

مطالعه تجربی عملکرد یک مشعل محیط متخلخل توان متوسط و کاهش تلفات حرارتی آن

سیامک حسین پور
دانشیار - دانشگاه صنعتی سهند
hossainpour@sut.ac.ir

حسن جلالی خسروشاهی
سازمان نظام مهندسی استان آذربایجان شرقی - دانشگاه صنعتی سهند
mr.hasanjalali@gmail.com

چکیده

از معایب مشعل های محیط متخلخل در مقایسه با مشعل های عادی ، تلفات حرارتی زیاد و مشکل در راه اندازی این نوع مشعل ها گزارش شده است که در تحقیق حاضر با وارد نمودن هوای ثانویه ای سعی در کاهش این تلفات را داشته و نیز از طرف دیگر بحث تشکیل شعله نفوذی در محیط متخلخل مورد بررسی قرار گرفته است. البته مبیایست در نظر داشت که وارد کردن جریان هوای ثانویه ای از اطراف محفظه احتراق باعث ایجاد شعله نفوذی می شود [۷] که با توجه به تغییر فرآیند احتراق مستلزم مطالعه ی تغییرات دمایی می باشد.

لازم به ذکر است، در کار حاضر با تغییر دبی جریانهای ورودی که شامل جریان مخلوط سوخت و هوا و جریان هوای ثانویه میباشد، تشکیل انواع شعله در محیط متخلخل و توزیع دما برای حالت های مختلف بدست آمده است.

طراحی و ساخت دستگاه آزمایش

شکل ۲ نمای کلی از دستگاه آزمایش را با کلیه ی وسایل اندازه گیری و اجزای مشعل را نشان میدهد. هوا از یک سو و گاز شهری (متان) از سوی دیگر بعد از عبور از وسایل اندازه گیری و کنترلرها وارد مخلوط کن سوخت و هوا شده و پس از اختلاط آماده ورود به ورودی مشعل می شود. مخلوط سوخت و هوا با عبور از صفحه سوراخ دار موجود در ابتدای مشعل، وارد پیش گرم کن شده و پس از آن مخلوطی یکنواخت و همگن وارد ناحیه احتراق می شود. هوای مورد نیاز جهت احتراق پیش مخلوط جزئی نیز از مسیری دیگر پس از عبور از تجهیزات اندازه گیری و کنترلرها وارد محفظه احتراق می شود.

نکته ای که وجود دارد این است که ضریب صدور سطح متخلخل از جنس SiC با ضریب صدور یک سطح صاف و بدون حفره از همان جنس متفاوت است. یک سرامیک صاف و بدون تخلخل از جنس SiC، دارای ضریب صدور عمودی متوسط دمایی نزدیک ۰/۸۵ است. در یک محیط متخلخل از یک جنس مشخص، به دلیل وجود حفره ها، ضریب صدور از یک محیط صاف بدون حفره از همان جنس بیشتر است. زیرا حفره ها در محیط متخلخل رفتاری شبیه یک جسم سیاه دارند و چون ضریب صدور جسم سیاه برابر ۱ است، بنابراین در مجموع می توان گفت یک محیط متخلخل از جنس SiC ضریب صدور نزدیک ۰/۹ دارد. لازم بذکر است محیط های متخلخل دارای ضریب هدایت حرارتی بالاتری نیز می باشند.

کاهش سریع منابع سوخت های فسیلی و آلودگی محیط زیست پیامدهای اصلی استفاده روز افزون سوخت های فسیلی است [۱]. مشعل های محیط متخلخل به دلیل نشر کم آلودگی، پایداری قابل توجه شعله و افزایش بازده حرارتی می توانند در بسیاری از شاخه های صنعت به کار روند [۲]. البته تلفات حرارتی زیاد خصوصا از طریق جداره خارجی از اصلی ترین معایب این مشعل ها محسوب می شود. احتراق پیش مخلوط جزئی یکی از روش هایی است که منجر به کاهش تولید NOX می شود. به منظور بررسی تجربی احتراق پیش مخلوط جزئی در محیط متخلخل، یک نمونه مشعل محیط متخلخل با توان 5KW برای هر دو جداره ی فلزی و سرامیکی طراحی، ساخته و آزمایش شده است. احتراق در سه حالت استوکومتری، احتراق با هوای اضافی و پیش مخلوط جزئی مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت احتراق با هوای اضافی با افزایش نسبت هوای اضافی دمای بیشینه شعله کاهش می یابد. در احتراق پیش مخلوط جزئی با افزایش نسبت هم آری دمای شعله افزایش و شعله بیرونی که به صورت یک شعله نفوذی می باشد، گسترش پیدا می کند.

واژه های کلیدی: احتراق، مشعل محیط متخلخل، شعله پیش مخلوط جزئی، آلاینده، روش تجربی

مقدمه

یکی از راه حل های عملی و موثر برای رفع مشکلات ناشی از استفاده بیش از حد از سوخت های فسیلی اعمال تغییرات در سیستم های مصرف کننده-ی سوخت های فسیلی می باشد. در نظر گرفتن خصوصیات ضعیف انتقال حرارت تشعشعی و هدایت در مخلوط گازها در مقایسه با مواد جامد مبنای شکل گیری ایده احتراق در محیط متخلخل گردید. تفاوت عمده بین احتراق در یک محیط متخلخل و یک سیستم احتراق معمولی در انتقال حرارت بهتر و موثرتر بین گازهای سوخته شده و مخلوط نسوخته است [۳]. احتراق پیش مخلوط جزئی یکی از روشهایی است که منجر به کاهش تولید NOX میشود. شعله های پیش مخلوط جزئی هنگامی حاصل میشوند که هوایی کمتر از مقدار استوکومتری به ناحیه ی واکنش وارد شود، و در عین حال اکسید کننده ی اضافی در ناحیه واکنش موجود باشد تا فرآیند احتراق کامل شود. [۴]

در مورد مشعل های متخلخل تحقیقات صورت گرفته به سال ۱۹۸۶ باز می گردد که اچیکو و همکارانش با در نظر گرفتن یک منبع تولید حرارت در داخل محیط متخلخل پدیده احتراق را شبیه سازی کردند. نتایج نشان داد که پیش گرم شدن مخلوط سوخت و هوا باعث افزایش چشمگیر راندمان مشعل می شود [۵]. همچنین چفین و همکارانش از اولین کسانی بودند که آزمایش هایی را جهت تعیین میزان آلاینده ها انجام داده اند. آنها نشان دادند که انتشار NOX در مشعل سرامیکی متخلخل به طور قابل ملاحظه- ای کاهش می یابد [۶].



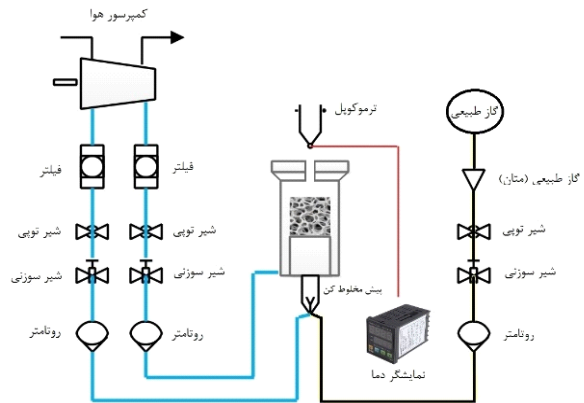
شکل ۱. سرامیک SiC

معادلات و محاسبات

توان کاری مشعل 5KW در نظر گرفته می شود، سوخت مشعل مورد آزمایش گاز شهری (متان) است. محاسبه مقدار دبی سوخت مورد نیاز با توجه به ارزش حرارتی گاز شهری که تقریباً برابر با 98.3 kcal/m^3 می باشد صورت گرفته است. ($1\text{Cal}=4.18\text{J}$)

$$HR = \dot{V} \times HV \quad (1-3)$$

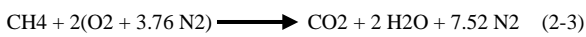
که در این معادله HR^1 ارزش حرارتی سوخت، \dot{V} دبی حجمی سوخت مصرفی و HR^2 گرمای آزاد شده از مشعل است. با توجه به معادله 1-3 میزان دبی سوخت مصرفی برای توان 5 KW حدود $0.439 \text{ m}^3/\text{h}$ محاسبه می شود.



شکل ۱ نمای کلی از دستگاه آزمایش

مقدار هوای مورد نیاز

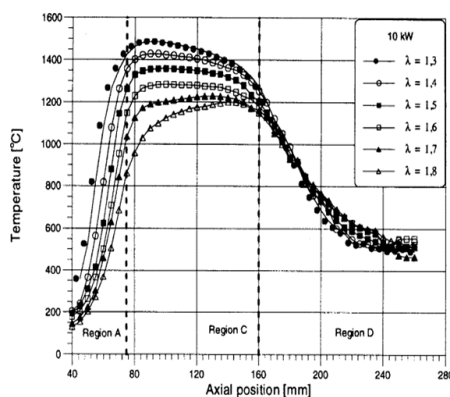
با توجه به مقدار سوخت مصرفی که در قسمت قبل محاسبه شد و با در نظر گرفتن معادله احتراق استوکیومتری متان، معادله 2-3، مقدار هوای لازم جهت احتراق بدست می آید.



در احتراق استوکیومتری متان به ازای هر یک مول متان، $9/52$ مول هوا نیاز است، بنابراین میزان هوای مصرفی برای توان 5KW حدود $4.179 \text{ m}^3/\text{h}$ می باشد.

اعتبارسنجی نتایج

دلایلیج و همکارانش یک مشعل متخلخل دو قسمتی با توان 10KW و متصل به یک مبدل حرارتی را تحلیل و آزمایش کردند. سوخت استفاده شده در این مشعل متان مد نظر گرفته شده است که از لحاظ هندسه و ابعاد نیز تطابق خوبی با دستگاه ساخته شده در پروژه ی حاضر را دارد. شکل ۲ توزیع دما برای نسبت های هوای اضافی مختلف می باشد که دمای بیشینه برای توان 10KW در نسبت هوای اضافی $1/3$ رخ داده است و تقریباً برابر 1500 درجه سلسیوس می باشد [۸].



شکل ۲ توزیع دما بدست آمده توسط دلایلیج و همکارانش برای مشعل متخلخل دو قسمتی [۸]

محفظه احتراق از سه قسمت اصلی تشکیل شده است، که شامل بدنه مشعل، محفظه پیش گرمکن و پخش کننده هوای پیش مخلوط جزئی می باشد. بدنه مشعل از یک استوانه فلزی به قطر 13 سانتی متر، ارتفاع $21/5$ سانتی متر و ضخامت 8 میلی متر ساخته شده است. محفظه پیش گرمکن نیز از یک استوانه ی فلزی به قطر 9 سانتی متر، ارتفاع 9 سانتی متر و ضخامت 6 میلی متر ساخته شده است که سرامیک های متخلخل روی این محفظه قرار می گیرند.

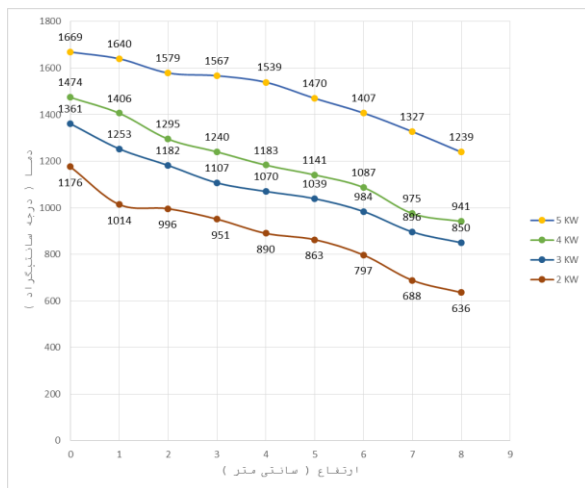
منطقه پیش گرمایش جهت پیش گرمایش مخلوط سوخت و هوا که تأثیر مهمی در روند احتراق و کارایی مشعل دارد استفاده می شود، عمل پیش گرمایش علاوه بر کاهش تنش های حرارتی در پوسته مشعل و قالب متخلخل، موجب افزایش سرعت شعله و در نتیجه پایداری بیشتر شعله می شود. داخل این محفظه با گلوله های سرامیکی آلومینا پر می شود و به صورت یک محیط متخلخل در می آید. مخلوط سوخت و هوا پس از عبور از این صفحه سوراخ دار وارد محیط پر شده از سرامیک های آلومینا می شود.

از مشخصات بارز این نوع گلوله ها مقاومت حرارتی بالا می باشد. در قسمت پیش گرمایش از گلوله های با قطر $1/8$ اینچ استفاده شده است تا مخلوط گاز و هوا فقط پیش گرم شده و احتراق در این ناحیه صورت نگیرد.

محیط های متخلخلی که در این آزمایشها مورد استفاده قرار گرفته اند از جنس فوم های سرامیکی SiC می باشند. سرامیکها به شکل استوانه ای به قطر 90mm و ارتفاع 22mm بوده و دارای تخلخل 10ppi می باشند.

به دلیل بالا بودن دمای محفظه ی احتراق از ترموکوپل نوع S جهت اندازه گیری دما در طول محفظه احتراق استفاده می شود. لازم به ذکر است که این ترموکوپل بر روی یک جک سوار شده است و به وسیله ی این جک در طول محفظه احتراق بالا و پایین می شود و بدین ترتیب دمای سرتاسر طول، در روی خط مرکزی مشعل قابل اندازه گیری می گردد.

¹ Heating value
² Heat release



شکل ۵ حالت استوکیومتری توزیع دما در محفظه احتراق برای توان های متفاوت دیواره سرامیکی

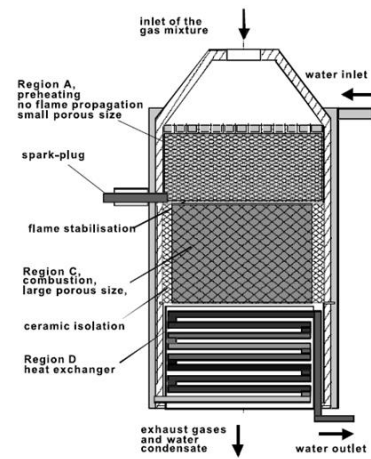


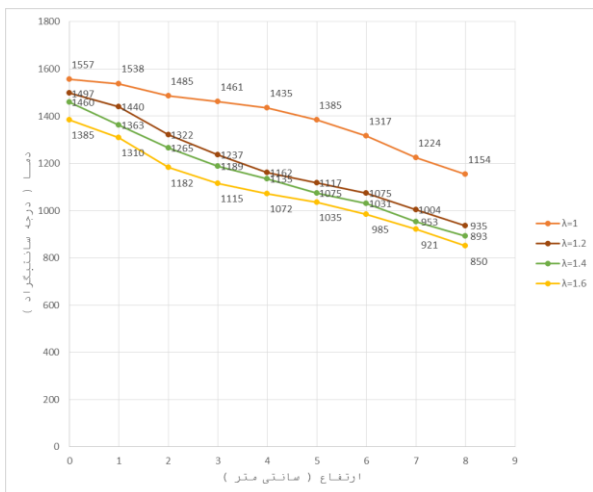
Fig. 5. Schematic diagram of the combustor with built-in heat exchanger.

شکل ۳ نمایی از نمونه مشعل بررسی شده توسط دلایلیج و همکارانش [۸] At the position of the flame location within the combustor—region C

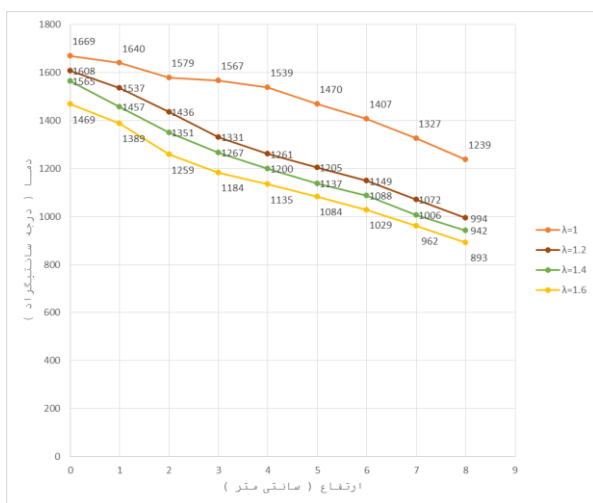
با توجه به نمونه کار انجام شده که به آن اشاره شد و در نظر گرفتن خطاهایی که در حین انجام آزمایشات میتوانند بوقوع بپیوندند از قبیل خطاهای اندازه گیری، شرایط محیطی محل انجام آزمایش، امکان متفاوت بودن مواد استفاده شده مخصوصاً جنس سرامیک های متخلخل و یا امکان مغایرت داشتن درصد گازهای استفاده شده، مشاهده می شود که اکثر این کارها در یک محدوده دمایی مشخصی قرار دارند. البته با توجه به هندسه کار انجام شده، جنس محیط متخلخل مورد استفاده و تلفات موجود دماهای بدست آمده دارای اختلاف می باشد که با در نظر گرفتن تمامی این مسائل دماهای بدست آمده در کار حاضر قابل قبول می باشد.

نتایج

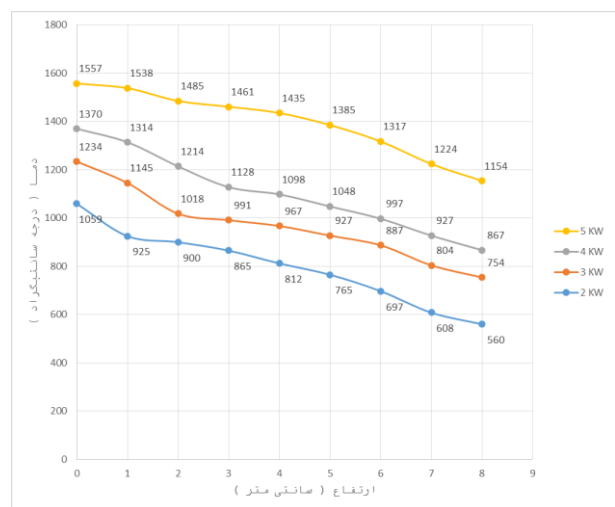
برای حالت استوکیومتری توزیع دما در طول محفظه احتراق و در راستای سرامیک ها برای چهار توان متفاوت بررسی شده همان طور که مشاهده میشود دمای حداکثر در ابتدای ناحیه احتراق و انتهای منطقه پیش گرمایش قرار دارد.



شکل ۶ توزیع دما در محفظه احتراق با نسبتهای هوای اضافی مختلف برای توان ۵KW دیواره فلزی



شکل ۷ توزیع دما در محفظه احتراق با نسبتهای هوای اضافی مختلف برای توان ۵KW دیواره سرامیکی



شکل ۴ حالت استوکیومتری توزیع دما در محفظه احتراق برای توان های متفاوت دیواره فلزی

نتیجه‌گیری

در حالت احتراق با هوای اضافی در توان های پایین دمای بیشینه شعله در نسبت های هوای اضافی کم رخ می دهد که با افزایش نسبت هوای اضافی دمای بیشینه شعله کاهش می یابد. با افزایش توان مشعل اختلاط سوخت و هوا به طور بهتری صورت می گیرد و دمای بیشینه در نسبت استوکیومتری رخ می دهد.

در احتراق پیش مخلوط جزئی در همه ی نسبت های هم ارزی دمای بیشینه شعله نسبت به حالت استوکیومتری کمتر بوده و مقدار آلاینده‌گی کمتری نسبت به حالت استوکیومتری مشاهده می شود و همچنین یک شعله درونی و یک شعله بیرونی تشکیل می شود که با افزایش نسبت هم ارزی، شعله بیرونی که به صورت یک شعله نفوذی می باشد گسترش پیدا میکند و باعث افزایش دما در طول سرامیک ها می شود. لازم به ذکر می باشد، هوای ثانویه ای که از کنار های محفظه احتراق در حالت احتراق پیش مخلوط جزئی وارد محفظه می شود، اتلاف حرارت از طریق دیواره ی محفظه را کاهش می دهد.

مراجع

[۱] Mujeebu MA, Abdullah MZ, Bakar MZA, Mohamad AA, Muhad RMN, Abdullah MK. Combustion in porous media and its applications--a comprehensive survey. J Environ Manage 2009; 90:2287–312.

[۲] Mathis WM, Ellzey JL. Flame stabilization, operating range, and emissions for a methane/air porous burner. Combust Sci Technol 2010.

[۳] مجید سبزویشانی، سیدعبدالمهدی هاشمی، احمد مقدس دستجردی "بررسی تجربی و مقایسه عملکرد سه نوع مشعل شعله آزاد، متخلخل و چرخشی در یک سیستم نمونه" سومین کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی، تهران، ۱۰ تا ۱۱ اسفندماه ۱۳۹۲

[۴] Li S. NO_x formation in two-stage methane–air flames. Combust Flame 1999; 118:399–414.

[۵] Echigo R, Yoshizawa Y, Hanamura K, Tomimura T. Analytical and experimental studies on radiative propagation in porous media with internal heat generation 1986.

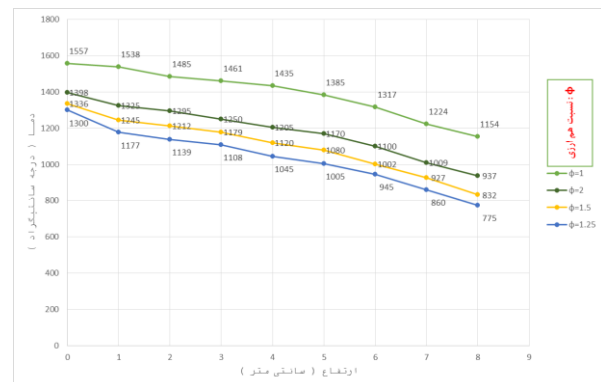
[۶] Chaffin C, Koenig M, Koeroghlian M, Matthews RD, Hall MJ, Nichols SP, et al. Experimental investigation of premixed combustion within highly porous media 1991, United States: American Society of Mechanical Engineers.

[۷] Bennett BA MA, McEnally CS, Pfefferle LD, Smooke MD. Computational and experimental study of axisymmetric coflow partially premixed methane/air flames. Combust Flame 2000; 123:522-46.

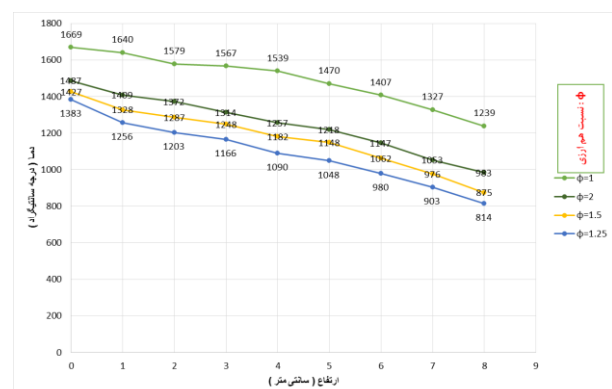
[۸] Delalic N, Mulahasanovic D, Ganic EN. Porous media compact heat exchanger unit—experiment and analysis. Exp Therm Fluid Sci 2004; 28:185–92.

در آزمایش احتراق با هوای اضافی ، کلیه آزمایش های مربوط به حالت استوکیومتری با اضافه کردن هوای اضافی تکرار و بررسی شده اند که برای سه نسبت هوای اضافی ۱/۲، ۱/۴ و ۱/۶ توزیع دما بدست آمده است. برای توان های پایین حداکثر دما در نسبت هوای اضافی ۱/۲ رخ می دهد، که نشان می دهد در این حالت احتراق کامل بوده است. دلیل اینکه احتراق کامل در نسبت هوای اضافی ۱/۲ رخ می دهد، این است که اختلاط در پیش مخلوط کن به صورت ایده آل و کامل نبوده و با افزایش نسب هوای اضافی به صورت احتراق کامل در می آید. همچنین با افزایش نسبت هوای اضافی دمای حداکثر شعله نیز کاهش می یابد، علت این امر را میتوان اینگونه توضیح داد که با افزایش دبی هوا با یک مقدار ثابت سوخت مقدار پیش گرمایش جریان کم می شود شعله به سمت جلو می رود و دمای بیشینه شعله کاهش می یابد.

برای توان 5KW نیز با افزایش دبی سوخت و هوا، اختلاط به صورت کاملتری صورت گرفته است و احتراق کامل در همان نسبت استوکیومتری رخ داده است و با افزایش نسبت هوای اضافی دمای حداکثر شعله کاهش یافته است.



شکل ۸ توزیع دما در محفظه احتراق برای حالت پیش مخلوط جزئی برای توان ۵KW دیواره فلزی



شکل ۹ توزیع دما در محفظه احتراق برای حالت پیش مخلوط جزئی برای توان ۵KW دیواره سرامیکی

در حالت احتراق با هوای پیش مخلوط جزئی، آزمایش ها برای سه نسبت هم ارزی ۱/۲۵، ۱/۵ و ۲ مورد بررسی قرار گرفته اند. لازم بذکر است که این نسبت هم ارزی برای جریان پیش مخلوط میباشد و کمبود هوا نسبت به حالت استوکیومتری توسط جریان هوای ثانویه‌ای که از اطراف محفظه وارد میشود جبران می گردد.