نشریه علمی- پژوهشی سوخت و احتراق
سال دهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۳۹۶

بررسی تجربی احتراق پایدار و پدیده برگشت شعله در یک مشعل متخلخل دولایه‌ای

محمد امیدی[۱] و محسن دوازده‌امامی[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، mohammad.omidi@me.iut.ac.ir
۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، (نویسنده مخاطب)، mohsen@cc.iut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۸/۳۰، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۳۹۵/۱۲/۲۵، پذیرش: ۱۳۹۶/۱/۲۷)

چکیده: در پژوهش حاضر، عملکرد یک مشعل متخلخل دولایه‌ای، که در لایه اول سرامیک از جنس SiC و لایه دوم گلوله‌های آلومیناسیلیکاتی (Al_2SiO_5) استفاده شده است، به‌صورت تجربی بررسی شده است. یک موضوع بسیار مهم در رابطه با این مشعل‌ها پایداری شعله در سطح بستر متخلخل است. بنابراین، ضروری است که به‌منظور جلوگیری از ایجاد برگشت شعله ناگهانی در مشعل متخلخل، شرایطی که منجر به ناپایداری (پدیده برگشت شعله) می‌شود را بررسی کرد. در این تحقیق، اثرات قطر گلوله در پایین‌دست، نسبت هم‌ارزی و نرخ آتش بر دمای شعله، محدوده عملکرد پایدار مشعل، پدیده برگشت شعله و انتشار آلاینده‌ها بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که شعله در محدوده نسبت هم‌ارزی ۰/۳۵ تا ۰/۴۵ در داخل بستر متخلخل پایدار می‌شود. با کاهش نسبت هم‌ارزی، شعله به‌سمت پایین‌دست حرکت می‌کند. همچنین، با افزایش قطر گلوله در پایین‌دست مشعل، دمای بیشینه شعله و دمای سطح مشعل کاهش می‌یابد. با افزایش نسبت هم‌ارزی، مدت زمان برگشت شعله کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش تخلخل در پایین‌دست مشعل مدت زمان برگشت شعله کاهش می‌یابد. میزان هوای اضافی نیز تاثیر قابل توجهی روی میزان CO دارد که میزان CO، با کاهش نسبت هم‌ارزی، کاهش می‌یابد. در تمام اندازه‌گیری‌ها، میزان NOx به‌خاطر دمای پایین شعله مقدار ناچیزی (کم‌تر از ۵ ppm) است.

کلیدواژگان: مشعل متخلخل دولایه‌ای، محدوده پایداری شعله، دمای شعله، برگشت شعله، انتشار آلاینده

مقدمه

استفاده از بستر متخلخل در ساخت مشعل یک روش بسیار موثر برای کاهش مصرف انرژی و کاهش آلودگی است. ازجمله امتیازهایی که مشعل متخلخل نسبت به مشعل‌های معمولی دارد می‌توان به بازده تابشی بالا، سرعت شعله بالا، میزان بازه‌پذیری بار[۱] و قدرت دانسیته زیاد، کاهش حجم مشعل، افزایش محدوده شعله‌وری، توزیع یکنواخت حرارت، کاهش سروصدا و کاهش آلودگی اشاره کرد. در این نسل از مشعل‌ها، از هر سه روش انتقال حرارت هدایت، جابه‌جایی و تشعشع به‌دلیل گداختگی جامد متخلخل استفاده می‌شود[۱-۵]. سوت[۶] از اولین کسانی بود که به‌طور آزمایشگاهی گسترش و پایداری شعله را در یک بستر شنی با ابعاد مختلف بررسی کرد و مدلی نیمه‌تجربی برای محاسبه سرعت شعله و اثر پیش گرمایش هدایتی ارائه کرد. سو و همکاران[۷] یک مشعل متخلخل دولایه‌ای از جنس PSZ[۲] را به‌صورت تجربی بررسی کردند. قطر و طول دو لایه از بستر متخلخل با هم مساوی و برابر ۵/۱ سانتی‌متر بود. بستر متخلخل بالادست دارای مشخصه ۲۵ ppc[۳] و پایین‌دست برابر ppc ۴ بود. آن‌ها حد پایین نسبت هم‌ارزی را برابر ۰/۴۱ به‌دست آوردند. همچنین، تاثیر قطر سوراخ‌ها بر روی عملکرد مشعل و خصوصیات پایداری شعله در سطح مقطع بین دو قسمت و صفحه خروجی را بررسی کردند. ماتیس و الزی[۸] پایداری شعله، بازه کارکرد و میزان آلاینده‌ها را در مشعل متخلخل دوقسمتی با سوخت هوا و گاز پیش‌آمیخته، به‌صورت

1. Modulation
2. Partially stabilized zirconia
3. Pores per centimeter

Archive of SID
www.SID.ir

آزمایشگاهی، بررسی کردند. محیط‌ها از دو جنس ایتریوم پایدارشده در داخل زیرکونیا و آلومینا (YAZ) و زیرکونیا-مولیت سخت‌شده (ZTM) بودند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که سطح مشترک بین دو سرامیک از جنس YAZ در نگه‌داری شعله در این منطقه بسیار موثر است، ولی در نوع ZTM شعله به سرامیک بالادست نفوذ می کند. در مشعل سومی که با YAZ ساخته شده، ولی طول قسمت بالادست کاهش یافته بود، نرخ آتش[1] در حالت شعله پایدار بین ۶۷۵ تا ۳۹۵۱ کیلووات بر متر مربع به‌دست می‌آید. در این سه نوع مشعل، سرامیک بالادست دارای تخلخل ppc ۲۳/۶ و سرامیک پایین‌دست دارای تخلخل ppc ۳/۹ است. کیو و هایدن[۹] ساختار شعله و سازوکار پایداری احتراق را در بستر متخلخل سرامیکی فیبری در یک مشعل با کاربرد خاص بررسی کردند. این بستر از جنس Yb_2O_3 (۹۳/۵ درصد وزنی)، CeO_2 (۳ درصد وزنی) و دیگر ترکیبات (۳/۵ درصد) بوده و دارای ضریب هدایتی پایین و تخلخل بالاست. در مطالعه آن‌ها، کارکرد احتراقی مشعل و بازگردش حرارتی با شرایط کارکردی مختلف بررسی شد. در این مشعل، شعله در نزدیکی پایین‌دست پایدار شده و دارای تابش گرمایی بالایی است. همچنین، کار آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش هوای ورودی بازده تابش نیز افزایش می‌یابد. بابنوویچ و همکاران[۱۰] آزمایش‌هایی را برای ایجاد شعله‌ای پایدار در مشعل دوقسمتی آلومینیایی ارائه کردند. نتایج آن‌ها برای نسبت هم‌ارزی‌های ۰/۶ و ۰/۷ نشان می‌دهد که پایداری شعله برای یک محدوده خاص از دبی حجمی جریان رخ می‌دهد. دمای بیشینه شعله برای نسبت هم‌ارزی‌های ۰/۶ و ۰/۷ به‌ترتیب برابر ۱۴۷۰ و ۱۶۷۰ کلوین به‌دست آمد. نتایج آن‌ها در خصوص میزان آلاینده‌ها نیز حاکی از آن است که برای تمامی موارد (آزمایش‌ها) میزان NOx زیر ppm ۱۵ و CO زیر ppm ۱ اندازه‌گیری شده است. بکری و همکاران[۱۱] یک تکنیک جدید پایداری احتراق درون یک مشعل متخلخل بی‌اثر (PIM)[2]، براساس ارتباط بین سرعت جریان و سرعت شعله ارائه و به‌صورت تجربی آزمایش کردند. آن‌ها، برای تمامی آزمایش‌های عملی، مقدار CO را برابر صفر به‌دست آوردند. آن‌ها میزان انتشار NOx را نیز با استفاده از تکنیک PIM به‌دست آوردند. مقادیر کم‌تر از ppm ۱۰ در نسبت هوای اضافی ۱/۴۵ اندازه‌گیری شده است. در دمای اولیه ثابت، انتشار NOx به‌طور قابل ملاحظه‌ای به فشار در نسبت‌های کم وابسته است. این وابستگی با افزایش نسبت هوای اضافی کاهش می‌یابد. در فشار و نسبت‌های هوای اضافی ثابت، انتشار NOx تحت تاثیر دمای اولیه قرار می‌گیرد. تکنیک PIM به حل موضوع فعلی و آینده آلودگی زیست‌محیطی کمک خواهد کرد. بهادری و همکاران[۱۳،۱۲] احتراق متان در مشعل متخلخل را به‌صورت عددی مطالعه کردند. آن‌ها، به‌منظور بررسی اثرات میزان تخلخل بر بهبود فرایند احتراق و کاهش تولید CO و NOx، از روش حجم محدود استفاده کردند. در این بررسی‌ها، مشاهده کردند که با افزایش تخلخل، دمای شعله و طول شعله افزایش و منطقه احتراق به جلو کشیده می‌شود. همچنین، با افزایش دمای شعله، میزان تولید CO کاهش و NOx افزایش می‌یابد. هاشمی و همکاران[۱۴] یک مشعل متخلخل فلزی را به‌صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها دمای سطح مشعل را در نسبت هم‌ارزی و نرخ آتش‌های مختلف اندازه‌گیری کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که دمای سطح، با افزایش نرخ آتش، افزایش می‌یابد و دمای بیشینه شعله نیز در مخلوط رقیق رخ می‌دهد. همچنین، اثر ضخامت بستر متخلخل را بررسی کردند و دریافتند که دمای بیشینه شعله برای حالت ۳ لایه توری به‌دست می‌آید. کرامیوتیس و همکاران[۱۶،۱۵] عملکرد یک مشعل دولایه‌ای مستطیل‌شکل را به‌صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش نسبت هوای اضافی، دمای شعله کاهش و با افزایش نرخ آتش، دمای شعله افزایش می‌یابد. همچنین، دریافتند که میزان انتشار CO و NOx، با افزایش نسبت هوای اضافی، کاهش و با افزایش نرخ آتش، افزایش خواهد یافت. گائو و همکاران[۱۷] احتراق پیش‌مخلوط متان و هوا را برای یک مشعل دولایه‌ای به‌صورت تجربی بررسی کردند. جنس‌های مورد استفاده در پایین‌دست مشعل، زیرکونیا، آلیاژ فلزی و سیلیکون کاربید بود. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که محدوده پایداری شعله، با افزایش ضریب هدایت جسم متخلخل، افزایش می‌یابد. میزان انتشار CO برای فوم ppi[3] ۳۰، به‌خاطر دمای شعله بالاتر، کم‌تر

1. Firing rate
2. Porous Inert Media
1. Pores per inch

www.SID.ir

از موارد دیگر بود. همچنین، میزان انتشار NOx را در تمامی موارد کم‌تر از ppm ۳ اندازه‌گیری کردند. گائو و همکاران[۱۹،۱۸] احتراق پایدار را برای یک مشعل متخلخل دوقسمتی از جنس گلوله‌های آلومینایی به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند محدوده پایداری شعله برای مشعل دوقسمتی، بزرگ‌تر از مشعل یک‌قسمتی است؛ دمای شعله و سطح، با افزایش سرعت شعله، افزایش می‌یابد؛ دمای شعله با افزایش قطر گلوله در پایین‌دست کاهش می‌یابد. همچنین، نتیجه گرفتند که میزان انتشار CO برای مشعل دوقسمتی کم‌تر از مشعل یک‌قسمتی است و میزان آن با افزایش سرعت شعله کاهش می‌یابد. دوازده‌امامی و همکاران[۲۰] به بررسی تجربی پارامترهای نرخ آتش و میزان تخلخل بر برگشت شعله[1] به زیر سطح ناحیه پیش‌گرمایش در بستر متخلخل دولایه‌ای از جنس SiC پرداختند. سرامیک‌های مورد استفاده آن‌ها دارای سطح مقطع ۶۴ سانتی‌مترمربع بود. واکنش‌دهنده‌ها شامل هوا و گاز طبیعی با نسبت هم‌ارزی ۰/۶۵ هستند. زمان برگشت شعله (زمان بین جرقه‌زدن و لحظه برگشت) و دمای برگشت شعله (دمای متوسط ناحیه پیش‌گرمایش سرامیک‌ها) در سرامیک‌هایی با تخلخل ۴، ۸ و ۱۲ ppc اندازه‌گیری شد. نتایج آن‌ها نشان می‌داد در یک نرخ آتش یکسان، با افزایش میزان تخلخل، زمان برگشت شعله افزایش می‌یابد. اما، به‌دلیل تغییر در موقعیت شعله در ناحیه احتراق، میزان حرارت دریافتی در ناحیه پیش‌گرمایش متغیر است. یعنی، با تغییر نرخ آتش و در یک تخلخل ثابت، دمای ناحیه پیش‌گرمایش روند معینی را ارائه نمی‌کند. شفیعی و همکاران[۲۱] یک مشعل بستر متخلخل با مبدل حرارتی را به‌صورت تجربی بررسی کرند. آن‌ها دریافتند که در توان‌های ۲ تا ۴ کیلووات دمای بیشینه شعله در نسبت هوای اضافی کم رخ می‌دهد. با افزایش نسبت هوای اضافی، دمای بیشینه شعله کاهش می‌یابد. همچنین، تولید NOx در یک توان خاص، با افزایش نسبت هوای اضافی، کاهش می‌یابد.

با توجه به تجربیات کسب‌شده در مشعل‌های متخلخل، عملکرد بهینه مشعل، وقتی که شعله پایدار داخل جسم متخلخل و در مجاورت سطح بستر متخلخل تشکیل شود، قابل دست‌یابی است. بنابراین، نیاز است عواملی که مانع ایجاد یک شعله پایدار (مانند پدیده برگشت شعله) داخل بستر متخلخل می‌شود را بررسی کرد. با توجه به تحقیقات گذشته، مشخص می‌شود که در زمینه احتراق فوق رقیق و عوامل موثر روی پدیده برگشت شعله تحقیقات بسیار اندکی صورت گرفته است و اطلاعات به‌دست آمده در این زمینه کافی نیست. همچنین، در یک مشعل متخلخل ساخته‌شده از گلوله‌های کروی، تغییر در قطر گلوله می‌تواند تاثیر بسزایی روی محدوده پایداری شعله، دمای شعله، مدت زمان برگشت شعله و میزان آلاینده‌ها داشته باشد. در تحقیق حاضر، علاوه بر اثر تخلخل، عوامل موثر بر توزیع دمای محوری مشعل، پدیده برگشت شعله و میزان انتشار آلاینده‌ها بررسی شده است.

شرح دستگاه آزمایش

شکل ۱ نمای کلی از دستگاه آزمایش با کلیه وسایل اندازه‌گیری و اجزای مشعل را نشان می‌دهد. مشعل شامل یک پخش‌کننده[2] از جنس چدن، یک صفحه سوراخ‌دار زیرکونیا[3] به‌منظور ایجاد جریان یکنواخت و لوله مستقیم‌کننده[4] است. هوای مورد نیاز احتراق توسط یک کمپرسور تامین می‌شود. سوخت مورد استفاده گاز طبیعی است. سوخت و هوا، بعد از اختلاط در مخلوط‌کننده، وارد مشعل می‌شوند. برای اندازه‌گیری دبی هوا و سوخت از روتامتر (مدل RGD) استفاده شده است. بدنه مشعل دارای قطر داخلی ۹ سانتی‌متر، ضخامت ۳ سانتی‌متر و طول ۱۵ سانتی‌متر است. مشعل از دو لایه بستر متخلخل تشکیل شده است. لایه نخست یک سرامیک از جنس SiC، تخلخل ۳۰ ppi (۱۲ ppc) و طول ۲/۲ سانتی‌متر و لایه دوم گلوله‌هایی از جنس آلومینا سیلیکاتی به قطرهای ¼ اینچ (۶/۳۵ mm) و ½ اینچ (۱۲/۷ mm) هستند که در طولی برابر ۲/۶ سانتی‌متر قرار گرفته‌اند. اطراف دیواره مشعل نیز با عایق‌های حرارتی مقاوم در برابر حرارت بالا به ضخامت ۳ سانتی‌متر پوشانده شده است. در

2. Flashback
2. Diffuser
3. Zirconia
4. Straightener

www.SID.ir

طول بدنه مشعل از ۵ عدد ترموکوپل نوع k برای رصد شعله استفاده شده است. فاصله بین هر دو ترکوپل برابر ۱/۲ سانتی‌متر است. ترموکوپل شماره ۱ در ورودی مشعل و ترموکوپل شماره ۵ روی سطح خروجی بستر متخلخل قرار گرفته است. همچنین، برای ثبت دماها از یک دیتالاگر[1] استفاده شده است. برای اندازه‌گیری آلاینده‌های خروجی مشعل (CO و NOx) از یک دستگاه آنالیزور Testo 350 استفاده شده است.

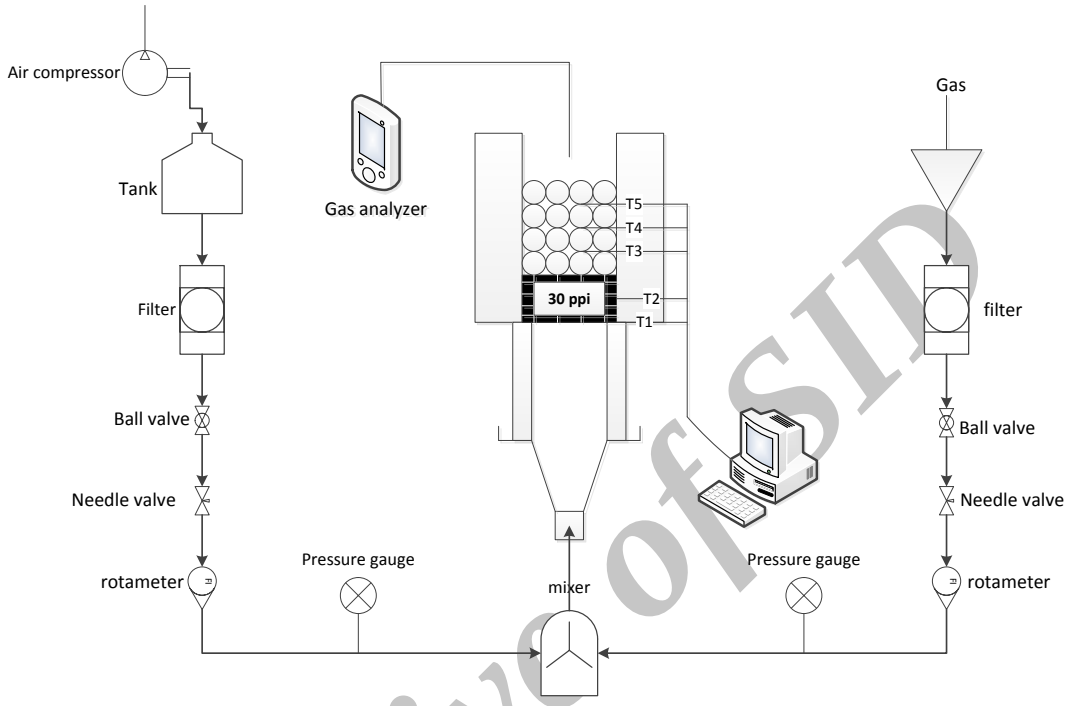


Figure 1- Schematic of the experimental setup

شکل ۱- طرحواره دستگاه آزمایش

روند انجام آزمایش

الف) عملکرد پایدار مشعل

بعد از تنظیم دبی هوا و گاز (نسبت هم‌ارزی) جرقه زده می‌شود و هم‌زمان دستگاه ثبت دما شروع به ثبت نتایج می‌کند. بعد از زدن جرقه به شعله اجازه داده می‌شود که در بستر متخلخل پایدار شود. زمانی که دماها ثابت ماند، با افزایش دبی هوا نسبت هم‌ارزی کاهش داده می‌شود. البته، این افزایش به مقدار جزئی است تا جداشدن شعله[2] رخ ندهد. بین هر دو گام، به‌اندازه کافی زمان داده می‌شود تا شعله داخل بستر متخلخل به پایداری برسد. در پایان هر گام، میزان آلاینده‌ها اندازه‌گیری می‌شود. این کار تا جایی ادامه پیدا می‌کند که جداشدن شعله رخ دهد و شعله از بالای سطح مشعل بیرون زند و بتوان یک شعله آزاد را مشاهده کرد. پیکربندی‌های مختلف مشعل و قطر گلوله‌هایی که در پایین‌دست مشعل استفاده شده است، در جدول ۱ آمده است.

ب) پدیده برگشت شعله

بعد از تنظیم شرایط کاری مشعل جرقه زده می‌شود و همزمان دیتالاگر نیز روشن می‌شود. بعد از زدن جرقه، شعله داخل بستر متخلخل قرار می‌گیرد. مدت زمانی که از لحظه ایجاد جرقه طول می‌کشد تا شعله به زیر بستر متخلخل نفوذ کند زمان برگشت

1. Data logger
2. Blow off

Archive of SID
www.SID.ir

شعله نامیده می‌شود[۲۰]. هنگامی‌که دمای ترموکوپل شماره ۱ ناگهان با تغییر شدید مواجه شود، پدیده برگشت شعله رخ داده است و در این لحظه می‌توان دیتالاگر را خاموش کرد و زمان برگشت شعله را ثبت کرد. حال، مشعل خاموش می‌شود و عملیات خنک‌کاری به‌منظور انجام آزمایش بعدی انجام می‌شود، تا شرایط اولیه برای همه حالات اندازه‌گیری یکسان باشد. این آزمایش‌ها برای پیکربندی A و B مشعل نیز صورت می‌گیرد.

ج) صحت‌سنجی نتایج

تحلیل عدم قطعیت هر کدام از پارامترهای مورد اندازه‌گیری در تحقیق دوازده‌امامی و همکاران[۲۰] آمده است. همچنین، جزئیات مربوط به عدم قطعیت متغیرهای اندازه‌گیری در جدول ۲ آمده است.

جدول ۱- پیکربندی مشعل در حالات مختلف

Table 1- Investigated burner configurations

Burner configuration	Preheating zone	Combustion zone
A	SiC (30 ppi)	Packed bed (6.35 mm) $\frac{1}{4}''$
B	SiC (30 ppi)	Packed bed (12.7 mm) $\frac{1}{2}''$

جدول ۲- عدم قطعیت پارامترهای مورد اندازه‌گیری

Table 2- Uncertainties of the measured variables

Variable	Independent quantities	Uncertainty	Error (%)
Temperature	Thermocouple temperatures ^{o}C & Data logger error ^{o}C	$4.1^{o}C$	3.5
Equivalence ratio	Fuel rotameter lit/min & Air rotameter m^3/hr	-	9.5
Firing rate	Fuel rotameter lit/min	19.41 kW/m^2	6
CO emission	Testo 350 error	-	5
NOx emission	Testo 350 error	5 ppm	-

تحلیل نتایج

۱- عملکرد پایدار مشعل

الف) تحلیل دما

در این قسمت درباره عملکرد پایدار مشعل بحث‌خواهد شد. جایی که شعله داخل بستر متخلخل پایدار می‌شود و بعد از مدت‌زمانی دماهای ثبت‌شده بدون تغییر باقی می‌مانند. شکل‌های ۲ و ۳ توزیع‌های دما را را بر روی محور مرکزی مشعل برای توان ۱/۸ kW و ۳/۱ kW نشان می‌دهد. خطوط عمودی جداکننده نواحی پایین‌دست و بالادست مشعل (لایه اول و دوم بستر متخلخل) است. عملکرد پایدار مشعل با تغییر عواملی همچون نسبت هم‌ارزی، نرخ آتش و قطر گلوله در پایین‌دست بررسی می‌شود. نقطه‌ای که دمای بیشتری دارد بیان‌گر آن است که شعله در آنجا تشکیل شده است. مطابق روال متعارف در پژوهش‌های بستر متخلخل، دمای شعله به‌عنوان دمای بیشینه تعریف می‌شود. با توجه به این نمودارها می‌توان نتایج زیر را استخراج کرد:

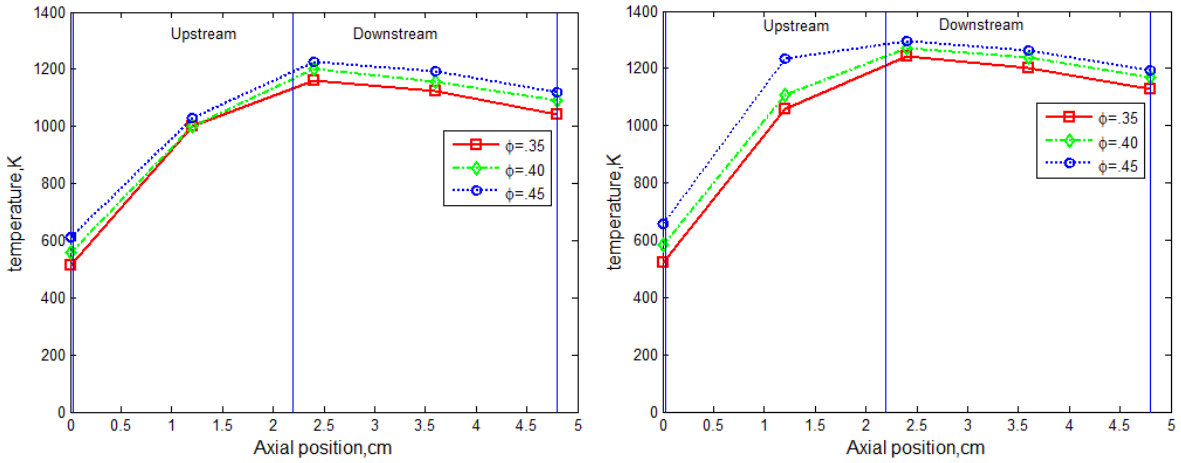
- با کاهش نسبت هم‌ارزی، دمای شعله کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه کاهش نسبت هم‌ارزی به‌ازای دبی سوخت ثابت متناظر با افزایش نسبت هوای اضافی است، با کاهش نسبت هم‌ارزی، حرارت بیشتری توسط هوای اضافی جذب شده و ازطرفی این امر موجب کاهش پیش‌گرمایش به مخلوط سوخت و هوا در بالادست شده و در نتیجه دمای بیشینه شعله کاهش می‌یابد.
- محدوده نسبت هم‌ارزی، که به‌ازای آن می‌توان شعله‌ای پایدار داخل بستر متخلخل ایجاد کرد، بین ۰/۳۵ تا ۰/۴۵ به‌دست آمد. اگر نسبت هم‌ارزی از حد پایین این محدوده کم‌تر شود، آنگاه جداشدن شعله رخ خواهد داد و شعله به طرف پایین‌دست

Archive of SID

www.SID.ir

مشعل حرکت می‌کند. همچنین، اگر نسبت هم‌ارزی از حد بالای این محدوده بیشتر شود پدیده برگشت شعله رخ می‌دهد. در واقع، با افزایش پیش‌گرمایش و کاهش اتلافات حرارتی، یک احتراق فوق رقیق ایجاد شده است. در حالی که در مشعل‌های شعله آزاد، به‌خاطر عدم پیش‌گرمایش کافی، دستیابی به احتراق فوق رقیق امکان‌پذیر نیست. انتخاب بستر متخلخل مناسب در بالادست و پایین‌دست مشعل نقش بسیار مهمی در رسیدن به این نوع احتراق دارد.

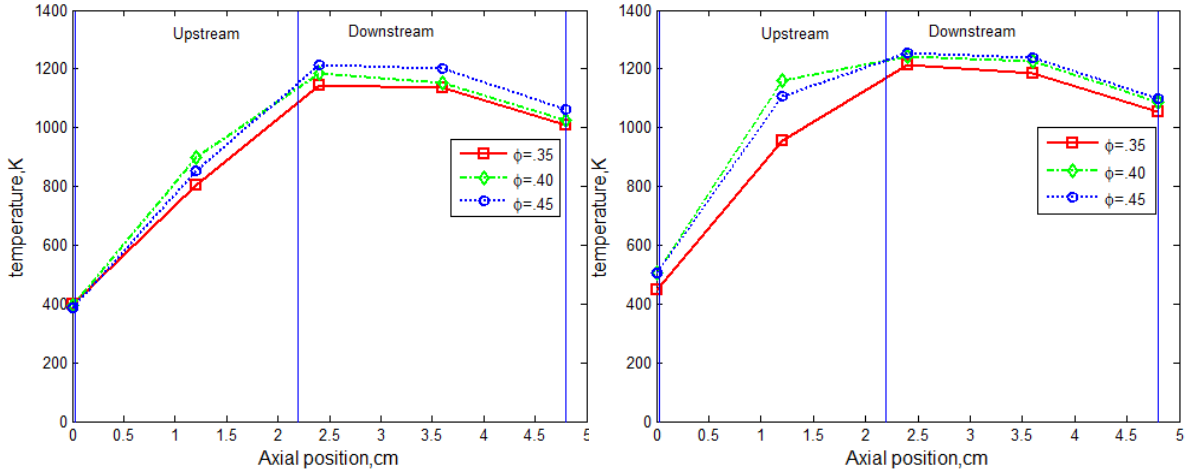
- با افزایش نرخ آتش، دمای بیشینه شعله افزایش می‌یابد. دمای بیشینه به‌دست آمده در پیکربندی A برابر ۱۲۹۴ کلوین و در حالت B برابر ۱۲۵۲ کلوین است.
- برای تمامی حالات، شعله در پایین‌دست و نزدیک سطح مشترک دو ماده متخلخل تشکیل شده است. این امر به افزایش انتقال حرارت به ناحیه پیش‌گرمایش کمک می‌کند.



(a) (b)

Figure 2- Measured temperature profiles, case A of Table 1 for different equivalence ratios and powers: (a) 1.8, (b) 3.1 kW

شکل ۲- نمودار دمای محوری مشعل متخلخل برای پیکربندی A بر حسب موقعیت ترموکوپل در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف و توان الف) ۱/۸ kW و ب) ۳/۱ kW



(a) (b)

Figure 3- Measured temperature profiles, case B of Table 1 for different equivalence ratios and powers: (a) 1.8, (b) 3.1 kW

شکل ۳- نمودار دمای محوری مشعل متخلخل برای پیکربندی B بر حسب موقعیت ترموکوپل در نسبت هم‌ارزی‌های مختلف و توان: الف) ۱/۸ و ب) ۳/۱ kW

www.SID.ir

شکل ۴ نمودار دمای بیشینه شعله برحسب نسبت هم‌ارزی برای گلوله‌های با قطر مختلف در توان ۲/۶ kW را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که:

- دمای بیشینه شعله با افزایش نسبت هم‌ارزی افزایش می‌یابد.
- نرخ افزایش دما برحسب نسبت هم‌ارزی برای گلوله با قطر ¼ اینچ کمتر از گلوله با قطر ½ اینچ است.
- با کاهش تخلخل در پایین‌دست مشعل، دمای بیشینه شعله افزایش می‌یابد. زمانی‌که از گلوله‌های با قطر بزرگ‌تر استفاده می‌شود، به‌دلیل فضای خالی بیشتر این گلوله‌ها در مقایسه با گلوله‌های با قطر کوچک‌تر گرمای بیشتری از ناحیه احتراق به پایین‌دست و بالادست به‌وسیله سازوکار تابشی انتقال می‌یابد. درنتیجه، دمای شعله برای پیکربندی A بیشتر از B خواهد بود.

شکل ۵ نمودار دمای سطح برحسب توان برای گلوله‌های با قطر مختلف در نسبت هم‌ارزی ۰/۳۵ را نشان می‌دهد. دمایی که ترموکوپل شماره ۵ ثبت می‌کند به‌عنوان دمای سطح گزارش می‌شود. با افزایش توان مشعل و درواقع افزایش دبی سوخت ورودی، دمای سطح نیز افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش قطر گلوله در پایین‌دست در نرخ آتش ثابت و در نتیجه افزایش دمای شعله، دمای سطح نیز کاهش می‌یابد. با افزایش دمای محصولات احتراق و افزایش مساحت سطح، میزان انتقال حرارت جابه‌جایی از گازهای داغ به بستر متخلخل (گلوله‌ها) افزایش یافته که موجب افزایش دمای سطح برای گلوله‌های کوچک‌تر می‌شود.

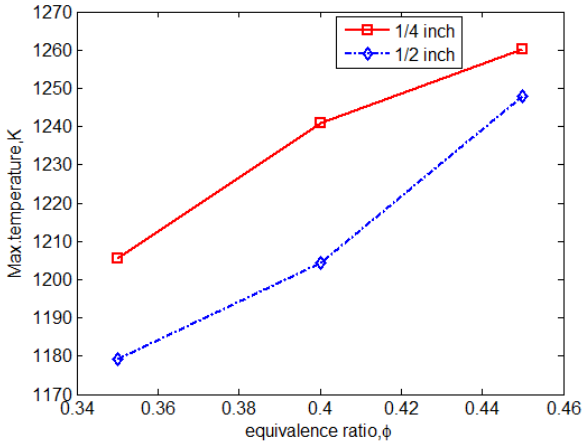


Figure 4- Maximum flame temperature vs. equivalence ratio at 2.6 kW for different porosities

شکل ۴- نمودار دمای بیشینه شعله برحسب نسبت هم‌ارزی برای قطرهای مختلف گلوله در توان ۲/۶ kW

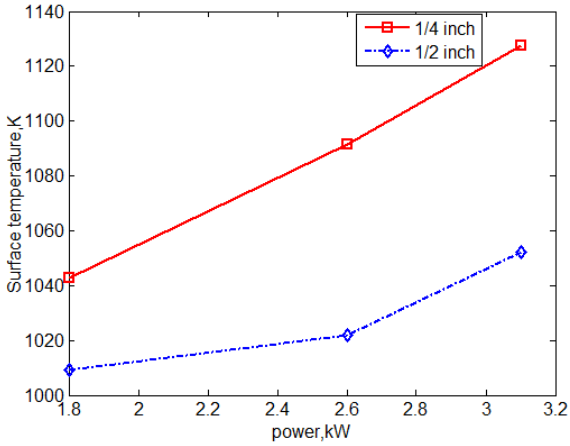


Figure 5- Surface temperature vs. power for different porosities ($\phi = .35$)

شکل ۵- نمودار دمای سطح برحسب توان مشعل برای قطرهای مختلف گلوله در نسبت هم‌ارزی ۰/۳۵

www.SID.ir

ب) تحلیل آلاینده‌های خروجی

در پژوهش حاضر، میزان آلاینده‌های CO و NOx اندازه‌گیری و بررسی شده است. در تمامی آزمایش‌ها، به‌دلیل دمای پایین شعله، میزان NOx مقدار ناچیزی به‌دست آمد. تولید NOx به‌شدت به دمای شعله وابسته است و با افزایش دما میزان NOx افزایش می‌یابد. بازگردش حرارت از محصولات احتراق به ناحیه پیش‌گرمایش موجب کاهش دمای محصولات احتراق شده که در نتیجه میزان NOx کاهش می‌یابد. بنابراین، با ایجاد یک احتراق فوق رقیق در مشعل متخلخل، می‌توان میزان انتشار NOx را به‌شدت کاهش داد. از طرفی، این کاهش دما موجب افزایش آلاینده‌هایی همچون مونوکسید کربن می‌شود.

با توجه به شکل ۶، می‌توان به نتایج زیر رسید:

- کم‌ترین میزان CO اندازه‌گیری شده برابر ۵۷ ppm به‌دست آمد.
- همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش نسبت هم‌ارزی، میزان تولید CO افزایش می‌یابد. افزایش نسبت هم‌ارزی به‌معنای سوخت بیشتر و هوای کم‌تر (مخلوط غنی) است و با کاهش نسبت هم‌ارزی به‌سمت مخلوط رقیق می‌رویم. در حالاتی که مخلوط رقیق داریم، به‌خاطر وجود هوای کافی، احتراق می‌تواند کامل‌تر صورت گیرد و در این‌صورت میزان CO کاهش می‌یابد. چون در محدوده نسبت‌های هم‌ارزی کم‌تر از ۰/۵ احتراق صورت می‌گیرد، دمای ناحیه احتراق پایین است و به این دلیل میزان CO تولیدی بالاست.
- با کاهش تخلخل، میزان CO تا حدودی کاهش می‌یابد. این را می‌توان به افزایش دمای شعله، هنگامی که قطر گلوله کاهش می‌یابد، ربط داد. در حقیقت، با انتخاب گلوله‌های کوچک‌تر، مقاومت در راه جریان بیشتر و در نتیجه زمان ماندگاری[1] بیشتر شده و میزان CO کاهش می‌یابد. میزان NOx نیز، همانند CO، توسط دو عامل دمای شعله و زمان ماندگاری کنترل می‌شود، که البته اثر دما به‌مراتب بیشتر است.

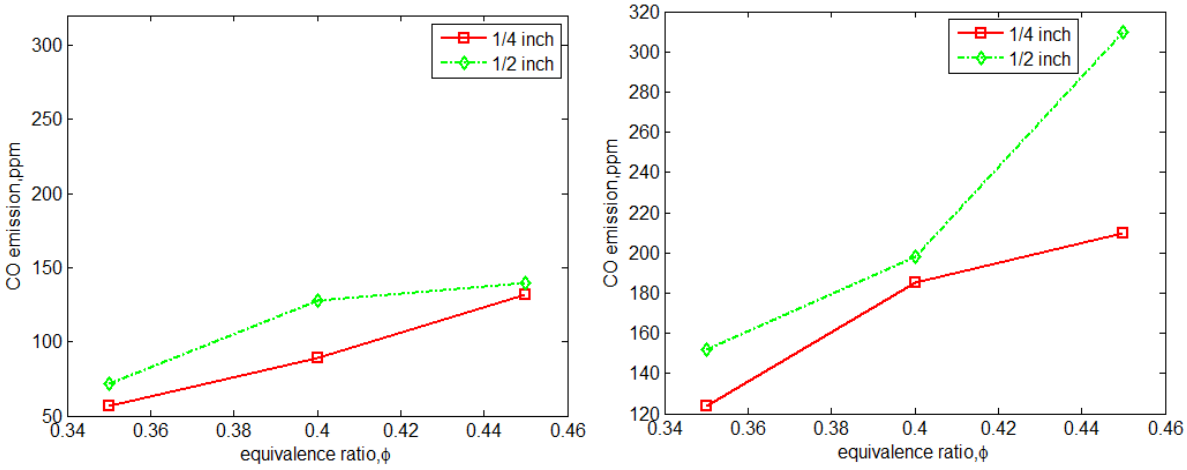


Figure 6- CO concentration as a function of equivalence ratio at different porosities for powers (a) 1.2 (b) 1.9 kW

شکل ۶- نمودار میزان انتشار CO برحسب نسبت هم‌ارزی در تخلخل‌های مختلف برای توان الف) ۱/۲ kW، ب) ۱/۹ kW

۲- عملکرد ناپایدار مشعل (پدیده برگشت شعله)

در این بخش، پدیده برگشت شعله در مشعل متخلخل بررسی خواهد شد. اثرات تخلخل در پایین‌دست، نرخ آتش و نسبت هم‌ارزی روی مدت زمان برگشت شعله بررسی شده است. احتراق ناپایدار، مانند برگشت شعله، زمانی اتفاق می‌افتد که سرعت

1. Residence time

www.SID.ir

شعله از سرعت مخلوط بیشتر شود. خارج از محدوده عملکرد پایدار مشعل، پدیده برگشت شعله یا جداشدن شعله رخ خواهد داد. در واقع، حرکت شعله از ناحیه احتراق به قسمت زیرین بسترهای متخلخل، بعد از جرقه و ایجاد شرایط لازم را برگشت شعله می‌گویند. هنگامی که در نسبت‌های هم‌ارزی بیشتر از ۰/۴۵ جرقه زده می‌شود، پدیده برگشت شعله بعد از گذشت مدت زمانی رخ می‌دهد. در پژوهش حاضر، در نسبت‌های هم‌ارزی ۰/۶۵، ۰/۷۵ و ۰/۸۵ این پدیده بررسی شده است.

شکل ۷ نمودار مدت زمان برگشت شعله برحسب نسبت هم‌ارزی در تخلخل‌های مختلف را نشان می‌دهد. نتایج زیر از این نمودار حاصل می‌شود:

- با کاهش نسبت هم‌ارزی، مدت زمان برگشت شعله افزایش می‌یابد. با توجه به نمودارها، با کاهش نسبت هم‌ارزی، دمای شعله کاهش یافته و این امر موجب کاهش پیش‌گرمایش به بالادست بستر متخلخل می‌شود و مدت زمان بیشتری سپری خواهد شد تا پدیده برگشت شعله رخ دهد.
- در یک نسبت هم‌ارزی ثابت، با افزایش قطر گلوله در پایین‌دست، مدت زمان برگشت شعله کاهش می‌یابد. با افزایش قطر گلوله، میزان تخلخل افزایش یافته و این سبب افزایش انتقال حرارت تابشی و کاهش انتقال حرارت هدایت (به‌خاطر کاهش سطح) به بالادست می‌شود. همچنین، لایه‌های زیرین که در تماس با مخلوط سرد هوا و گازند، به‌خاطر کاهش سطح، کم‌تر خنک می‌شوند. از طرفی، میزان اتلاف حرارت از طریق دیواره مشعل نیز کاهش یافته و در نتیجه، به علت کاهش پیش‌گرمایش، مدت زمان برگشت شعله کاهش می‌یابد.
- همچنین، با افزایش نرخ آتش در یک نسبت هم‌ارزی ثابت، به‌خاطر افزایش نرخ آزادسازی حرارت و دمای شعله، مدت زمان برگشت شعله کاهش می‌یابد.

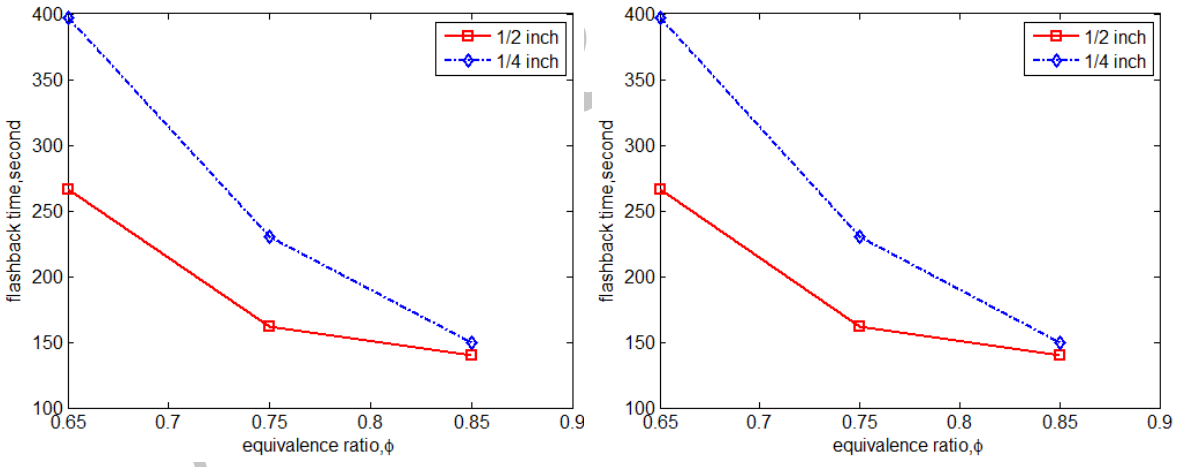


Figure 7- Flashback time as a function of equivalence ratio at different porosities for powers (a) 2.5 (b) 3.3 kW

شکل ۷- نمودار مدت زمان برگشت شعله برحسب نسبت هم‌ارزی در تخلخل‌های مختلف برای توان الف) ۲/۵ kW، ب) ۳/۳ kW

تکرارپذیری

به‌منظور تایید نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های انجام‌شده، به‌صورت تصادفی تکرارپذیری انجام شد که نتایج آن در شکل‌های ۸ و ۹ آورده شده است. همان‌گونه که در این دو شکل مشاهده می‌شود، اندازه‌گیری‌های مختلفی که در شرایط محیطی و عملکردی یکسان انجام شده است، با دقت خوبی بر هم منطبق هستند که نمایانگر تکرارپذیری آزمایش‌های انجام‌شده است.

www.SID.ir

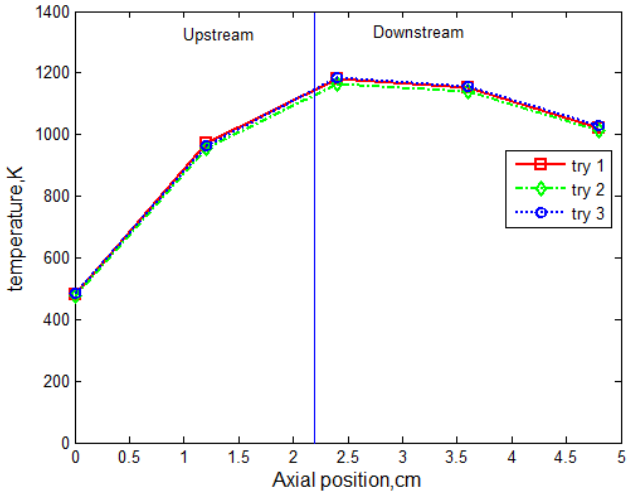


Figure 8- Measured axial temperature profiles at 2.6 kW ($\phi = .35$), case B configuration

شکل ۸- نمودار دمای محوری مشعل متخلخل برای پیکربندی B برحسب موقعیت ترموکوپل برای نسبت هم‌ارزی ۰/۳۵ و توان ۲/۶ kW

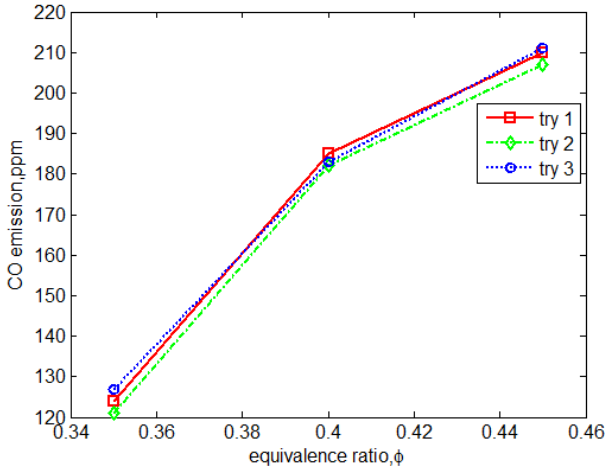


Figure 9- CO concentration as a function of equivalence ratio at 1.5 kW, case A configuration

شکل ۹- نمودار میزان انتشار CO برحسب نسبت هم‌ارزی برای پیکربندی A در توان ۱/۵ kW

نتیجه‌گیری

در پژوهش کنونی، احتراق پیش‌مخلوط گاز طبیعی و هوا در یک مشعل متخلخل دولایه‌ای به‌صورت تجربی بررسی شده است. تغییر عواملی همچون نسبت هم‌ارزی، نرخ آتش و تخلخل در پایین‌دست مشعل بر احتراق پایدار مشعل و مدت زمان برگشت شعله مورد بررسی قرار گرفت. توزیع دما در طول محوری مشعل، مدت زمان برگشت شعله و میزان آلاینده‌ها بحث شد. نتایج اصلی برآمده از تحقیق حاضر بدین‌صورت است:

- همان‌طور که انتظار می‌رود، با افزایش نسبت هم‌ارزی، دمای شعله افزایش می‌یابد. این امر را می‌توان به‌خاطر افزایش پیش‌گرمایش موثر و عدم افت حرارتی به‌واسطه گرمایش هوای اضافی دانست.
- با افزایش نرخ آتش در یک نسبت هم‌ارزی ثابت، به‌دلیل انرژی حرارتی آزادشده، دمای بیشینه شعله نیز افزایش می‌یابد.
- در تمامی حالات آزمایش‌شده، شعله در پایین‌دست و نزدیک به سطح مشترک دو بستر متخلخل تشکیل می‌شود.
- با افزایش قطر گلوله در پایین‌دست و به‌خاطر افزایش فضای خالی، انتقال حرارت تابشی افزایش و دمای شعله نیز کاهش می‌یابد.

www.SID.ir

- با افزایش قطر گلوله در پایین‌دست، دمای سطح کاهش می‌یابد.
- با کاهش نسبت هم‌ارزی، مدت زمان برگشت شعله افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش نرخ آتش، زمان برگشت شعله کاهش می‌یابد.
- با افزایش قطر گلوله در پایین‌دست و در نتیجه کاهش دمای شعله، میزان CO افزایش می‌یابد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از امور پژوهش و توسعه شرکت گاز استان اصفهان، به‌دلیل تقبل بخشی از هزینه‌های انجام پروژه، تشکر می‌کنند.

منابع

1. J. Howell, M. Hall and J. Ellzey, "Combustion of Hydrocarbon Fuels Within Porous Inert Media," *Progress in Energy and Combustion Science*, 22, No. 2, 1996, pp. 121-145.
2. M. F .Kaviani and M. Fatehi, "Combustion in Porous Media," *Scientia Iranica*, 1994, 1, No. 1, pp. 47-83.
3. M. A. Mujeebu, M. Z. Abdullah, M. Z. A. Bakar, A. A. Mohamad, R. M. N. Muhad and M. K. Abdullah, "Combustion in Porous Media and its Applications–A Comprehensive Survey," *Journal of Environmental Management*, 90, No. 8, 2009, pp. 2287-2312.
4. M. A. Mujeebu, M. Z. Abdullah, M. Z. A. Bakar, A. A. Mohamad and M. K. Abdullah, "Applications of Porous Media Combustion Technology–A Review," *Applied Energy*, 86, No. 9, 2009, pp. 1365-1375.
5. S. Wood and A. T. Harris, "Porous Burners for Lean-Burn Applications," *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, No. 5, 2008, pp. 667-684.
6. G. De Soete, "Stability and Propagation of Combustion Waves in Inert Porous Media," *Symposium (International) on Combustion*, 11, No. 1, 1967, pp. 959-966.
7. P. F. Hsu, W. D. Evans and J. R. Howell, "Experimental and Numerical Study of Premixed Combustion Within Nonhomogeneous Porous Ceramics", *Combustion Science and Technology*, 90, No. 1-4, 1993, pp. 149-172.
8. W. M. Mathis and J. L. Ellzey, "Flame Stabilization, Operating Range, and Emissions for a Methane/Air Porous Burner," *Combustion Science and Technology*, 175, No. 5, 2003, pp. 825-839.
9. K. Qiu and A. Hayden, "Premixed Gas Combustion Stabilized in Fiber Felt and its Application to a Novel Radiant Burner," *Fuel*, 85, No. 7, 2006, pp. 1094-1100.
10. V. Bubnovich, M. Toledo, L. Henríquez, C. Rosas and J. Romero, "Flame Stabilization Between Two Beds of Alumina Balls In A Porous Burner," *Applied Thermal Engineering*, 30, No. 2, 2010, pp. 92-95.
11. A. Bakry, A. Al-Salaymeh, H. Ala'a, A. Abu-Jrai and D. Trimis, "CO and NOx Emissions in Porous Inert Media (PIM) Burner System Operated under Elevated Pressure and Inlet Temperature using a New Flame Stabilization Technique," *Chemical Engineering Journal*, 165, No. 2, 2010, pp. 589-596.
12. F. Bahadori, K. Mirza, A. Behroozsarand and S. Rezvantalab, "Porosity Effects in Flame Length of the Porous Burners," *Iranian Journal of Health, Safety and Environment*, 1, No. 4, 2014, pp. 186-190.
13. F. Bahadori, K. Mirza, A. Behroozsarand and S. Rezvantalab, "Investigation of Porosity Effects in the Emission of Pollutants In Porous Burners," *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 50, No. 2, 2015, pp. 171-175.
14. S. A. Hashemi, M. Nikfar and R. Motaghedifard, "Experimental Study of Operating Range and Radiation Efficiency of a Metal Porous Burner," *Thermal Science*, 19, No. 1, 2015, pp. 11-20.
15. C. Keramiotis, B. Stelzner, D. Trimis and M. A. Founti, "Porous Burners for Low Emission Combustion: An Experimental Investigation," *Energy*, 45, No. 1, 2012, pp. 213-219.
16. C. Keramiotis and M. A. Founti, "An Experimental Investigation of Stability and Operation of a Biogas Fueled Porous Burner," *Fuel*, 103, 2013, pp. 278-284.
17. H. B. Gao, Z. G. Qu, Y. L. He and W. Q. Tao, "Experimental Study of Combustion in a Double-Layer Burner Packed with Alumina Pellets of Different Diameters," *Applied Energy*, 100, 2012, pp. 295-302.
18. H. B. Gao, Z. G. Qu, X. B. Feng and W. Q. Tao, "Combustion of Methane/Air Mixtures in a Two-Layer Porous Burner: A Comparison of Alumina Foams, Beads, and Honeycombs," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 52, 2014, pp. 215-220.
19. H. B. Gao, Z. G. Qu, X. B. Feng and W. Q. Tao, "Methane/Air Premixed Combustion in a Two-Layer Porous Burner with Different Foam Materials Fuel," 115, 2014, pp. 154-161.
20. M. D. Emami, H. Atoof and M. R. Rezaeibakhsh, "Flash-Back Phenomenon in a Two-Layer Porous Media: An Experimental Study," *Journal of Porous Media*, 19, No. 3, 2016, pp. 76-83.
21. M. Shafiei, M. Farzaneh, R. Ebrahimi and M. Shams, "Experimental Study of Combustion in a Porous Media Burner," *Second Combustion Conference of Iran*, Azad Islamic University, Mashhad, Iran, Februsry 2008. (In Persian)

Archive of SID

www.SID.ir

English Abstract

An experimental study of stable combustion and flashback phenomenon in a double-layer porous burner

Mohammad Omidi and Mohsen Davazdah Emami
Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
(Received: 2016.11.21, Received in revised form: 2017.03.16, Accepted: 2017.04.16)

In the current research, a double-layer porous burner has been studied, in which SiC ceramics and alumina silicate (Al_2SiO_5) balls have been used in the first and second layers, respectively. A very important issue in relation to porous burners is to stabilize the flame on the surface of the porous media. Therefore, it is essential to evaluate the conditions that lead to instability (flashback phenomenon) in order to prevent sudden flashback of the flame in the porous burner. In this paper, the flame temperature, flame stability limit, flashback phenomenon and pollutants formation have been evaluated by changing operating parameters such as diameter of the balls, equivalence ratio and firing rate. Results show that a stable flame prevails in the range of equivalence ratio of 0.35-0.45. The flame moves downstream by reducing the equivalence ratio. Moreover, the maximum flame temperature and the surface temperature decrease by increasing the diameter of the balls. The flame flashback time decreases by increasing the equivalence ratio. In addition, increasing porosity downstream of the burner decreases flashback time. The amount of the excess air has a significant effect on the amount of CO, such that the concentration of CO reduces by reducing the equivalence ratio. The NOx concentration is negligible in all of the experiments (below 5 ppm) due to low temperature of the burner.

Keywords: Two-layer porous burner, Flame stability limit, Flame temperature, Flashback, Emission

Archive of SID

www.SID.ir