شهر با یک پارامتر محیطی ثابت و یک پارامتر محیطی متمایز مورد مطالعه قرار گرفتند. به این منظور برای رسیدن به هدف رطوبت نسبی تقریباً ثابت و دماهای متمایز، دو شهر پولادشهر با دمای 8°C- و رطوبت نسبی 72% و لاوان با شرایط محیطی 17°C و رطوبت نسبی 70% انتخاب شد و برای مطالعه شرایط دمای تقریباً ثابت و رطوبت متغیر دو شهر بروجرد با شرایط زمستانی دمای خشک 11°C- و رطوبت نسبی 8% و پولادشهر با دمای خشک 8°C- و رطوبت نسبی 72% مورد مطالعه قرار گرفت. دو حالت حدی دیگر نیز، برای رطوبت و دمای بیشینه و کمینه انتخاب شد که به این منظور دو شهر ماهشهر با شرایط زمستانی 39°C و رطوبت نسبی 98% و خلخال با شرایط 19°C- و رطوبت نسبی 52% مورد ارزیابی قرار گرفتند.

برای تأمین شرایط آب و هوایی مناطق مختلف، پنل و مجموعه تست درون یک اتاقک تست محیطی با قابلیت تأمین دما از 20°C- تا 60°C و رطوبت تا 98% قرار داده شد. دما در 18 نقطه مختلف پنل توسط پیرومتر اندازه‌گیری و میانگین این دماها محاسبه شد که نتایج حاصل در شکل 11 آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش دمای محیط و بدون در نظر گرفتن اثر رطوبت، میانگین دمای سطح کاهش یافته است.

در بررسی پارامتر میانگین دمای سطح بین دو شهر بروجرد و پولادشهر که دارای دمای نزدیک به هم بوده و تفاوتشان در میزان رطوبت نسبی آن‌ها است، مشاهده می‌شود که در دمای تقریباً ثابت با افزایش رطوبت محیط، میانگین دمای سطح کاهش می‌یابد. علت این امر کاهش کسر جرمی اکسیژن با افزایش رطوبت موجود در هوا و بنابراین نفوذ کمتر اکسیژن در درون پنل است.

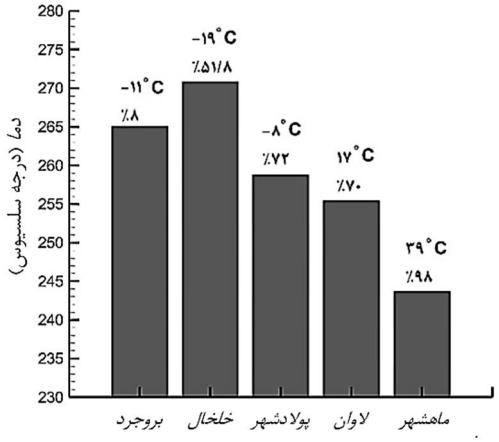
از طرفی با مقایسه دو شهر لاوان و پولادشهر با رطوبت نسبی تقریباً یکسان، مشاهده می‌شود که با افزایش دمای محیط، دمای سطح کاهش می‌یابد که به علت کاهش چگالی هوا با افزایش دما و بنابراین کاهش دبی جرمی اکسیژن نفوذی به درون لایه کاتالیستی است. پس به‌طورکلی مشاهده می‌شود که با افزایش دما و رطوبت محیط، دمای سطح پنل، کاهش می‌یابد.

به‌عنوان دو حالت حدی برای دما و رطوبت، مشاهده می‌شود که شهر خلخال با کمترین دمای محیط و رطوبت 50%، بیشترین دمای سطح و ماهشهر با بیشترین دما و رطوبت، کمترین دمای سطح را دارا است.

در عملکرد پنل تشعشعی، میزان آلاینده‌هایی نظیر NO_x و کربن مونواکسید از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. آلاینده NO_x در هیچ شهری و در هیچ شرایط عملکردی مشاهده نشد. مونوکسید کربن به‌عنوان مهم‌ترین آلاینده در عملکرد پنل پس از NO_x در ادامه آزمایش‌ها بررسی شد.

نمودار مربوط به میزان نشر CO برای شهرهای مختلف در شکل 12 آورده شده است. با مقایسه شهرهای پولادشهر و لاوان با رطوبت‌های نسبی تقریباً یکسان، مشاهده می‌شود که برای پولادشهر با دمای پایین‌تر، میزان نشر CO بیشتر است. همچنین با مقایسه دو شهر بروجرد و پولادشهر با دمای تقریباً یکسان مشاهده می‌شود که میزان نشر CO برای بروجرد با رطوبت پایین‌تر، بیش‌تر از پولادشهر است.

توجه به این نکته ضروری است که به‌طورکلی میزان نشر CO توسط پنل تشعشعی کاتالیستی در تمامی شرایط آب و هوایی زیر 3 ppm بوده و فقط در



شکل 11 میانگین دمای سطح پنل برای دبی سوخت 3/6 l/min و در شرایط محیطی مختلف

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.9.24.9]

ماهشهر با گرم‌ترین و مرطوب‌ترین شرایط آب و هوایی، میزان نشر کمی بیش از سایر شهرها است.

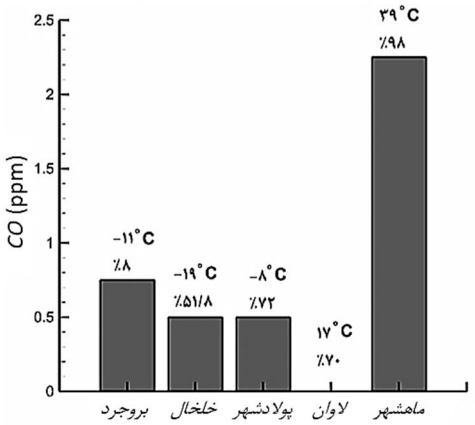
4- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر به ساخت و تست لایه کاتالیستی جهت به‌کارگیری در پنل تشعشعی جهت احتراق گاز طبیعی بدون شعله پرداخته شد. پدهای تشعشعی کاتالیستی از این جهت مورد توجه قرار گرفته‌اند که ضمن حذف شعله حاصل از احتراق، آلاینده‌هایی نظیر NO_x تولید نکرده و میزان CO تولیدی در آن‌ها بسیار کم است. در پنل‌های کاتالیستی حرارت تولیدی به‌صورت تابش از سطح انتقال می‌یابد.

پس از بررسی روش‌های ساخت کاتالیست، با انتخاب روند مناسب آماده‌سازی، یک لایه کاتالیستی ساخته شد. برای تهیه محلول کاتالیستی از 1g هگزاکلرو پلاتینیک اسید شش آبه ($H_2PtCl_6.6H_2O$) در حلال شامل 50% آب مقطر و 50% اتانول، استفاده گردید و در ادامه محلول روی پایه فیبر آلومینا- سیلیکاتی اسپری شد.

برای بررسی عملکرد لایه کاتالیستی ساخته‌شده، این لایه در بدنه یک پنل تشعشعی کاتالیستی مونتاژ شد. از آن‌جا که مهم‌ترین پارامترهای عملکردی در پدهای کاتالیستی، توزیع دما و میزان آلاینده‌های حاصل از احتراق کاتالیستی است، در این راستا یک دستگاه تست عملکرد برای اندازه‌گیری دما در سطح و عمق، میزان مصرف سوخت، اثر گردش هوای اجباری روی سطح، آنالیز محصولات احتراق و نیز اثر شرایط آب و هوایی (دما و رطوبت نسبی) طراحی و ساخته شد. به‌طورکلی نشان داده شد که دمای سطح پدها با افزایش دبی سوخت، افزایش می‌یابد. اما نکته قابل‌توجه پایین‌تر بودن دما در حاشیه‌های کناری پدها بود که به دلیل انتقال حرارت بیش‌تر با محیط اطراف به طریق جابه‌جایی است. همچنین نشان داده شد که عملکرد پنل تشعشعی کاتالیستی مورد آزمایش، در شرایط مختلف کاری بدون تولید آلاینده‌هایی مانند NO_x بوده و میزان CO تولیدی کم‌تر از 5 ppm است.

همچنین آنالیز محصولات احتراق نشان داد که با افزایش دبی سوخت، میزان آلاینده CO افزایش می‌یابد که به علت کاهش زمان تماس واکنش‌دهنده‌ها و کاتالیست اتفاق می‌افتد. نکته قابل‌توجه دیگر کاهش دمای عمق لایه کاتالیستی با افزایش دبی سوخت است که به دلیل افزایش مقاومت برای نفوذ اکسیژن به عمق پد، محل انجام واکنش به سمت سطح متمایل می‌گردد و بنابراین دما در سطح ضمن افزایش، یکنواخت‌تر شده و در عمق



شکل 12 میزان نشر CO برای دبی سوخت 3/6 l/min و در شرایط محیطی مختلف

کاهش می‌یابد. با افزایش دبی گاز به علت افزایش مقاومت در برابر نفوذ اکسیژن به پنل، ماکزیمم دما در عمق پنل به سطح نزدیک‌تر می‌شود.

در این پژوهش برای اولین بار اثر جریان اجباری هوا روی سطح پنل بر توزیع دمای سطح و عمق پد کمی شده و اثر آن عکس اثر افزایش دبی سوخت به دست آمد. به این ترتیب که با افزایش دبی مکش فن، دمای سطح به دلیل افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی از جلوی پد کاهش یافته ولی دما در عمق به دلیل نفوذ بیش‌تر اکسیژن به لایه‌های درونی‌تر، افزایش یافت. گردش هوای اجباری روی سطح پنل به دلیل تغذیه اکسیژن بیش‌تر به لایه کاتالیستی، باعث افزایش دما در سطح پنل شده و همچنین توزیع دما در عمق پنل تخت‌تر می‌شود.

همچنین برای نخستین بار نشان داده شد که شرایط آب و هوایی بر عملکرد پنل تأثیر می‌گذارد. برای مطالعه این تأثیرات پنج شهر بروجرد، خلخال، لاوان، ماهشهر و پولادشهر با شرایط آب و هوایی قابل قیاس انتخاب شدند. در نتایج این پژوهش نشان داده شد که با کاهش دمای محیط و بدون در نظر گرفتن اثر رطوبت، دمای سطح لایه کاتالیستی افزایش می‌یابد. همچنین بالاترین دمای سطح در شرایط محیطی با رطوبت 50% و کمترین دمای محیط حاصل شد. در دمای تقریباً ثابت می‌توان گفت که با کاهش رطوبت از مقدار 50% (بروجرد) و یا افزایش آن (پولادشهر) دمای سطح کاهش می‌یابد. از طرف دیگر میزان نشر CO در تمامی شرایط آب و هوایی مورد بررسی، کم‌تر از 3 ppm و بدون حضور NO_x ثبت گردید که حاکی از احتراق پاک لایه کاتالیستی در شرایط آب و هوایی مختلف است.

5- مراجع

[1] L.D. Pfefferle , W.C. Pfefferle, Catalysis in Combustion, *Catalysis Reviews-science and Engineering*, Vol. 29, Issue 2-3, pp.219-267, 1987.

[2] P. Bröckerhoff, B. Emonts, Catalytic Combustion of Natural Gas for Heating Appliances, *Studies in Surface Science and Catalysis*, Vol. 61, pp. 557-563, 1991.

[3] M. Namazi, *Fabrication and performance testing of the radiative catalytic pad for flameless combustion of natural gas,* MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, 2013. (In Persian)

[4] S. W. Radcliff, R.G. Hickman, Diffusive catalytic combustors, *Journal of the Institute of Fuel,* Vol. 48, pp. 208-215, 1975.

[5] D.L. Trimm,C.W. Lam, The combustion of methane on platinum-alumina fibre catalysts-I, *Chemical Engineering Science,* Vol. 35, pp. 1405-1413, 1980.

[6] D.L. Trimm,C.W. Lam, The combustion of methane on platinum-alumina fibre catalysts-II, *Chemical Engineering Science,* Vol. 35, pp. 1731-1739, 1980.

[7] H. Sadamori, Application concepts and evaluation of small-scale catalytic combustors for natural gas, *Catalysis Today,* Vol.47, pp. 325-338, 1999.

[8] Y.S. Seo, S.K. Kang, H.D. Shin, A catalytic burner using propane and toluene alternatively for the drying of textile coatings, *International Journal of Energy Research,* Vol. 23, pp. 543-556, 1999.

[9] Y.S. Seo, S.J. Cho, K.S. Song, S.K. Kang, A fibre-mat catalytic burner for the heating system of PVC tiles, *International Journal of Energy Research,* Vol. 26, pp. 921-934, 2002.

[10] N. Jodeiri, L. Wu, J. Mmbaga, R.E. Hayes, S.E. Wanke, Catalytic combustion of VOC in a counter-diffusive reactor, *Catalysis Today,* Vol. 155, issue 1-2, pp. 147–153, 2010.

[11] S.M. Hosseinalipour, A. Behravan, M. Namazi, M. Madaelahi, M. Baghsheikhi, Experimental and numerical analysis of heating the fluid passing through the tube using radiative catalytic heaters, in *The 15th International Conference on fluid dynamics*, Bandar Abbas, Iran, 2013. (In Persian)

[12] S.M. Hosseinalipour, A. Behravan, M. Baghsheikhi, M.H. Borghei, A. Adham, Numerical & experimental investigation of catalytic flameless heater for process fluid heating, in *The 1th international Conference on mechanical engineering and advanced technology*, Isfehan, Iran, 2012. (In Persian)

[13] S.M. Hosseinalipour, A. Behravan, M. Namazi, M. Madaelahi, M. Parvari, 2D numerical analysis of radiative catalytic panel by using finite element method, in *The 15th International Conference on fluid dynamics*, Bandar Abbas, Iran, 2013. (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.9.24.9]

[14] S.M. Hosseinalipour, M. Madaelahi ,A. Behravan, M. Parvari,, 2D simulation of catalytic radiant counter diffusive burners, *Modares Mechanical Engineering*, (accepted), 2014. (In Persian)
[15] S.M. Hosseinalipour, M. Madaelahi, A. Behravan, M. Namazi, Kh. Ghadiri, Computer Simulation of Performance of Flameless Catalytic Burners, *Jokull Journal*, Vol 63, No. 10, 2013.
[16] Patrick J. Denny, David L. Harrison, Martyn H. Stacey, *Catalyst Bed For Use In A Catalytic Flameless Heater Device,* United States Patent No. 4177168 A, 1974.
[17] H. Sadamori, A. Chikazawa, S. Okamura, C. Noda, *Catalyst For Low-Temperature Combustion And Process For Its Preparation,* European Patent No. 19820900033, 1981.
[18] Kh. Ghadiri, *Designing and Fabrication of a setup for performance testing of the radiative catalytic panels,* BSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, 2013. (In Persian)
[19] S.M. Hosseinalipour, A. Behravan, M. Namazi, Kh. Ghadiri, M. Madaelahi, M. Parvari, Identify components and experimental study of the radiative catalytic panels, , in *The 1th national Conference and exhebition on Environment, Energy & Clean Industry,* Tehran, Iran, 2013. (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-23]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.9.24.9]