

طراحی، ساخت و تست هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای جهت گرمایش سیال فرآیندی

فرهاد ظفری

دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشگاه علم و صنعت ایران
farhad_zafari@mecheng.iust.ac.ir

آروین بهروان

دانشجوی دکتری- دانشگاه علم و صنعت ایران
behravan@iust.ac.ir

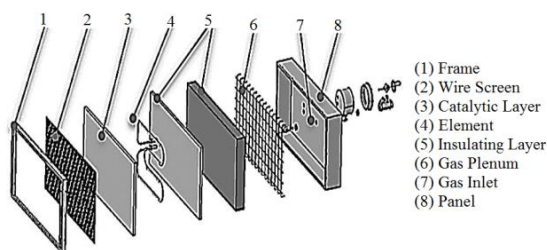
سید مصطفی حسینی پور

استاد- دانشگاه علم و صنعت ایران
alipour@iust.ac.ir

چکیده

بسیاری را دارا می‌باشند. برخی از کاربردهای صنعتی این پنل‌ها عبارتند از: کوره‌های پخت رنگ، کوره‌های عملیات حرارتی، صنایع پارچه و چرم، صنایع چوب و کاغذ، صنایع غذایی، صنایع نفت و گاز جهت گرمایش سیال فرآیندی. همچنین به علت خصوصیات ذکر شده بهترین و امن‌ترین سیستم جهت استفاده در محیط‌های پرخطر است [۱،۲].

اجزای مختلف یک پنل تابشی تخت در شکل ۱ نشان داده شده است، در این پنل‌ها از یک لایه کاتالیستی به همراه چندین لایه عایق استفاده می‌شود، این لایه‌ها وظیفه توزیع سوخت گازی، جلوگیری از اتلاف حرارت از پشت پنل و همچنین پیش گرمایش سوخت را بر عهده دارند. واکنش احتراق در لایه کاتالیستی نیاز به انرژی فعالسازی داشته که توسط یک المنت حرارتی تامین می‌گردد.



شکل ۱- طرحواره پنل‌های کاتالیستی تخت [۵]

در مقاله حاضر، طراحی، ساخت و تست هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای جهت گرمایش سیال فرآیندی در دستور کار قرار گرفته است. در این هیترها با استفاده از احتراق کاتالیستی، دمای احتراق کاهش یافته که ضمن تولید حرارت تابشی، موجب حذف شعله و عدم تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی می‌گردد. به منظور افزایش راندمان این هیترها، با در نظر گرفتن پارامترهای طراحی نظیر نسبت طول به قطر هیتر، قطر هیتر به قطر لوله، طول و قطر لوله، شکل هیتر از حالت تخت به شکل لوله‌ای تغییر یافت تا با افزایش ضریب شکل بین هیتر و لوله، راندمان سیستم افزایش یابد. سپس این دستگاه جهت گرمایش سیال عبوری از درون یک لوله با طول ۶۰ سانتی‌متر و قطر ۴ اینچ در آزمایشگاه انرژی، آب و محیط زیست دانشگاه علم و صنعت ایران طراحی و ساخته شد. جهت تست عملکرد سیستم، پارامترهای دمای سطح و عمق هیترها، دمای سوخت، دما و دبی سیال فرآیندی و آنالیز محصولات احتراق، اندازه‌گیری شد. سپس نتایج بدست آمده با نتایج تست‌های انجام شده با استفاده از ۴ هیتر تخت مقایسه گردید و مشاهده شد که راندمان گرمایش سیال فرآیندی با هیتر لوله‌ای نسبت به هیتر تخت، ۱۳ درصد افزایش یافته و از ۲۵ درصد به ۳۸ درصد رسیده است.

کلمات کلیدی: هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای، احتراق کاتالیستی، گرمایش سیال فرآیندی، افزایش راندمان، تست عملکرد

مقدمه

با رسیدن دمای لایه کاتالیستی به 120°C واکنش شروع شده و در ادامه به صورت خودبخودی ادامه می‌یابد. دمای حاصل از احتراق کاتالیستی در سطح پنل معمولاً در محدوده 400°C می‌باشد. کاتالیست مورد استفاده در این پنل‌ها، معمولاً کاتالیست فلزات نجیب^۱ مانند پلاتین و پالادیم بر روی پایه فیبر آلومینا است [۲،۳،۴].

پنل‌های تابشی کاتالیستی امروزه به عنوان سیستم‌های تولید حرارت پاک و ایمن تلقی می‌گردند که به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود، توانسته‌اند جایگاه خود را در بسیاری از کاربردهای تجاری و صنعتی باز نمایند. به عنوان یکی از کاربردهای صنعتی پنل‌های تابشی که در سال‌های اخیر بیشتر به آن پرداخته شده است، می‌توان به گرمایش سیال عبوری از درون لوله اشاره کرد، این سیالات می‌توانند سیالات قابل انفجار نظیر گاز طبیعی در ایستگاه‌های تقلیل فشار، گاز طبیعی سوخت توربین‌های گاز و یا سوخت‌های مایع جهت حرکت در خطوط انتقال باشند. با توجه به عدم تشکیل شعله در این پنل‌ها استفاده از آن‌ها در گرمایش سیالات پرخطر نظیر روغن در پالایشگاه‌ها و چاه‌های استخراج مرسوم شده است. استفاده از این پنل‌ها در گرمایش سیالات فرآیندی نظیر گاز طبیعی، پروپان، نفت و روغن، از سال ۲۰۰۶ آغاز گردیده و تا سال ۲۰۱۰ نزدیک به ۱۲۰ نمونه از این هیترها در این کاربرد مورد بهره‌برداری قرار گرفته است، این هیترها

احتراقی که در آن از یک کاتالیست برای تغییر و بهبود نرخ واکنش‌های احتراقی استفاده گردد، احتراق کاتالیستی نامیده می‌شود. کاتالیست در واقع یک مسیر واکنش انحرافی با انرژی فعالسازی کمتر ایجاد می‌کند، بدون اینکه در طول واکنش مصرف گردد. در احتراق کاتالیستی به دلیل کاهش انرژی فعال سازی واکنش، احتراق بین سوخت و هوا در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد که این امر منجر به حذف شعله می‌گردد. دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس زیر نقطه اشتعال بسیاری از گازها و بخارات قابل اشتعال می‌باشد. بنابراین از این فرآیند می‌توان در گرمایش محیط‌های پرخطر و سیالات قابل اشتعال نظیر گاز استفاده کرد. احتراق کاتالیستی در مقایسه با احتراق همگن^۱، در دماهای پایین‌تری رخ می‌دهد، که منجر به تولید آلاینده اندک در آن بوده به‌گونه‌ای که مقدار اکسیدهای نیتروژن در محصولات احتراق را به صفر می‌رساند همچنین به علت حذف دودکش و احتراق کامل گاز در دمای پایین از راندمان بالاتری برخوردار است.

مزیت دیگر احتراق کاتالیستی این است که در آن شعله‌ای مشاهده نمی‌شود که این ویژگی امنیت این نوع از احتراق را بالا می‌برد. با توجه به مزایای پرشمار احتراق کاتالیستی، تلاش‌ها به سمت ساخت سیستمی با هدف ایجاد گرمایش معطوف شد و این تلاش‌ها منجر به ساخت پنل^۲ تابشی کاتالیستی شد. این پنل‌ها با توجه به مکانیزم تبدیل انرژی و انتقال حرارت کاربردهای

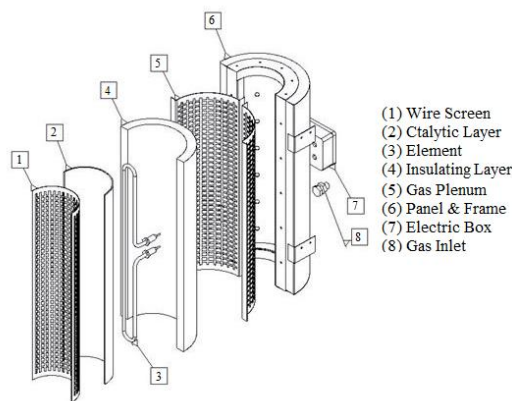
¹ Homogenous combustion

² Panel

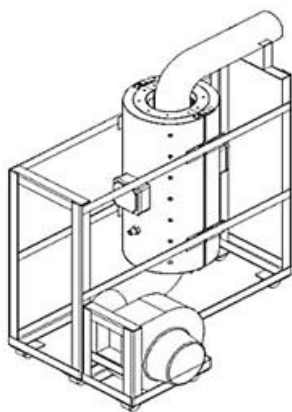
⁶ Nobel metals

روی لوله عبوری سیال فرآیندی قرار گرفته و مانع از هدر رفت و خروج انرژی از هیتر تابشی شود. با توجه به هدف هیتر که گرمایش سیال عبوری از داخل لوله می‌باشد اقدام به طراحی و ساخت ۲ پنل تابشی کاتالیستی نیم‌استوانه متناسب با سایز لوله نموده و با چیدمان مناسب آنها یک هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای برای اولین بار در جهان ساخته شد.

در یک هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای از دو پنل تابشی نیم‌استوانه استفاده می‌شود در شکل ۳ اجزای این پنل نیم‌استوانه نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود سیستم هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای دارای ۲ عدد پنل تابشی نیم‌استوانه به همراه لوله‌ی عبور سیال فرآیندی و پایه سیستم می‌باشد. سیال فرآیندی از داخل لوله عبور کرده و لوله عبور سیال با جذب حرارت از هیتر تابشی کاتالیستی گرمای لازم جهت گرمایش سیال فرآیندی را فراهم می‌کند. همچنین جهت تست پارامترهای مختلف در این سیستم با توجه به داده‌های مطلوب یک سیستم تست طراحی شده و بر روی هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای اعمال شده است که در ادامه به تفصیل توضیح داده خواهد شد.



شکل ۳- اجزای پنل تابشی کاتالیستی نیم‌استوانه طراحی شده



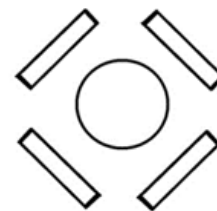
شکل ۴- هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای طراحی شده

طراحی و ساخت هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای

پارامترهای طراحی که جهت ساخت هیتر لوله‌ای به منظور گرمایش سیال فرآیندی در نظر گرفته شده عبارتند از: طول هیتر، قطر هیتر (نسبت قطر به طول هیتر از اهمیت بالایی برخوردار است)، قطر لوله، نسبت قطر هیتر به قطر لوله، چیدمان هیتر و لوله (نصب عمودی)، جایابی تجهیزات

جایگزین هیترهای حمامی در صنعت شده‌اند [۵،۶]. یکی از این محیط‌های پرخطر صنایع نفت و گاز است، بطور مثال یکی از موارد استفاده از هیترهای کاتالیستی تابشی ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز بوده که به علت افت فشار گاز درجه حرارت گاز کم شده و باعث ایجاد ترکیبات مختلف یخ‌زده می‌شود که می‌تواند به تجهیزات مختلف ایستگاه صدمه وارد کند [۷].

در هیترهای تابشی، با قرار دادن حداقل دو و حداکثر چهار پنل تخت به صورت افقی حول لوله و در فاصله‌ای مشخص از سطح آن، انرژی تابشی صادره ناشی از فرآیند احتراق کاتالیستی در پنل‌ها، جذب لوله شده و بنابراین، سیال عبوری از درون آن، گرم می‌شود. شکل ۲ شماتیک قرارگیری ۴ پنل تخت حول لوله عبور سیال فرآیندی در این سیستم‌ها را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که با توجه به اثرگذاری زاویه نصب پنل بر عملکرد احتراقی آن به دلیل محدودیت نفوذ اکسیژن به لایه کاتالیستی و خروج محصولات احتراق از آن، بیشتر از چهار پنل نمی‌توان به صورت چیدمان افقی حول لوله قرار داد.



شکل ۲- طرحواره قرارگیری ۴ پنل تابشی کاتالیستی تخت حول لوله [۷]

این امر راندمان حرارتی هیتر را به علت فرار تابش از مجموعه محدود می‌نماید، همچنین نمی‌توان پنل را بیش از حدی به لوله نزدیک کرد چون باعث عدم رسیدن اکسیژن به پنل می‌شود. البته باید به این نکته توجه نمود که طبیعتاً قرار دادن چهار پنل حول لوله عملکرد بهتری را نسبت به دو پنل خواهد داشت [۷،۸].

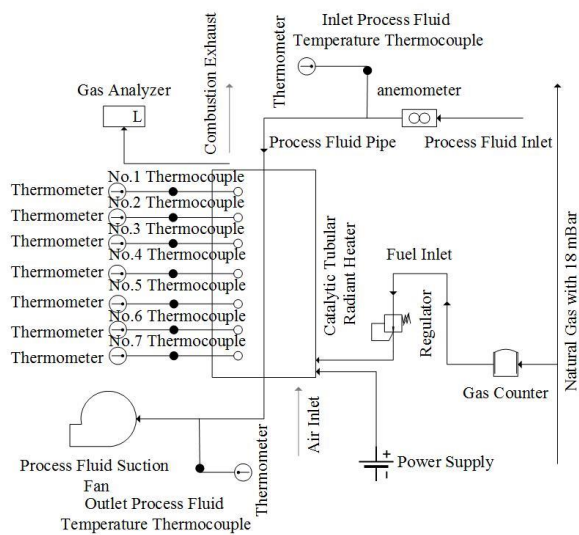
تحقیقات گسترده‌ای توسط نویسنده از سال ۱۳۸۸ در گرمایش سیال فرآیندی با پنل‌های تخت در زمینه طراحی، ساخت و تست پنل‌های تابشی انجام شده است. تست و شبیه‌سازی گرمایش سیال فرآیندی با دو پنل تخت در لوله‌ای ۴ اینچ با طول ۶۰ سانتی‌متر طی دو تحقیق مختلف با پنل‌هایی با ابعاد ۳۰ در ۶۰ سانتی‌متر و ۱۵ در ۶۰ سانتی‌متر انجام شده است [۷]. طبق آزمایشات انجام شده بر روی هیتر تابشی کاتالیستی جهت افزایش راندمان با ۴ پنل تخت جهت گرمایش سیال فرآیندی بازده در حدود ۲۵ درصد مشاهده شده است که علت آن را می‌توان فرار تابش از داخل هیتر به بیرون، عدم وجود بدنه مستقل برای هیتر، تماس هیتر با فضای بیرون، عدم عایق بودن فضای جانبی، هدر رفت حرارت به علت گرم شدن سطوح جانبی و فوقانی هیتر و خروج اجتناب‌ناپذیر محصولات احتراق داغ دانست [۹]. همچنین طی آزمایشات انجام شده بر روی پنل‌های تابشی این سیستم‌ها از لحاظ تولید آلاینده در شرایط محیطی مختلف مورد بررسی قرار گرفتند که میزان آلاینده‌گی بسیار ناچیزی (تولید کربن مونوکسید کمتر از ۱۰ ppm) را با تغییر شرایط محیطی و شبیه‌سازی شرایط چندین شهر در کشور از خود نشان داده‌اند [۱۰،۱۱].

به منظور حل مشکل فنی مطرح شده جهت افزایش ضریب دید تابش بین سطح پنل و سطح لوله تصمیم بر این شد که شکل پنل به طور لوله‌ای شود تا پنل و لوله به یک نزدیک شود تا تمرکز تابش ساطع شده از سطح پنل بر

شکل ۵ هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای را پس از مونتاژ کامل قطعات و قرار گرفتن بر روی پایه نشان می‌دهد. به دلیل جذب تابش بیشتر توسط لوله، روی سطح لوله با رنگ مقاوم به حرارت با فام مشکی رنگ شد.

تست هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای

جهت تست عملکرد گرمایش سیال فرآیندی با استفاده هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای سیستم تستی مطابق شکل ۶ طراحی شد و بر روی سیستم قرار گرفت. جهت بررسی عملکرد هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای می‌بایست پارامترهای مختلفی نظیر دمای سطح هیتر، دمای عمق هیتر، محصولات احتراق، دمای سیال فرآیندی در ورودی و خروجی، سرعت جریان سیال فرآیندی (دبی سیال فرآیندی)، دبی سوخت و دمای محصولات احتراق مورد اندازه‌گیری و ارزیابی قرار داده شوند. لذا دستگاه تست با در نظر گرفتن پارامترهای مذکور، محدوده تغییرات و نحوه اندازه‌گیری آن‌ها طراحی و ساخته شد. برای تست هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای از هوا به عنوان سیال فرآیندی استفاده شده است.



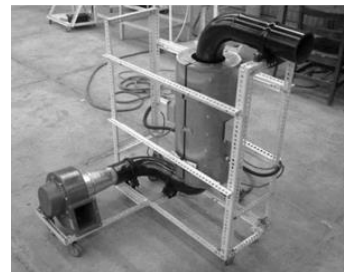
شکل ۶- طرحواره مجموعه تست عملکرد لایه تابشی کاتالیستی

جهت دستیابی به پارامترهای مورد مطالعه در این پژوهش تجهیزات اندازه‌گیری مناسب بر اساس دامنه تغییرات پارامترها انتخاب گردید. برای اندازه‌گیری دما در سطح پل‌های تابشی کاتالیستی نیمه‌استوانه‌ای از ترمومتر^۵ لیزری استفاده شد که با استفاده از امواج مادون قرمز ساطع شده از سطح دما را اندازه‌گیری می‌کند. برای اندازه‌گیری دبی سوخت از یک کنتور گاز G4 با دقت ۲۰۰ میلی‌لیتر استفاده شد. برای سنجش محصولات احتراق از آنالیزور گاز ساخت شرکت KIMO استفاده شد که می‌تواند میزان گازهای مختلف از جمله CO و NOx را نشان دهد همچنین برای سنجش گاز نسوخته نیز از دستگاه کروماتوگراف^۶ استفاده شده است. برای اندازه‌گیری دمای عمق از یک ترموکوپل نوع K استفاده شده است که دارای تحمل حرارتی تا دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد و جهت خواندن دمای

داخلی، راه‌اندازی اولیه، دبی سیال فرآیندی، دبی سوخت. با توجه به این‌که نمونه‌های ۲ پوله و ۴ پوله تست شده به عنوان نمونه‌هایی برای مقایسه مطرح شده‌اند و دارای ابعاد ۶۰ سانتی‌متر هستند، طول ۶۰ سانتی‌متر برای ارتفاع هیتر انتخاب شده است. شعاع داخلی هیتر اصلی‌ترین پارامتر در طراحی است و تعیین این پارامتر با فرض ابعادی استاندارد برای لوله تابع چندین شرایط است. نسبتی به صورت نسبت طول هیتر به قطر هیتر تعریف می‌گردد که مقدار آن هر چقدر بیشتر باشد فرار تابش از قسمت بالایی و پایینی هیتر کمتر خواهد بود، قابل درک است هر آنچه فاصله سطح تابش با لوله کمتر باشد میزان حرارت تشعشی بیشتری به لوله رسیده و گرمایش سیال داخل لوله بیشتر خواهد بود ولی باید به این نکته توجه کرد که گازهای ناشی از احتراق راه خروجی به غیر از فاصله‌ی بین لوله و هیتر نخواهند داشت پس در صورتی که هیتر و لوله بیش از اندازه به هم نزدیک شوند مقدار کربن دی‌اکسید در ارتفاع‌های بالاتر باعث اختلال در سوختن گاز می‌شود. همانطور که توضیح داده شد هر چه طول هیتر را بیشتر در نظر بگیریم نیز خواهیم دید که اختلال در سوختن گاز ایجاد خواهد شد. جهت طراحی و ساخت با توجه به مطالعات گذشته [۷] لوله ۴ اینچ و فاصله ۲ سانتی‌متر از لوله نیز برای هیتر انتخاب گردیده است.

در بحث انتخاب لوله برای عبور سیال فرآیندی چند پارامتر مورد توجه قرار می‌گیرد. ابتدا طول لوله و دیگر قطر خارجی لوله و ضخامت پوسته لوله، این نکته قابل ذکر است که لوله‌ی انتخابی باید ابعاد و اندازه طبق استاندارد داشته و به این منظور باید به جدول استاندارد ابعاد لوله^۱ مراجعه کرده و ابعاد لوله را به دست آورد. با توجه به نمونه‌ی قابل مقایسه از لحاظ عملکردی که در بخش‌های قبل توضیح داده شد طول لوله ۶۰ سانتی‌متر انتخاب شده است که با توجه به استفاده از لوله آهنی با استاندارد API 51^۲ در نمونه ۴ پوله اینجا نیز از همان ابعاد استفاده شده تا بتوان مقایسه مناسبی به عمل آورد. به این منظور از لوله ۴ اینچ SCH40^۳ استفاده شده است. برای به حرکت درآوردن سیال در داخل لوله از مکش هوا استفاده شده است که با توجه به جهت حرکت محصولات احتراق مسیر معکوس را طی نموده و نرخ انتقال حرارت بالاتر برود. طبق استاندارد ماکزیمم سرعت گاز درون لوله ۲۰ متر بر ثانیه است. جهت ایجاد انتقال حرارت ماکزیمم از یک فن با توانایی ایجاد سرعت سیال ۲۰ متر بر ثانیه درون لوله استفاده شده است.

پس از تهیه نقشه‌های تمامی قطعات و همچنین نقشه مورد نیاز جهت برش قطعات اولیه پل‌های تابشی نیمه‌استوانه‌ی ساخت را شروع نموده که شامل برش لیز، نورد و خمکاری قطعات، جوش و در نهایت مونتاژ کامل قطعات و تجهیزات داخلی است.



شکل ۵- هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای

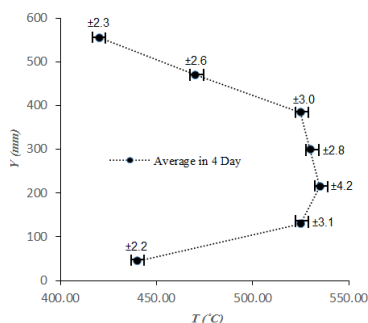
1 Nominal pipe size
2 American Petroleum Institute
3 Schedule
4 Thermo meter
5 Chromatograph

در این تست برای هر پنل تابشی نیم‌استوانه ۷ ارتفاع جهت سنجش دمای عمق استفاده شده که دمای ۴۰ نقطه در هر ارتفاع برای عمق هیتر اندازه‌گیری شده است بدین ترتیب ۲۸۰ داده برای هر پنل تابشی کاتالیستی نیم‌استوانه در هر دبی سوخت بدست آمده است.

تست محصولات احتراق به منظور آنالیز و بررسی اجزای مختلف گاز ناشی از احتراق انجام می‌شود، این تست باعث می‌شود تا دید مناسبی از عملکرد هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای از لحاظ راندمان احتراق و کیفیت سوختن گاز به‌دست آید. بوسیله آنالیزور گاز می‌توان میزان و غلظت هر یک محصولات حاصل از احتراق را تعیین کرد و به این مساله پی برد که آیا سیستم احتراقی از نظر میزان تولید آلاینده‌ها در سطح قابل قبولی قرار دارد و استانداردهای زیست محیطی را ارضا می‌کند یا خیر! مطلب دیگری که از تحلیل نتایج بدست آمده از آنالیزور گاز استخراج می‌شود، راندمان احتراق است. گازهای حاصل از احتراق شامل اجزای مختلفی می‌باشند که عبارتند از: N_2 ، CO ، CO_2 ، O_2 ، NO_x ، SO_2 و هیدروکربن‌های سوخته نشده. با توجه به این‌که آنالیزور محصولات احتراق می‌تواند مقدار گاز سوخته تا ۱ درصد را نشان دهد، باید از تست مطمئن‌تری برای مقدار گاز سوخته استفاده شود، به این دلیل از کروماتوگراف استفاده می‌شود، جهت کار با این دستگاه باید نمونه‌های گاز ناشی از احتراق را در کیسه‌های نمونه برداری ذخیره کرده و وارد دستگاه نمود. کروماتوگرام برای بررسی و جداسازی مواد فرار بدون تجزیه شدن آن‌ها، بکار می‌رود.

جهت بررسی راندمان حرارتی گرمایش سیال فرآیندی نیاز به اندازه‌گیری تغییرات ایجاد شده در دمای هوای درون لوله و همچنین مقدار دبی جریان هوا خواهیم داشت. مکش هوا در لوله عبور سیال فرآیندی توسط یک فن با توانایی ایجاد سرعت ۲۰ متر بر ثانیه که ماکزیمم سرعت مجاز سیالات گازی نظیر گاز طبیعی درون لوله است انجام می‌شود. در حالت فن روشن سرعت هوای عبوری از لوله یا دبی جریان را با استفاده از سرعت سنج پروانه‌ای در ۱۴ نقطه اندازه‌گیری می‌کنیم. با توجه به تغییر دمای سیال درون لوله مقدار حرارت منتقل شده به سیال قابل اندازه‌گیری خواهند بود. به این منظور پس از ۳۰ دقیقه کارکرد سیستم دمای ۱۴ نقطه در ورودی (۷ نقطه عمودی و افقی شعاعی) و ۱۴ نقطه در خروجی (۷ نقطه عمودی و افقی شعاعی) لوله عبور سیال فرآیندی اندازه‌گیری شده است.

جهت بررسی تکرارپذیری آزمایشات و بررسی صحت نتایج میزان یکی از آلاینده‌های احتراق را در ۴ بار تکرار در ۴ روز متفاوت اندازه‌گیری کرده و سپس انحراف معیار داده‌ها از مقدار میانگین (برای دمای سطح در نقطه‌های مشخص و همچنین در یک نقطه برای CO) محاسبه شده که نتایج آن در دو شکل های ۷ و ۸ مشاهده می‌گردد.



شکل ۷- میانگین داده‌های مربوط به دمای سطح در چهار روز مختلف و انحراف معیار از مقدار میانگین در نقاط یک خط عمودی از سطح

ترموکوپل نیز از ترمومتر دیجیتال مدل MASTECH MS استفاده شده است.

از یک فن جهت مکش هوا به عنوان سیال فرآیندی در خلاف جهت حرکت محصولات احتراق استفاده شد که جهت اندازه‌گیری دبی سیال فرآیندی عبوری از آن از یک سرعت‌سنج پروانه‌ای با قطر پره ۰/۶ اینچ و قابلیت اندازه‌گیری سرعت در بازه ۰/۶ تا ۴۰ متر بر ثانیه، بهره گرفته شد.

قبل از انجام تست‌ها باید سیستم راه‌اندازی گردد. به این منظور با اتصال برق المنت حرارتی لایه کاتالیستی را تا دمای ۱۲۰ درجه سانتیگراد گرم کرده و سپس با ورود سوخت و شروع واکنش کاتالیستی المنت از مدار خارج شده و شیر گاز باز می‌ماند.

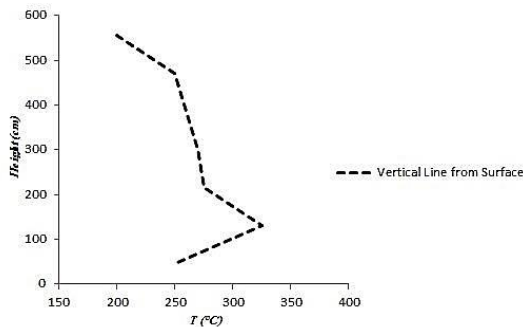
مصرف سوخت سیستم هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای که متشکل از دو نیم‌استوانه می‌باشد ۸ لیتر بر دقیقه است که میزان شدت تابش خروجی ۲۰ کیلووات بر مترمربع تابش را ایجاد می‌نماید و بر این اساس دبی سوخت تنظیم می‌گردد. بعد از راه‌اندازی هیترها فن روشن شده و هوا با سرعت ۲۰ متر بر ثانیه که معادل دبی ۵۹۴/۵ مترمکعب بر ساعت خواهد بود از داخل لوله که سیال از آن عبور کرده و سطح آن توسط هیتر تابشی کاتالیستی حرارت می‌یابد، عبور می‌کند. چندین حالت مختلف برای داده برداری در نظر گرفته شده تا تاثیرات مختلف پارامترهای مورد بررسی در تست‌های انجام شده لحاظ گردد ابتدا هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای را در حالت باز مورد بررسی قرار داده‌ایم بدین معنا که دو بخش نیم‌استوانه را از هم جدا نموده و تست‌های مربوط به دما و آلاینده در هر کدام از آنها در دو دبی سوخت مختلف انجام شده است. سپس حالت بسته را در نظر گرفته‌ایم ولی لوله عبور سیال فرآیندی را حذف نموده‌ایم تا تاثیر تابش متقابل را در هیتر تابشی به‌صورت افزایش دما بررسی نماییم و در آخر نیز سیستم را بسته و در حضور لوله عبور سیال فرآیندی در ۲ دبی مختلف سوخت جهت بررسی آلاینده، راندمان سیستم و توزیع دما در سطح و عمق هیتر تست‌ها انجام شده‌اند. جهت تغییر دبی سوخت از یک رگولاتور با ورودی فشار گاز شهری یعنی ۱۸ میلی‌بار و خروجی قابل تنظیم استفاده شده است. در هر مرحله از اجرای تست‌ها داده برداری ۲ بار تکرار شده است تا نتایج قابل اعتماد بوده و انحراف آنها نیز سنجیده شود. ثبت داده‌ها پس از سی دقیقه کارکرد سیستم و رسیدن به حالت پایا انجام شده است.

اولین پارامتر جهت تست دمای سطح هیترها است. سطح هیترها به‌صورت منحنی بوده و دمای نقاط مختلف هیتر جهت بررسی مورد نیاز است. یکی از نتایج مدنظر، رسیدن به توزیع دمای مناسب در سطح هیتر جهت اثبات عملکرد مناسب هیتر است، گستره دما در سطح هیتر طبق پیش‌بینی باید در حدود ۳۵۰ الی ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد باشد جهت انجام این تست ۴۹ نقطه بر روی سطح هیتر انتخاب شد که توزیع مناسبی از دما در سطح هیتر را نشان دهد.

مهم‌ترین تست انجام شده در این پژوهش تست دمای عمق است که اطلاعات ارزشمندی از توزیع حرارت در عمق پنل و دمای لایه‌های مختلف در ارتفاع‌های مختلف را نشان می‌دهد. تغییرات دمایی در عمق هیتر در گستره ۲۰ الی ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است. جهت اندازه‌گیری دمای عمق هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای در عمق‌های مختلف از ۷ سوراخ تعبیه شده برای عبور ترموکوپل از پشت پنل‌ها به طرف جلوی پنل استفاده شده است. به این منظور با تعریف عمق صفر در خارجی‌ترین نقطه هیتر که سطح کاتالیست است تست را آغاز کرده و تا بدنه لوله که در واقع خارج از هیتر قرار می‌گیرد این تست را ادامه داده‌ایم.

توزیع دمای مناسبی در سطح هیتر قابل مشاهده است. نکته قابل توجه در کلیه نتایج این قسمت این است که طبق پیش‌بینی نقاط نزدیک تر به پایین هیتر دارای دمای بالاتری هستند زیرا مقدار اکسیژن مورد نیاز برای واکنش تامین می‌گردد.

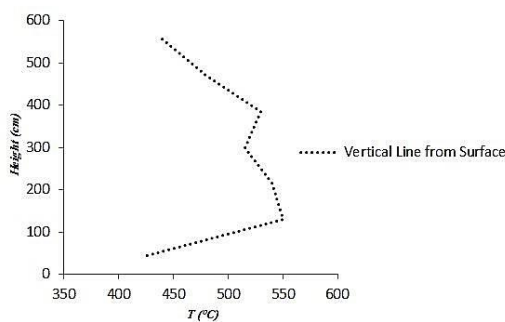
در شکل ۱۰ نمودار فوق برای هیتر تابشی لوله‌ای در دبی سوخت ۳/۵ لیتر بر دقیقه مشاهده می‌گردد. همانطور که قابل مشاهده است بخشی از سیستم به علت کمبود سوخت روشن نشده است.



شکل ۱۰- توزیع دما در سطح هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای توسط ترموکوپل اندازه‌گیری دمای عمق در دبی ۳/۵ لیتر بر دقیقه

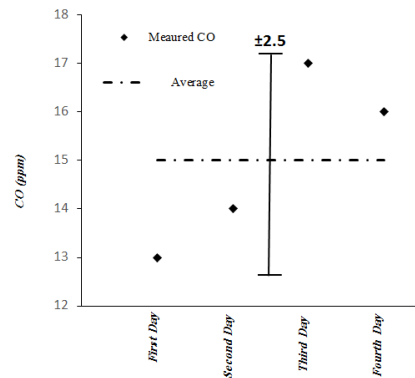
برای بررسی دبی سوخت مناسب می‌بایست محصولات احتراق را نیز بررسی کرده و میزان گاز نسوخته موجود را به دست آورد تا از مقدار دبی مطلوب اطمینان حاصل شود. به طور کلی دبی سوخت مناسب برای عملکرد سیستم دارای دو شرط است، ابتدا توزیع دمای مناسب در سطح سیستم و سپس حداقل میزان گاز نسوخته در محصولات احتراق که در ادامه به آن خواهیم پرداخت. همانطور که مشاهده شد دبی ۴ لیتر بر دقیقه به عنوان دبی مناسب سوخت انتخاب شده است.

در شکل ۱۱، دمای سطح هیتر در حالت دوم یعنی حالت بسته سیستم توسط ترموکوپل اندازه‌گیری دمای عمق ثبت شده است. همانطور که مشاهده می‌شود که البته به علت تابش دو هیتر به یکدیگر دما در حالت بسته بیشتر از دما در حالت باز می‌باشد.



شکل ۱۱- توزیع دما در سطح هیتر تابشی لوله‌ای توسط ترموکوپل اندازه‌گیری دمای عمق در یک خط عمودی در حالت بسته

مهم‌ترین تست انجام شده در این پژوهش تست دمای عمق هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای است در این تست با بدست آوردن پروفیل دما در عمق پنل می‌توان توزیع دما را درون پنل در ارتفاع‌های مختلف و در عمق‌های مختلف به دست آورد و بر اساس اطلاعات کسب شده نحوه احتراق را درون لایه کاتالیستی بررسی نمود، همچنین محل انجام واکنش که ماکزیمم دما

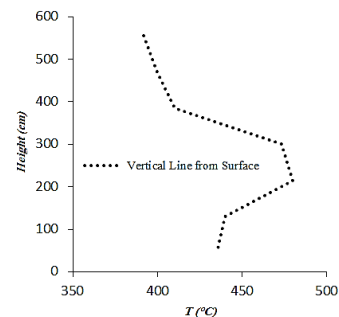


شکل ۸- مقادیر اندازه‌گیری CO در چهار روز مختلف و انحراف معیار از مقدار میانگین برای یک نقطه

اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که انحراف معیار از میانگین در خصوص دما در سطح در ۴ روز مختلف کمتر از ۴/۲ درجه سانتیگراد و در خصوص نشر CO این عدد ۲/۵ ppm می‌باشد. این مقادیر انحراف معیار از میانگین قابل قبول بوده و با توجه به تکرارپذیری در این تست‌ها بقیه آزمایشات انجام شده است.

نتایج تست

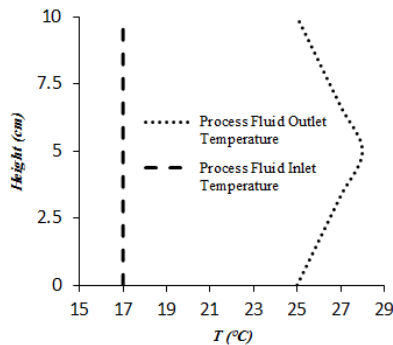
یکی از پارامترهای مهم جهت بررسی عملکرد یک هیتر تابشی کاتالیستی دمای سطح آن است. بدین منظور در دو حالت دمای سطح بررسی شده است، ابتدا حالت باز سیستم که در این حالت لوله عبور سیال فرآیندی از سیستم خارج شده و هر هیتر به صورت مجزا با استفاده از پیرومتر در دو دبی مختلف سوخت گازی مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس حالتی که سیستم بسته بوده و لوله در بین هیترها قرار می‌گیرد، در این حالت با توجه به عدم دسترسی به تمامی سطح هیترها از جایگاه‌هایی که برای اندازه‌گیری دمای عمق تعبیه شده‌اند استفاده کرده و دمای سطح را با استفاده از ترموکوپل و با نفوذ از پشت هر هیتر در ۷ نقطه با ارتفاع‌های بررسی شده‌اند. علت تغییر دبی سوخت گاز به دست آوردن دبی بهینه با توجه به عملکرد مناسب هیترها می‌باشد، مقدار دبی نامی با توجه به مساحت سطح هر هیتر ۴ لیتر بر دقیقه برای هر هیتر بوده که در مجموع ۸ لیتر بر دقیقه برای سیستم می‌باشد، به این علت دو دبی ۴ و ۳/۵ لیتر بر دقیقه را برای هر هیتر تنظیم کرده و نتایج مقایسه شده‌اند. شکل ۹ و نمودار دمای سطح را در دبی ۴ لیتر بر دقیقه نشان می‌دهد.



شکل ۹- توزیع دما در سطح هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای توسط ترموکوپل اندازه‌گیری دمای عمق در دبی ۴ لیتر بر دقیقه

روند افزایش دما طبق پیش‌بینی از لایه‌ی عقب هیتر به صورت صعودی تا لایه جلویی هیتر که لایه‌ی کاتالیستی و توری جلویی است ادامه داشته و سپس با توجه به دور شدن از سطح تابش تا سطح لوله روند نزولی پیدا می‌کند. مشاهده می‌شود که محفظه ۲ سانتی‌متری که در پشت هیتر برای توزیع گاز تعبیه شده است تا دمای ۱۴۰ درجه افزایش دما می‌دهد و می‌توان گفت که از رسیدن حرارت به این ناحیه جلوگیری شده است. همچنین دیگر لایه‌ها نیز دارای دمای مناسب با عملکرد خود بوده و سطح لوله نیز به حدود دمای ۲۰۰ درجه می‌رسد البته این مقدار حرارت جذب شده توسط لوله همگی توسط تابش صورت نمی‌گیرد بلکه حرارت گازهای ناشی از احتراق نیز به این مورد کمک می‌کند. با دقت در ناحیه‌ی لایه کاتالیستی با این نتیجه می‌سیم که با افزایش ارتفاع، ماکزیم دمای عمق به سمت چپ یعنی جلوی هیتر منتقل می‌شود، که علت آن نفوذ اکسیژن بیشتر در ارتفاع‌های پایین‌تر است.

مهم‌ترین قسمت در تست‌ها از نظر بررسی راندمان سیستم بررسی میزان گرمایش سیال فرآیندی بر اساس میزان مصرف سوخت در سیستم هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای است. با توجه به شکل ۱۵ نمودار توزیع دما برای سیال عبوری در ورودی و خروجی لوله به‌دست آمده است. همچنین مقدار سرعت هوای ورودی به لوله ۲۰/۵ متر بر ثانیه به‌دست آمده است.



شکل ۱۵- توزیع دما در ورودی و خروجی لوله عبور سیال فرآیندی

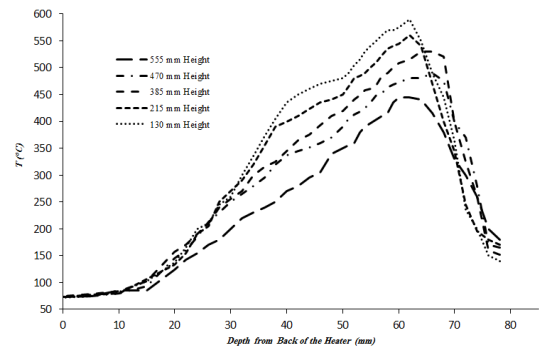
با در اختیار داشتن میزان سوخت مصرف شده و همچنین ارزش حرارتی آن مقدار انرژی انتقال یافته به سیال فرآیندی اندازه‌گیری شده و با استفاده از داده‌های مربوط به دمای ورودی و خروجی سیال فرآیندی میزان حرارت جذب شده توسط سیال فرآیندی را اندازه‌گیری کرده و راندمان مطابق با رابطه ۱ بدست آورده شده است.

$$\eta_{act} = \frac{\text{Gas Heating}}{\text{Net Released Heat}} = \frac{mC_p \Delta T}{mQ_{LHV}} \quad (1)$$

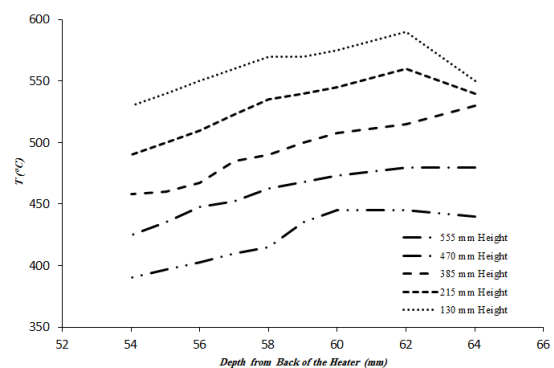
در این سیستم راندمان به نسبت سیستم ۴ پله تخت که در مطالعات گذشته توسط نویسنده مورد بررسی قرار گرفته اند ۱۳ درصد افزایش یافته و از ۲۵ درصد به ۳۸ درصد افزایش یافته است که این افزایش راندمان ناشی از تغییر شکل هیتر و تمرکز تابش و جلوگیری از هدر رفت تابش صورت گرفته است.

درصد ترکیبات مختلف در گازهای ناشی از احتراق یکی از مشخصه‌های عملکردی سیستم هیتر تابشی کاتالیستی است در این سیستم‌ها با توجه به انجام واکنش بر روی یک لایه کاتالیستی و انجام واکنش در دمای پایین انتظار می‌رود در صورت عملکرد مناسب هیتر راندمان احتراق آن نزدیک به ۱۰۰ درصد می‌باشد. در بررسی محصولات احتراق درصد گازهای کربن مونوکسید، اکسیژن و گاز نسوخته متان را مورد مطالعه قرار داده و عملکرد

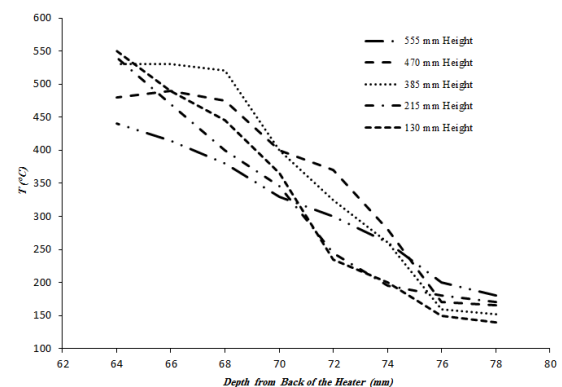
را در عمق پنل در هر ارتفاع دارد مشخص شده و اطلاعات خوبی از میزان نفوذ اکسیژن به داخل پنل و تغییر محل سطح واکنش اکسیداسیون کاتالیستی سوخت ارائه می‌دهد. شکل ۱۲ نمودار تغییر دمای عمق هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای را در ارتفاع‌های مختلف نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۱۳ و شکل ۱۴ نیز دو ناحیه لایه کاتالیستی و فاصله بین هیتر و لوله عبور سیال فرآیندی بطور جداگانه آورده شده اند. قابل مشاهده است که در سطح هیتر با توجه به افزایش ارتفاع با کاهش نفوذ اکسیژن در سطح هیتر محل انجام واکنش به سمت سطح متمایل شده و در عمق هیتر با افزایش ارتفاع دما کاهش می‌یابد، همچنین با توجه به شکل ۱۴ دما با افزایش ارتفاع در قسمت خارجی بین هیتر و لوله که نشان‌دهنده محل خروج محصولات احتراق است افزایش یافته است.



شکل ۱۲- توزیع دما در عمق هیتر تابشی لوله‌ای



شکل ۱۳- توزیع دما در لایه کاتالیستی هیتر تابشی لوله‌ای



شکل ۱۴- توزیع دما در ناحیه بین هیتر و لوله در هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای

نسبت به گرمایش سیال فرآیندی با چهار هیتر تخت در طول یکسان و فاصله یکسان هیتر با سطح لوله، ۱۳ درصد افزایش راندمان مشاهده شده است.

مراجع

- 1- 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.
- 2- 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.
- 3- L.D. Pfefferle, W.C. Pfefferle, *Catalysis in Combustion, Catalysis Reviews-science and Engineering*, Vol. 29, Issue 2-3, pp.219-267, 1987.
- 4- H. Sadamori, *Application concepts and evaluation of small-scale catalytic combustors for natural gas*, *Catalysis Today*, Vol.47, pp. 325-338, 1999.
- 5- 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)
- 6- S.M. Hosseinalipour, A. Behravan, M. Namazi, Kh. Ghadiri, M. Madaelahi, *Fabrication and performance study of the radiative catalytic pad for flameless combustion of natural gas in different climate conditions*, *Modares Mechanical Engineering*, 2014. (In Persian)
- 7- Tehran Gas Co, B. Eshghi Movahed, A. Behravan, S.M. Hosseinalipour, M. Baghsheikhi, M.H. Borghei, *Water Heating by Exhaust Products of Catalytic Radiant Heater*, Patent No. 87043, Declaration No. 139350140003006715, 2014 (In Persian)
- 8- 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 exhibition on Environment, Energy & Clean Industry*, Tehran, Iran, 2013. (In Persian)
- 9- 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)
- 10- 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*, Isfahan, Iran, 2012. (In Persian)
- 11- S.M. Hosseinalipour, A. Behravan, M. Namazi, Kh. Ghadiri, *Experimental Analysis of Catalytic Panels in Different Climate Conditions* in *The 22nd international Conference of iran mechanical engineering*, Ahwaz, Iran, 2014. (In Persian)

هیتر تابشی لوله‌ای بررسی شده است. میزان نشر کربن مونوکسید در محصولات احتراق سیستم کمتر از ۲۰ ppm بوده و همچنین میزان کربن دی‌اکسید و اکسیژن نیز به ترتیب ۴ درصد و ۱۴ درصد می‌باشد که در کنارهم نشان‌دهنده احتراق مناسب سوخت و آلاینده‌گی کم سیستم می‌باشد. جهت اطمینان از نتایج حاصل شده میزان گاز نسوخته در فرآیند احتراق کاتالیستی نیز توسط کروماتوگرافی ۱ درصد بدست آمده است، این مقدار گاز نسوخته نشان‌دهنده آن است که احتراق کاتالیستی دارای راندمانی در حدود ۹۹ درصد بوده و سوخت را کامل می‌سوزاند.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش ابتدا با بیان یک مشکل اقدام به طرح ایده‌ای جهت افزایش راندمان هیترهای تابشی کاتالیستی جهت گرمایش سیال فرآیندی شد. به این منظور جهت افزایش راندمان هیتر تابشی ۴ پنله تخت که با چیدمان ۴ پنل کاتالیستی تخت حول لوله ساخته شده بود، طرحی برای تغییر شکل پنل و همچنین تغییر ساختار سیستم هیتر جهت جلوگیری از خروج تشعشع، همچنین بالا بردن ضریب دید و افزایش میزان جذب حرارت توسط لوله عبور سیال فرآیندی در نظر گرفته شد.

پس از طراحی و ساخت هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای تست‌های مختلف جهت بررسی عملکرد هیتر تابشی لوله‌ای طراحی و سیستم تست متناسب با آن در نظر گرفته شد و تست‌ها در چندین مرحله انجام شد. به دلیل آنکه مهمترین پارامترهای عملکرد پنل‌های کاتالیستی توزیع دما و میزان آلاینده‌های حاصل از احتراق است ۲ نوع تست دمایی در سطح و در عمق پنل جهت بررسی توزیع دما صورت گرفت که توزیع مناسب دما را نشان داده و همچنین در ۲ مرحله میزان آلاینده‌های محصولات احتراق توسط آنالیزور گاز و کروماتوگراف بررسی شد که نشان‌دهنده احتراق کامل در هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای می‌باشد.

به طور کلی در تست‌ها نشان داده شد که دمای سطح هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای از توزیع مناسب و یکنواختی مطلوبی برخوردار است نکته قابل توجه آن است که در توزیع دما میزان اکسیژن موجود در سطح پنل را به خوبی نشان می‌دهد این مورد با کاهش دمای سطح با افزایش ارتفاع قابل توجه است همچنین نتایج تست دمای عمق نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع محل ماکزیمم دما که در واقع سطح اصلی انجام واکنش است به سمت جلوی پنل حرکت کرده که نشان‌دهنده کاهش نفوذ اکسیژن در عمق پنل است.

میزان نشر اکسیدهای سمی نیتروژن توسط هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای صفر بوده که در واقع علت آن را می‌توان پایین بودن دمای احتراق کاتالیستی و عدم تشکیل شعله دانست. همچنین آنالیز محصولات احتراق نشان داد که میزان آلاینده CO به علت ایجاد جریان هوای طبیعی در بین لوله و هیتر که باعث می‌شود تا اکسیژن بیشتر به محل انجام واکنش رسیده و گاز کامل بسوزد بسیار اندک بوده و نشان از عملکرد مناسب هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای دارد.

در این پژوهش برای اولین بار عملکرد هیتر تابشی کاتالیستی لوله‌ای از لحاظ راندمان حرارتی و همچنین محصولات احتراق مورد بررسی قرار گرفته و نتایج نشان می‌دهند که این سیستم بسیار بهتر از هیترهای کاتالیستی مسطح عمل کرده که علت آن جلوگیری از هدر رفت حرارت و تمرکز تابش در محل مورد نظر و حداکثر شدن ضریب دید در تابش است و در نهایت