احتراق بدون شعله و تاثیر آن بر تولید آلاینده‌ها

سعید ریحان‌پور[1*]، علی ارشادی[2]

[1] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
[2] مربی، گروه مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

دریافت: تابستان ۹۵ پذیرش: تابستان ۹۶

چکیده

انرژی یکی از مهم‌ترین نیازهای امروزی بشر بوده که تامین آن با ابزارهای صنعتی عصر حاضر، آلاینده‌های زیادی را همراه دارد. با توجه به این که افزایش آلودگی در جهان شکل نگران کننده‌ای به خود گرفته تحقیقات زیادی برای کاهش تولید آلاینده‌ها انجام شده است. در این تحقیق سعی شده مروری بر تحقیقات گذشته در زمینه احتراق بدون شعله صورت پذیرد و با توجه به ویژگی‌ها و خصوصیات روش بدون شعله نتیجه لازم برای کاهش آلاینده‌ها از جمله گروه اکسیدهای نیتروژن پیدا شود. در این راستا میزان انتشار NO_X و سایر آلاینده‌ها در حالت‌های احتراق سنتی و بدون شعله با هوای پیش‌گرم و سوخت‌های مختلف از جمله سوخت متان، بیوگاز، مخلوط متان / هیدروژن و زیست‌توده بررسی شد. در این بررسی مشخص شد که در احتراق بدون شعله نسبت به احتراق سنتی میزان انتشار آلاینده‌ها بسیار کم‌تر و بهره‌وری انرژی بالاتر است.

***عهده‌دار مکاتبات:** s.reihanpour@gmail.com

کلمات کلیدی: احتراق سنتی، بدون شعله، بیوگاز، زیست‌توده، تشکیل آلاینده‌ها

۱- مقدمه

امروزه حدود ۸۰٪ از الکتریسیته‌ی جهان از طریق فرآیند احتراق تولید می‌شود که در میان آن‌ها زغال سنگ، گاز طبیعی و انرژی هسته‌ای به ترتیب با ۴۵٪، ۲۰٪ و ۱۵٪ مهم‌ترین منابع تولید نیرو هستند [۳-۱]. انرژی پتانسیل مورد نظر معمولا با پدیده‌ی احتراق در سیستم‌های توربین دیگ بخار به الکتریسیته تبدیل می‌شود. نه تنها تولید نیرو، بلکه توسعه‌ی بخش‌های صنعتی نیز در گرو سیستم‌های احتراق است. کارخانه‌های فولاد، شیشه‌سازی، تولید سیمان، تصفیه‌ی نفت خام و حتی تهیه‌ی طعام عمده‌ترین مصرف‌کننده‌های سوخت‌های کانی سیستم‌های احتراق هستند [۷-۴]. از طرفی فرآیند احتراق مخصوصا احتراق سوخت‌های فسیلی آلاینده‌های زیادی را تولید می‌کند، بنابراین طراحی مدل احتراق مناسب نقش بسیار تعیین کننده‌ای در تولید و ذخیره‌ی انرژی گرمایی و همچنین کاهش آلاینده‌ها ایفا می‌کند. احتراق بدون شعله یکی از انواع سیستم‌های احتراق است که علاوه بر کارایی بالا ، میزان انتشار آلاینده‌ها را به شکل قابل توجهی کاهش می‌دهد. احتراق بدون شعله بعنوان احتراق محلول با اکسیژن کم یا متوسط [۸]، احتراق بی رنگ [۹]، احتراق هوا با دمای بالا [۱۰] و اکسیداسیون بدون شعله [۱۱] نامیده می‌شود. این مفهوم نخستین بار توسط وونینگ [۱۱] در سال ۱۹۹۷ میلادی مطرح شد. از آن زمان تا کنون محققان زیادی در زمینه‌ی احتراق بدون شعله تحقیقاتی را انجام داده‌اند که از این جمله می‌توان به تحقیقات زیر اشاره کرد، دالی و همکاران [۱۲] اشاره کردند که دمای عددی در امتداد خط مرکزی از محفظه‌ی احتراق بدون شعله با نتایج تجربی CH_4 خالص و CH_4 رقیق شده با CO_2 متناسب بوده اما با مخلوط CH_4 با N_2 مطابقت نداشت. در تلاش دیگری کولاراودو و همکاران [۱۳] اظهار داشتند که بازده حرارتی احتراق بدون شعله گاز طبیعی ۲٪ از بیوگاز بیش‌تر است. در یک تحقیق دیگر یک محفظه‌ی صنعتی مربع شکل در شرایط بدون شعله‌ی پایدار توسط وبر و همکاران [۱۴] مدل شد. اکسیدکننده با مومنتوم خیلی بالا از طریق یک سوراخ مرکزی موظف شد گاز طبیعی را از طریق دو انژکتور به عنوان سوخت و گازهای خروجی در سیستم گردشی وارد کوره کند. در این شرایط، آشفتگی با مدل k-ε استاندارد [۱۵-۱۶] مدل شد و برای مدل احتراق نیز از مدل اتلاف گردابه‌ای[1] و مدل تابع چگالی احتمال[2] استفاده شد. خوشحال و همکاران [۱۷] تشکیل NO_X و مکانیزم انتقال حرارت در یک بویلر احتراق هوا با درجه حرارت بالا را بصورت عددی بررسی کردند. در داده‌های تجربی که حسینی و همکاران جمع‌آوری کردند، بازده گرمایی احتراق بدون شعله و بیوگاز در یک کوره‌ی مدرج آزمایشگاهی به ترتیب ۳۵٪ و ۳۲٪ بود [۱۸]. ویژگی‌های احتراق و انتشار تحت احتراق هوا با دمای بالا در کوره‌ی سیلندری که با قیر نرم شده و زغال سنگ خشک و خالص بعنوان

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.1.9]

سوخت، غنی شده است توسط سودا و همکاران بررسی شد [۱۹]. آن‌ها دریافتند که پیک دما کاهش یافته و انتشار فرارها افزایش یافته است. همچنین مشاهده کردند که در زمان بالا رفتن دمای هوای پیش‌گرم در طول آزمایش، انتشار NO_X ۴۰٪ کاهش یافته است. یک طرح جدید از مشعل برای عملکردهای دیگ بخار با نام مشعل غنی‌سازی هوای ابتدایی و دوباره حرارت دادن توسط ژانگ و همکاران [۲۰] و دالی و همکاران [۲۱] معرفی شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که زمان استفاده از زغال سنگ خشک و خالص بعنوان سوخت، شعله‌ای ثابت بدست آمده و انتشار NO_X ۵۰٪ کم شده است. مطالعات زیادی در زمینه‌ی احتراق بدون شعله انجام شده اما تا به حال یک تحقیق کامل و جامع درباره تمام امکانات و ویژگی‌های آن انجام نشده است. به همین دلیل در پژوهش حاضر هدف اصلی این است که بصورت خلاصه ویژگی‌های احتراق بدون شعله در حالت‌های مختلف بررسی شود.

۲- احتراق بدون شعله

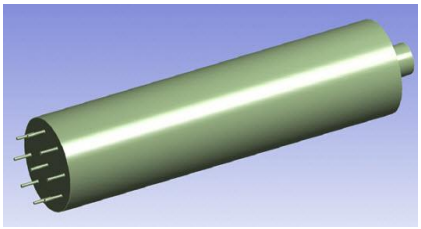
احتراق بدون شعله بعنوان اکسیداسیون بدون شعله، توزیع اشتعال بی رنگ، احتراق محلول اکسیژن و احتراق هوا با درجه حرارت بالا یاد شده است. در حالت بدون شعله احتراق در یک منطقه با درجه حرارت یکسان و در یک اتمسفر (محیط بسته) با مقدار اکسیژن کم و با شعله‌های غیر قابل مشاهده رخ می‌دهد. نوسانات درجه حرارت در رژیم بدون شعله در مقایسه با شعله‌های صنعتی قابل چشم‌پوشی هستند [۲۲].

۲-۱- احتراق بدون شعله‌ی سوخت‌های گازی

احتراق بدون شعله‌ی سوخت‌های گازی نظیر متان ، پروپان و غیره بطور طبیعی باعث تولید آلاینده‌های بسیاری می‌شود. از این رو سوختی با نام بیوگاز که از پس‌آب فاضلاب شهری، مواد زائد جامد، فضولات حیوانی و کشاورزی بوجود می‌آید، در احتراق برای تولید گرما و برق در نظر گرفته شد [۲۴-۲۳]. از طرف دیگر با توجه به اینکه CH_4 و CO_2 از اجزای اصلی بیوگاز هستند و در گرم شدن زمین تاثیر چشم‌گیری دارند، اهمیت و ضرورت توجه به بیوگاز بیش‌تر احساس شده است [۲۵]. مقدار CH_4 در اجزا بیوگاز بسته به مواد اولیه‌ی مختلف از ۴۰ تا ۶۰ درصد است [۲۶]. از سوی دیگر یکی از موانع استفاده از بیوگاز ارزش گرمایی پایین آن است و به همین دلیل بیوگاز خام نمی‌تواند بطور مستقیم در مشعل تجاری بعنوان سوخت برای احتراق استفاده شود، زیرا با توجه به مقدار قابل توجه CO_2 در بیوگاز، نسبت هوا به سوخت برای احتراق پایدار کافی نیست و باید یک مشعل جدید با سیستم کنترل سنجش جداگانه برای بیوگاز نصب شود. از آنجا که بخار آب و SH_2 از اجزای بیوگاز دارای خصوصیت خورنده هستند، چگالش باید مانع نگهداشتن دمای کوره بالاتر از دمای نقطه‌ی شبنم شود. این بدان معنی است که کوره‌های احتراق برای بدست آوردن دمای بالاتر باید با گاز طبیعی یا گاز مایع گرم شوند [۲۷]. بنابراین یک مشعل دوگانه سوز با سوخت بیوگاز در سیستم احتراق باید نصب شود و یا از گاز طبیعی یا گاز مایع بعنوان برخی اجزا بیوگاز استفاده شود [۲۸].

روش دیگری که در احتراق بدون شعله سوخت‌های گازی باعث کاهش شدید آلاینده‌ها می‌شود، استفاده از فناوری جدا سازی کربن در دیگ بخار صنعتی و کوره‌ها است که می‌تواند تا ۹۰٪ انتشار CO_2 را کاهش دهد. همچنین از این فناوری می‌توان در مقیاس‌های بزرگ نیز استفاده کرد [۲۹]. در فناوری جداسازی کربن با استفاده از تزریق آب (یا H_2) به سوخت گازی و واکنش این دو با هوا، کربن که از اجزای اصلی تشکیل دهنده‌ی آلاینده‌ها است به مقدار قابل توجهی کم شده و از میزان آلودگی ناشی از احتراق کم می‌شود.

با توجه به معادلات پیچیده‌ی حاکم بر احتراق بررسی تحلیلی فرآیندهای احتراق بسیار مشکل و به نوعی غیر ممکن است. به همین دلیل تحقیقات زیادی با طراحی مدل‌های مختلف انجام شده تا بصورت عددی فرآیند احتراق شبیه‌سازی شود و طی آن از میزان انتشار آلاینده‌ها کاسته شود. در این راستا حسینی و همکاران [۳۰] با استفاده از نرم افزار انسیس فلوئنت مطابق شکل ۱، یک محفظه‌ی احتراق سه بعدی را شبیه‌سازی کردند. همانطور که در شکل ۱، مشخص است ورودی مرکزی برای سوخت بیوگاز در نظر گرفته شده که از اطرف توسط هشت ورودی اکسیدایزر احاطه شده است. همچنین برای ترکیب بیوگاز ۶۰٪ CH_4 و ۴۰٪ CO_2 را در نظر گرفته‌اند. در بخش ۳، به نتایج این تحقیق بصورت خلاصه اشاره می‌شود.



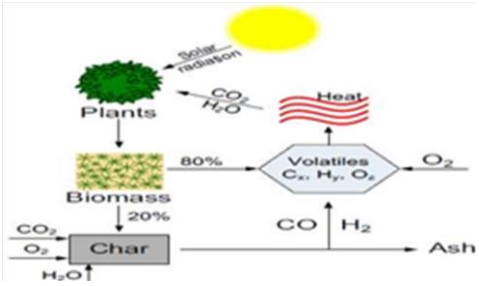
شکل ۱: شماتیک کوره بدون شعله [۳۰]

۲-۲- احتراق بدون شعله زیست‌توده

واژه زیست‌توده بر باقیمانده‌هایی از کودهای حیوانی و گیاهی دلالت دارد. انرژی خورشیدی که توسط گیاهان جذب شده و برای فرآیندهای فتوسنتزی استفاده می‌شود، انرژی زیست‌توده نامیده می‌شود و در گیاهان یا حیوانات و یا زائده‌ها ذخیره می‌شود. این انرژی را می‌توان بعنوان یک سوخت برای فرایندهای احتراق بازیافت کرد بطوریکه آن می‌تواند کمک فراوانی به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی داشته باشد [۳۱]. امروزه زیست‌توده حدود ۱۴٪ از مصرف کل انرژی جهانی را به خود اختصاص داده و از آن بعنوان چهارمین منبع انرژی در جهان یاد می‌شود [۳۲]. در احتراق زیست‌توده برای سوخت، استفاده از انواع مختلف مواد چوبی از قبیل پوست درخت، نوک شاخه‌ها، کاه، چوب زائد و مواردی از این دست رو به افزایش است [۳۶-۳۳]. احتراق زیست‌توده دارای مجموعه‌ای از واکنش‌های شیمیایی است که کربن را به دی اکسید کربن و هیدروژن را به آب اکسیده تبدیل می‌کند [۳۷]. شکل ۲، نمودار احتراق زیست‌توده در خط انحرافی چرخه‌ی کربن را نشان می‌دهد. قابلیت رسانایی گرمایی، قابلیت تشعشع که بسته به میزان رطوبت متغیر است، گرمای ویژه، دما در زمانی که تنزل گرمایی رخ می‌دهد، همگی ویژگی-هایی مهم در احتراق زیست‌توده هستند. البته علاوه بر این ویژگی‌ها، موارد دیگری هم هستند که به محیط احتراق بستگی دارند. در هنگام

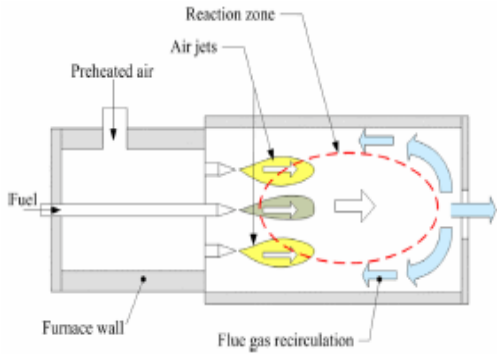
[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.1.9]

تنزل گرمایی طی احتراق زیست‌توده گازهایی چون دی اکسید کربن، مونواکسید کربن، رطوبت، هیدروژن، هیدروکربن‌ها و قیر تولید شده که میزان آن‌ها به دما و گرمای ناشی از واکنش شیمیایی بستگی دارد [۳۸].



شکل ۲: دیاگرام احتراق زیست‌توده در خط انحرافی چرخه‌ی کربن [۳۹]

احتراق زیست‌توده به فاکتورهایی از قبیل میزان جریان جرم توده، جریان جرم هوای احتراق برای احتراق کامل محصولات احتراق و دمای شعله بستگی دارد. در طول فرایند احتراق سنتی، زمانی اکسیژن برای سوختن سوخت موجود کافی است که شعله به شکل قابل توجهی مشتعل می‌شود. از طرفی احتراق زمانی رخ می‌دهد که گرمای کافی برای افزایش گازهای مشتعل نشده تا حد لازم وجود داشته باشد [۴۰]. بطور کلی، خصوصیات احتراق زیست‌توده بصورت میکروسکپی و ماکروسکوپی تقسیم‌بندی می‌شوند. بررسی‌های میکروسکپی شامل داده‌های معدنی، جنبشی، شیمیایی و گرمایی هستند. در حالیکه برای ویژگی‌های ماکروسکپی سوخت‌های زیست‌توده، می‌توان به حجم گرمایی، مقدار رطوبت، اندازه ذره، چگالی جرم و دمای آمیزش اشاره کرد. روش احتراق بدون شعله‌ی زیست‌توده با تشکیل دوباره درونی و بیرونی و مخلوطی بسیار بزرگ در محفظه‌ی احتراق توصیف می‌شود. بنابراین این تکنولوژی در یک حجم وسیع و با تشکیل نسبتا یکسان گونه‌های واکنش رخ می‌دهد. زیست‌توده در شرایطی شامل اکسیدکننده با درجه حرارت بالا و غلظت کم اکسیژن در محدوده‌ی واکنش محترق می‌شود. به همین دلیل احتراق با حجم بزرگی گسترش پیدا می‌کند، حداکثر دما کاهش می‌یابد، جریان گرما و راندمان حرارتی بیشتر شده و احتراق یکسان و پایدار می‌شود. برای طراحی مدل احتراق زیست‌توده می‌توان به طراحی شکل ۳، اشاره کرد. در این شکل مبانی اساسی تشکیل شعله احتراق بدون شعله نشان داده شده است [۴۱]. همچنین در این تصویر تشکیل دوباره‌ی گاز سوخت بر اساس انتشار ورودی که در آن هوا و سوخت در حالت غیر پیش‌آمیخته به شعله تزریق می‌شوند، مشاهده می‌شود. از طرفی می‌توان دید که احتراق در پایین جریان از نقطه‌ی تزریق رخ می‌دهد زیرا دمای پایین اوج شعله و غلظت کم اکسیژن در این ناحیه اتفاق می‌افتد. این شرایط در نهایت باعث کاهش انتشار NO_X و ایجاد شعله‌ی غیر قابل مشاهده می‌شود [۴۲-۴۵].



شکل ۳: کوره‌ی بدون شعله سنتی [۴۱]

۳- آلاینده‌ها

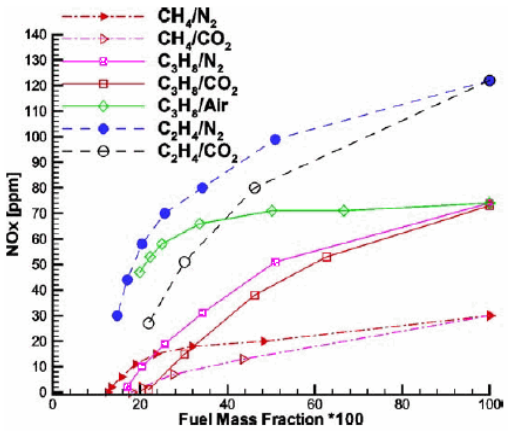
در حالت کلی در اثر احتراق آلاینده‌های مختلفی تشکیل می‌شود که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به دوده و گروه اکسیدهای نیتروژن اشاره کرد. گروه اکسیدهای نیتروژن دارای سه نوع مختلف است که شامل:

۱- NO_X حرارتی؛ که ساختار آن طبق اکسیداسیون مستقیم مولکول‌های نیتروژن بوده و واکنش تشکیل آن در دماهای بالا انجام می‌شود.

۲- NO_X سریع؛ ساختار آن در سیستم‌هایی که سوخت زیادی دارند و در محدوده شعله‌ای که حالت‌های هیدروژنی و نیتروژن اتمسفری در آن وجود دارد، تشکیل می‌شود.

۳- NO_X سوخت؛ که معمولا از سوخت‌های نیتروژنی مثل مایع و جامد معین تشکیل می‌شود و با اکسیداسیون نیتروژن موجود در سوخت شکل می گیرد.

در احتراق سوخت‌های گازی فقط دو نوع اول تشکیل می‌شود آن هم در حالی که فراوانی NO_X حرارتی از NO_X سریع بسیار بیش‌تر بوده بطوریکه می‌توان از NO_X سریع چشم‌پوشی کرد اما در احتراق زیست‌توده هر سه نوع گروه اکسیدهای نیتروژن تولید می‌شود [۳۹].



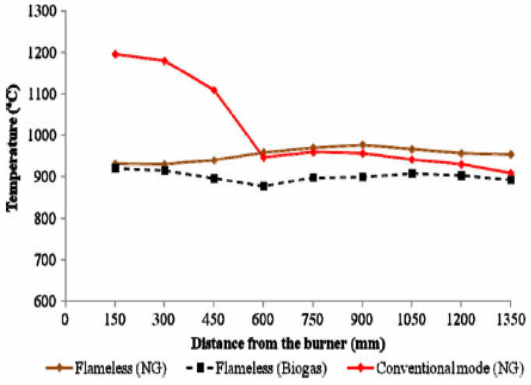
شکل ۴: میزان کسر جرمی NO_X در خروجی نسبت به کسر جرمی سوخت برای سوخت‌های متان، پروپان و اتیلن [۱۲]

۴- نتایج و بحث

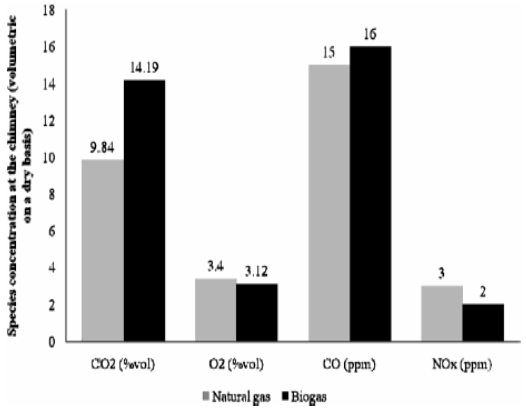
در شکل ۴، میزان انتشار NO_X نسبت به کسر جرمی سوخت‌های متان، پروپان و اتیلن به نمایش گذاشته شده است [۱۲]. هر کدام از این

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.1.9]

سوخت‌ها یک بار با N_2 و یک بار هم با CO_2 رقیق شده‌اند. همانگونه که در شکل مشخص است، میزان تشکیل اکسید نیتروژن در سوخت متان نسبت به سایر سوخت‌ها کم‌تر می‌باشد. همچنین در رقیق‌سازی سوخت بوسیله‌ی CO_2 نسبت به N_2 اکسید نیتروژن در همه‌ی سوخت‌ها به میزان کم‌تری تولید می‌شود. زیرا با توجه به وجود اتم کربن در CO_2، ترکیب آن با سوخت باعث اختلاط سریع و کامل سوخت و هوا شده و در پی آن احتراق بصورت پایدار و کامل تشکیل می‌شود. در اثر این احتراق کامل، توزیع دما بصورت حجمی و یکنواخت ایجاد و با حذف نقاط داغ و شعله از میزان NO_X کاسته می‌شود.

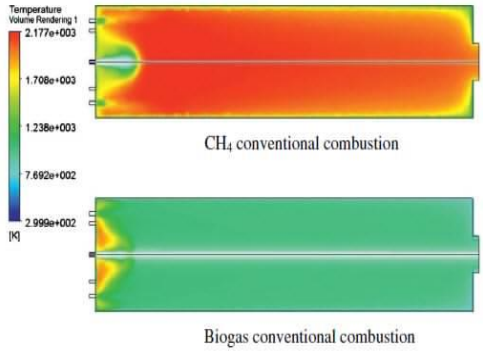


شکل۵: پروفیل دما در امتداد خط مرکزی محفظه‌ی احتراق [۱۳]

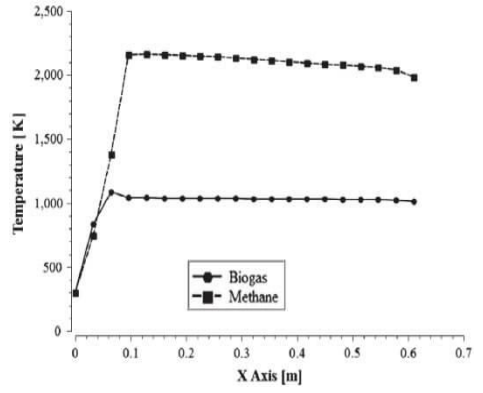


شکل ۶: غلظت آلاینده‌ها در کوره‌ی احتراق بدون شعله [۱۳]

شکل ۵، نشان‌دهنده‌ی میزان توزیع دما در طول خط مرکزی محفظه‌ی احتراق است [۱۳]. این شکل با مقایسه‌ی پروفیل‌های دما برای احتراق بدون شعله با سوخت بیوگاز و گاز طبیعی و همچنین احتراق سنتی گاز طبیعی نشان می‌دهد که، توزیع دما در احتراق بدون شعله بیوگاز نسبت به دو حالت دیگر در سطح پایین‌تری قرار دارد. از طرفی متوسط دمای محفظه‌ی احتراق برای سوخت گاز طبیعی ۹۵۳ و برای بیوگاز ۹۰۷ درجه‌ی سانتی‌گراد توسط کلورادو و همکاران بدست آمد. که این نتایج نشان از کاهش ۴/۸ درصدی دمای احتراق بدون شعله بیوگاز نسبت به گاز طبیعی است. میانگین غلظت آلاینده‌ها نیز در شکل ۶، به نمایش گذاشته شده است [۱۳]. این نتایج نشان می‌دهد که برای رژیم بدون شعله در محیط محفظه، ترکیب متان با گازهایی از قبیل CO_2 تاثیر ناچیزی بر انتشار آلاینده‌ها دارد. در برخی موارد برای رسیدن به حالت بدون شعله به کوره حرارت داده می‌شود تا در ابتدا دمای داخل محفظه بیش‌تر از دمای احتراق خودکار بیوگاز بدست آید. در شکل۷، ابتدا توزیع دما در احتراق معمولی CH_4 و بیوگاز نشان داده شده و سپس تغییر دما روی خط مرکزی کوره‌ی سوخت‌گیری شده با CH_4 و بیوگاز در شکل ۸ ارائه داده شده است [۳۰]. این دو شکل تایید می‌کنند که بیوگاز عملا برای فرایند با حرارت بالا مناسب نیست. بعبارت دیگر احتراق سنتی بیوگاز نمی‌تواند دمای بالا در داخل کوره تولید کند بنابراین برای رسیدن به حالت بدون شعله، کوره باید با یک سوخت با ارزش حرارتی بالا مانند CH_4 حرارت داده شود. البته راه دیگری نیز وجود دارد که بتوان این مشکل را بر طرف کرد و آن اضافه کردن هوای پیش‌گرم است. با توجه به آنتالپی بالای هوای پیش‌گرم میانگین دمای احتراق سنتی افزایش یافته و باعث کاهش چشم‌گیر مصرف سوخت می‌شود. شکل ۹، تاثیر دمای هوای پیش‌گرم روی مصرف سوخت در احتراق سنتی را نشان می‌دهد [۳۰]. اگر چه افزایش دمای هوای پیش‌گرم در احتراق معمولی باعث کاهش مصرف سوخت می‌شود اما با توجه به این که باعث افزایش حداکثر دمای کوره و در پی آن افزایش تشکیل NO_X می‌شود، باید یک مدل مناسب‌تر را جایگزین آن کرد. شکل ۱۰، تغییر حداکثر دمای داخل کوره و همچنین تشکیل NO_X در احتراق سنتی با هوای پیش‌گرم را نمایش داده است [۳۰]. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که احتراق سنتی پیش-گرم با سوخت بیوگاز نمی‌تواند دمای داخل کوره را به شکل قابل توجهی افزایش دهد، اما باز هم تشکیل NO_X حتی به اندازه کم افزایش می‌یابد و این موضوع نشان دهنده عدم حصول مدلی ایده‌آل جهت احتراق است.

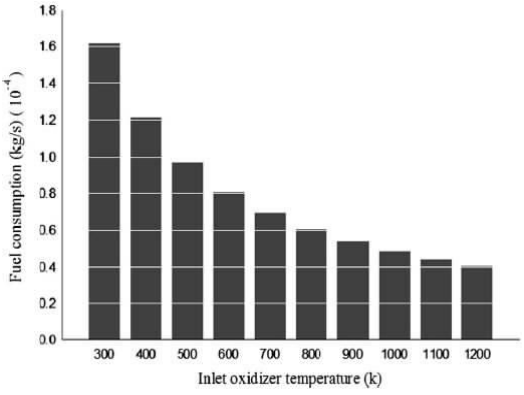


شکل ۷: توزیع دما در احتراق سنتی CH_4 و بیوگاز [۳۰]



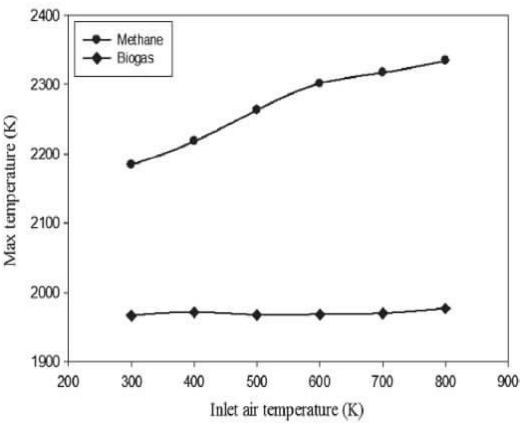
شکل ۸: تغییر دما روی خط مرکزی کوره [۳۰]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.1.9]

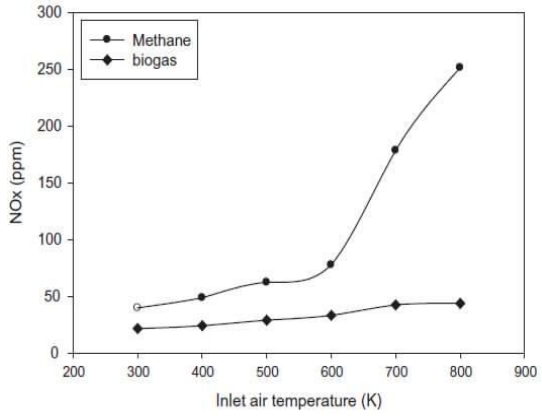


شکل ۹: اثر دمای هوای پیش‌گرم بر مصرف سوخت در احتراق سنتی [۳۰]

شکل ۱۱، توزیع دمای محوری در رژیم بدون شعله و سنتی را ارائه داده است [۳۰]. در احتراق بدون شعله بیوگاز نسبت به احتراق سنتی متان دما پایین‌تر بوده و با توجه به ساختار تشکیل NO_X، انتشار آن کاهش قبل توجهی داشته است. از طرفی بر اساس رابطه‌ی ریاضی نرخ دمای یکنواخت تعریف شده توسط یانگ و همکاران [۴۶]، نرخ یکنواختی در کوره‌ی بدون شعله حدود صفر بدست آمده است [۳۰] که این وضعیت نتنها باعث افزایش جرم نسوز داخل محفظه می‌شود بلکه شرایط را نیز برای کاهش تشکیل NO_X فراهم می‌کند. شکل ۱۲، غلظت CH_4 و CO_2 را در امتداد محور مرکزی محفظه‌ی احتراق نشان می‌دهد [۳۰]. از آنجا که نسبت ۶۰٪ CH_4 و ۴۰٪ CO_2 توسط حسینی و همکاران [۳۰] در بیوگاز استفاده شده غلظت این گونه‌ها در ورودی بالا بوده اما در ادامه کاهش شدیدی پیدا می‌کند. شکل ۱۳، غلظت O_2 و CO را در محور مرکزی محفظه‌ی احتراق نمایش می‌دهد [۳۰]. این شکل تایید می‌کند که غلظت CO در امتداد کوره بسیار کم است و این موضوع به اکسید-کننده‌ی رقیق و اختلاط کامل و سریع در روش بدون شعله نسبت داده می‌شود.

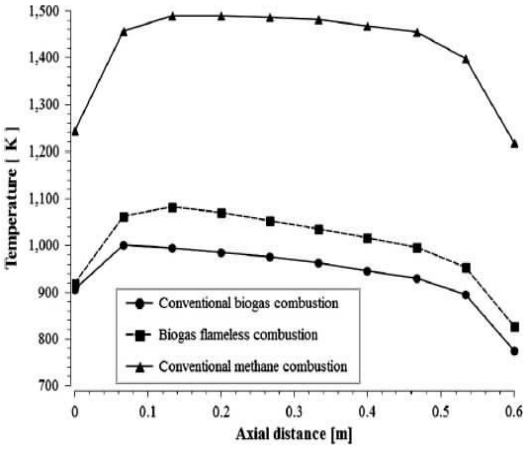


الف



ب

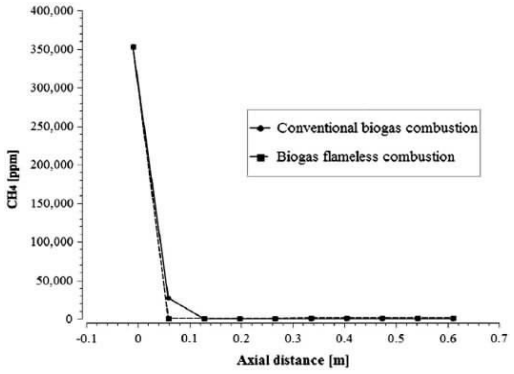
شکل۱۰: الف) تغییر پیک دما در احتراق سنتی پیش‌گرم ب) انتشار NO_X در احتراق سنتی پیش‌گرم [۳۰]



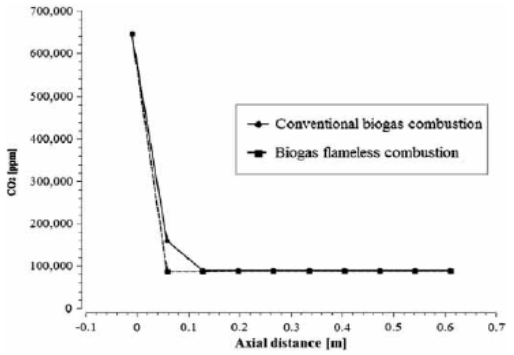
شکل ۱۱: توزیع دمای محوری [۳۰]

دمای یکسان داخل محفظه‌ی احتراق بدون شعله که بالاتر از دمای بیوگاز خود اشتعال است، وضعیت پایدار برای تشکیل رژیم بدون شعله بیوگاز را تضمین می‌کند. شکل ۱۴، میزان غلظت آلاینده‌ها با افزایش نسبت هیدروژن در سوخت متان احتراق بدون شعله با هوای پیش‌گرم را ارائه داده است [۴۷]. همانطور که مشاهده می‌شود غلظت CO هنگام اضافه شدن H_2 در CH_4 به مقدار کمی بیش‌تر می‌شود اما هیچ‌گاه بالاتر از ۱۰ پی‌پی‌ام قرار نمی‌گیرد، در حالی که از هیدروژن ۷۰٪ در سوخت، به بعد غلظت CO کاهش یافته و به نزدیکی صفر می رسد. از سوی دیگر برای نسبت‌های کم هیدروژن تا نسبت ۵۰٪ در سوخت، غلظت NO و NO_X تغییرات خیلی کمی دارند و مقدار آن‌ها به ترتیب حدود ۳۰ و ۴۰ پی‌پی-ام ثابت باقی می‌ماند اما با افزایش نسبت هیدروژن از ۵۰٪ به بالا تدریجا آن‌ها کاهش یافته و مقدار آن‌ها به پایین‌تر از ۲۰ و ۲۷ پی‌پی‌ام نزول پیدا می‌کند.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.1.9]

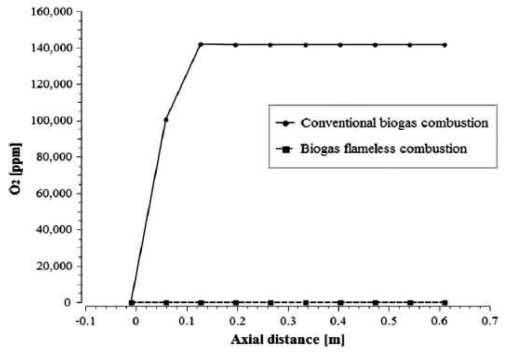


الف

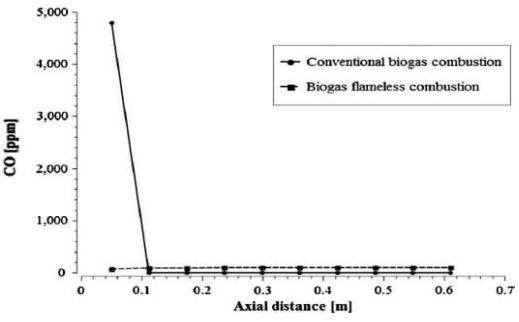


ب

شکل ۱۲: غلظت الف) CH_4 و ب) CO_2 در طول محور مرکزی محفظه احتراق [۳۰]



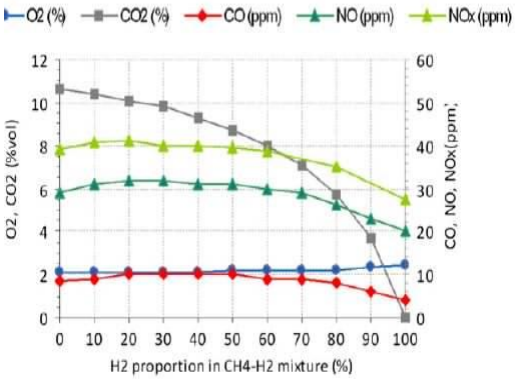
الف



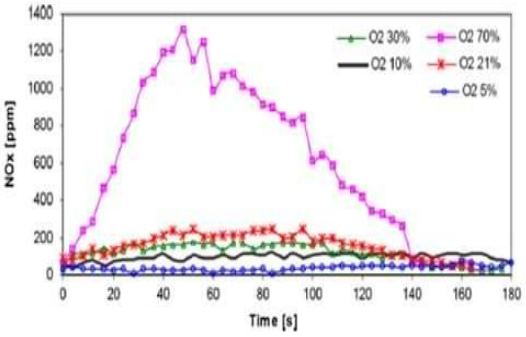
ب

شکل ۱۳: غلظت الف) اکسیژن و ب) کربن منوکسید در طول محور مرکزی کوره [۳۰]

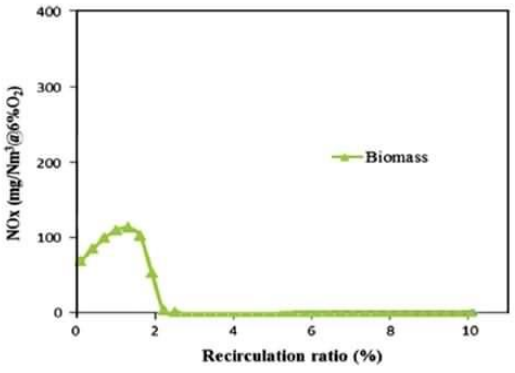
ساختار تشکیل NO_X در احتراق بدون شعله که از قرص‌های چوب بعنوان سوخت در آن استفاده شده است، توسط رامونا و همکاران بررسی شده است [۴۸]. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که سطح تشکیل NO_X با غلظت اکسیژن در هوا و دمای احتراق متناسب است. شکل ۱۵، انتشار NO_X را در زمان (S) و دمای احتراق ۸۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد برای غلظت‌های مختلف اکسیژن نشان می‌دهد [۴۸]. با توجه به شکل می‌توان دریافت که بیشترین مقدار تشکیل NO_X برای غلظت ۷۰٪ اکسیژن بدست آمده است. شکل ۱۶، نیز اثر برگشت‌پذیری بر انتشار NO_X در احتراق بدون شعله زیست‌توده را ارائه داده است [۴۹]. همانطور که در شکل مشهود است با افزایش نرخ برگشت‌پذیری سوخت، بعد از افزایش در نرخ برگشت‌پذیری اولیه تشکیل NO_X کاهش می‌یابد.



شکل ۱۴: میزان غلظت آلاینده‌ها در نسبت‌های مختلف هیدروژن در مخلوط سوخت احتراق بدون شعله با هوای پیش‌گرم [۴۷]



شکل ۱۵: انتشار NO_X با زمان در غلظت‌های متفاوت اکسیژن در ۸۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد [۴۸]



شکل ۱۶: تاثیر نرخ برگشت‌پذیری روی انتشار NO_X در احتراق بدون شعله زیست‌توده [۴۹]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.1.9]

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مروری بر ویژگی‌ها و خصوصیات احتراق بدون شعله با سوخت‌های گازی مختلف (از جمله بیوگاز، متان و مخلوط متان / هیدروژن) و همچنین با سوخت زیست‌توده انجام شد. با بررسی اثر دمای پیش‌گرم در احتراق سنتی بیوگاز بر میزان تشکیل آلاینده‌ها مشخص شد، با وجودی که مصرف سوخت در این احتراق کاهش یافته اما انتشار آلاینده‌ی NO_X افزایش پیدا کرده است در حالی که همین بررسی در احتراق بدون شعله بیوگاز با کاهش NO_X همراه بود. کاهش تشکیل NO_X در احتراق بدون شعله به نقاط داغ و سطح پایین اکسیژن مربوط می‌شود. از سوی دیگر دمای احتراق بدون شعله پایین‌تر از احتراق سنتی است و عملکرد احتراق بدون شعله در افزایش بازدهی سیستم موثر است. همچنین تاثیر اضافه کردن هیدروژن در سوخت احتراق بدون شعله متان بررسی شد. در این بررسی مشخص شد که با افزایش تزریق هیدروژن به سوخت، از غلظت NO_X کم می‌شود که این کاهش با توجه به غلظت گونه‌ی کربن در سوخت اتفاق می‌افتد. با افزایش هیدروژن در سوخت، اتم کربن موجود در سوخت شکسته شده و در نتیجه از مقدار آن کم می‌شود. در طی فرآیند احتراق بدون شعله‌ی زیست‌توده نیز تشکیل NO_X با کاهش همراه است که علت این امر به کاسته شدن حداکثر دما در محفظه‌ی احتراق مربوط می‌شود. از طرفی کاهش پیک دما نیز با توجه به هوای پیش‌گرم و غلظت کم اکسیژن در طول احتراق زیست‌توده اتفاق می‌افتد.

مراجع

[1] S. E. Hosseini, M. A. Wahid, Pollutant in palm oil production process, J Air Waste Manage Assoc, http://dx.doi.org/10.1080/10962247.2013.873092, (2013)

[2] R. Saidur, J. U. Ahamed, H. H. Masjuki, Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers, Energy Policy, 38 (2010) 2188–97.

[3] S. E. Hosseini, A. M. Andwari, M. A. Wahid, G. Bagheri, A review on green energypotentials in Iran, Renew Sustain Energy Rev, 27 (2013) 533–45.

[4] A. G. Kaviri, M. N. M. Jaafar, T. M. Lazim, Modeling and multi-objective exergy based optimization of a combined cycle power plant using a genetic algorithm, Energy Convers Manage, 58 (2012) 94–103.

[5] A. G. Kaviri, M. N. M Jaafar, T. M. Lazim, H. Barzegaravval, Exergoenvironmental optimization of Heat Recovery Steam Generators in combined cycle power plant through energy and exergy analysis, Energy Convers Manage, 67 (2013) 27–33.

[6] M. L. G. Reno, F. M. Torres, R. J. da Silva, J. J. C. S. Santos, M. Melo, L. N. M. de, Exergy analyses in cement production applying waste fuel and mineralizer, Energy Convers Manage, 75 (2013) 98–104.

[7] O. Kas_ka, Energy and exergy analysis of an organic Rankine for power generation from waste heat recovery in steel industry, Energy Convers Manage, 77 (2014) 108–17.

[8] I. B. Ozdemir, N. Peters, Characteristics of the reaction zone in a combustoroperating at mild combustion, Exp Fluids, 30 (2001) 683–95.

[9] V. Arghode, A. Gupta, Development of high intensity CDC combustor for gas turbine engines, Appl Energy, (2011).

[10] M. Katsuki, T. Hasegawa, The science and technology of combustion in highly preheated air, Symp Combust, 27 (1998) 3135–46.

[11] J. A. Wunning, J. G. Wunning, Flameless oxidation to reduce thermal noformation, Prog Energy Combust Sci, 23 (1997) 81–94.

[12] B. Dally Bassam, E. Riesmeier, N. Peters, Effect of fuel mixture on moderate and intense low oxygen dilution combustion, Combust Flame, 137(4) (2004) 418–31.

[13] A. F. Colorado, B. A. Herrera, A. A. Amell, Performance of a flameless combustion furnace using biogas and natural gas, Bioresour Technol, 101 (2010) 2443–9.

[14] R. Weber, S. Orsino, N. Lallemant, A. D. Verlaan, Combustion of natural gas with high-temperature air and large quantities of flue gas, Proc Combust Inst, 28(1) (2000) 1315–21.

[15] M. Mancini, R. Weber, U. Bollettini, Predicting NOx emissions of a burner operated in flameless oxidation mode, Proc Combust Inst, 29(1) (2002) 1155–63.

[16] S. Orsino, R. Weber, U. Bollettini, Numerical simulation of combustion of natural gas with high-temperature air, Combust Sci Technol, 170(1) (2001) 1–34.

[17] A. Khoshhal, M. Rahimi, A. A. Alsairafi, CFD study on influence of fuel temperature on NOx emission in a HiTAC furnace, Int Commun Heat Mass Transfer, 38(10) (2011) 1421–7.

[18] S. E. Hosseini, M. A. Wahid, A. A. A. Abuelnuor, High temperature air combustion: sustainable technology to low Nox formation, Int Rev Mech Eng, 6(5) (2012) 947–53.

[19] T. Suda, M. Takafuji, T. Hirata, M. Yoshino, J. Sato, A study of combustion behavior of pulverized coal in high-temperature air, Proc Combust Inst, 29 (2002) 503–9.

[20] H. Zhang, G. Yue, J. Lu, Z. Jia, J. Mao, Development of high temperature air combustion technology in pulverized fossil fuel fired boilers, Proceedings of the Combustion Institute, 31 (2007) 2779–85.

[21] B. Dally, S. Shim, R. Craig, On the burning of sawdust in a MILD combustion furnace, Energy Fuels, 24 (2010) 3462–70.

[22] A. Rebola, P. J. Coelho, M. Costa, Assessment of the performance of several turbulence and combustion models in the numerical simulation of a flameless combustor, Combust Sci Technol, 185(4) (2013) 600–26.

[23] A. Demirbas, Waste management, waste resource facilities and waste conversion processes, Energy Convers Manage, 52(2) (2011) 1280–7.

[24] C. Grisel, P. Umapada, B. Fortino, R. Minerva, Generation of biogas from coffee-pulp and cow-dung co-digestion: infrared studies of postcombustion emissions, Energy Convers Manage, 74 (2013) 471–81.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.1.9]

[25] S. Rasi, J. Läntelä, J. Rintala, Trace compounds affecting biogas energy utilization – a review, Energy Convers Manage, 52(12) (2011) 3369–75.

[26] E. S. Hosseini, M. A. Wahid, Feasibility study of biogas production and utilization as a source of renewable energy in Malaysia, Renew Sustain Energy Rev, 19 (2013) 454–62.

[27] D. House, The complete biogas handbook, Alternative House Information, (2010).

[28] I. D. Bedoya, S. Saxena, F. J. Cadavid, R. W. Dibble, M. Wissink, Experimental study of biogas combustion in an HCCI engine for power generation with high indicated efficiency and ultra-low NOx emissions, Energy Convers Manage, 53(1) (2012) 154–62.

[29] C. C. Cormos, Evaluation of power generation schemes based on hydrogen-fuelled combined cycle with carbon capture and storage (CCS), Int J Hydrogen Energy, 36 (2011) 3726e38.

[30] E. S. Hosseini, G. h. Bagheri, M. A. Wahid, Numerical investigation of biogas flameless combustion, Energy Conversion and Management, 81 (2014) 41–50.

[31] R. Saidur, E. A. Abdelaziz, A. Demirbas, M. S. Hossain, S. Mekhilef, A review on biomass as a fuel for boilers, Renew Sustain Energy Rev, 15 (2011) 2262–89.

[32] A. Demirbas, Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues, Prog Energy Combust Sci, 31 (2005) 171–92.

[33] W. Deraedt, R. Ceulemans, Clonal variability in biomass production and conversion efficiency of poplar during the establishment year of a short rotation coppice plantation, Biomass Bioenergy, 15 (1998) 391–8.

[34] G. Fischer, S. Prieler, H. van Velthuizen, Biomass potentials of miscanthus, willow and poplar: results and policy implications for Eastern Europe, Northern and Central Asia, Biomass Bioenergy, 28 (2005) 119–32.

[35] M. Šyc, M. Pohořelý, P. Kameníková, J. Habart, K. Svoboda, M. Punčochář, Willow trees from heavy metals phytoextraction as energy crops, Biomass Bioenergy, 37 (2012) 106–13.

[36] B. Đerčan, T. Lukić, M. Bubalo-Živković, B. Đurđev, R. Stojsavljević, M. Pantelić, Possibility of efficient utilization of wood waste as a renewable energy resource in Serbia, Renew Sustain Energy Rev, 16 (2012) 1516–27.

[37] J. L. Míguez, J. C. Morán, E. Granada, J. Porteiro, Review of technology in small-scale biomass combustion systems in the European market, Renew Sustain Energy Rev, 16 (2012) 3867–75.

[38] S.E. Hosseini, S. Salehirad, M. A. Wahid, M. M. Sies, A. Saat, Effect of diluted and preheated oxidizer on the emission of methane flameless combustion, Proceesings of the 4th international meeting on advances in Thermofluids (IMAT 2011), AIP Publishing, 1440 (2012) 1309–12.

[39] A. A. A. Abuelnuor, M. A. Wahid, S. E. Hosseini, A. Saat, M. Khalid Saqr, H. Hani Sait, M. Osman, Characteristics of biomass in flameless combustion: A review.

[40] T. Nussbaumer, Combustion and co-combustion of biomass: fundamentals, technologies, and primary measures for emission reduction, Energy Fuels, 17 (2003) 1510–21.

[41] Y. Wang, D. McIlveen-Wright, Y. Huang, The application of FLOX/COSTAIR technologies to reduce NOx emissions from coal/biomass fired power plant: a technical assessment based on computational, Fuel, 86 (2007) 2101–8.

[42] A. Gupta, Clean energy conversion from waste fuels using high temperature air combustion technology, Asian J Energy Environ, (2004).

[43] T. Suda, M. Takafuji, T. Hirata, M. Yoshino, J. Sato, A study of combustion behavior of pulverized coal in high-temperature air, Proc Combust Inst, 29 (2002) 503–9.

[44] A. A. A. Abuelnuor, M. A. Wahid, A. Saat, M. M. Sies, M. K. Elbasheer, S. E. Hosseini, Review of numerical studies on NOx emission in the flameless combustion, Appl Mech Mater, 388 (2013) 235–40.

[45] S. E. Hosseini, M. A. Wahid, High Temperature AA. Air Combustion: sustainable technology to low NOx formation, Int Rev Mech Eng, 5 (2012) 947–53.

[46] Y. Weihong, B. Wlodzimierz, CFD as applied to high temperature air combustion in industries furnaces, IRFR Combust J, (2006).

[47] M. Ayoub, C. Rottier, S. Carpentier, C. Villermaux, A.M. Boukhalfa, D. Honore´, An experimental study of mild flameless combustion of methane/hydrogen mixtures.

[48] D. Ramona, Wood pellets combustion with rich and diluted air in HTAC furnace, (2006).

[49] Y. Wang, D. McIlveen-Wright, Y. Huang, The application of FLOX/COSTAIR technologies to reduce NOx emissions from coal/biomass fired power plant: a technical assessment based on computational, Fuel, 86(2007) 2101–8.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1396.4.2.1.9]