

اثر زاویه انژکتور سوخت در احتراق HiTAC

مصطفی الطافی^{۱*}، سید کامبیز عبدالله^۲، صادق تابع جماعت^۳

آزمایشگاه سوخت و احتراق دانشگاه صنعتی امیر کبیر

(* mostafaaltafi@gmail.com)

چکیده

احتراق با هوای دما بالا (HiTAC) از نوع غیر پیش مخلوط می باشد و پدیده ی اختلاط نقش تعیین کننده ای در آن دارد. در تحقیق حاضر تغییرات زاویه ی پاشش سوخت که بر روی اختلاط موثر است، مورد بررسی قرار گرفت. انژکتور های سوخت دارای زوایای ۰ و ۴۵ درجه با راستای هوا می باشند. نظر به این که سرعت و دمای هوا با فاصله گرفتن از خروجی هوا کاهش می یابد، تغییر زاویه انژکتور تاثیر مستقیمی بر کیفیت اختلاط، دمای ماکسیمم شعله و تولید NO_x دارد. اگر از انژکتور با زاویه ۰ درجه استفاده شود، سوخت و هوا در فاصله دورتری از خروجی هوا، نسبت به انژکتور با زاویه ۴۵ درجه، با هم مخلوط می شوند. نتایج آزمایشات نشان می دهد که زاویه ی پاشش تاثیر مستقیمی بر دمای شعله، میزان تولید آلاینده ها و شار حرارتی دارد. هر قدر راستای جریان هوا و گاز به سمت موازی شدن (زاویه ی صفر درجه) پیش برود، شار حرارتی جذب شده بیشتر می شود و به دلیل کاهش دمای ماکسیمم شعله تولید آلاینده ی NO_x نیز کاهش می یابد و در نهایت می توان با کاهش شدت اختلاط سوخت و هوا و به تعویق انداختن آن می توان به احتراق بدون شعله رسید. یکی از پارامتر های اختلاط زاویه ی پاشش است که در این آزمایشات مورد بررسی قرار گرفت. دو پارامتر دیگر سرعت تزریق هوا و سوخت و همچنین فاصله ی انژکتور سوخت از هوا می باشد. در طول آزمایشات و تزریق در زوایای صفر و با ۴۵ درجه کاهش میزان آلاینده ی اکسید های نیتروژن مشاهده شد. علت این پدیده فرایند بازسوزی می باشد.

واژه های کلیدی: HiTAC - زاویه انژکتور - اختلاط - کوره - NO_x

۱- مقدمه

افزایش شدید مصرف انرژی در سال های اخیر و در نتیجه انتشار بیش از حد گازهای گلخانه ای مثل دی اکسید کربن و اکسید های نیتروژن در جو، کشورهای جهان را بر این داشت که در پی یافتن راهی برای جلوگیری از پدیده ی گرم شدن زمین باشند. در نتیجه ی این تلاش ها پیمان کیوتو در سال ۱۹۹۷ به تصویب رسید. بنا بر این پیمان کشورهای صنعتی موظف شدند انتشار گازهای گلخانه ای خود را تا سال ۲۰۱۲، به میزان حداقل ۵٪ کمتر از مقدار آن در سال ۱۹۹۰ برسانند. بحران نفت نیز در سال های ۱۹۷۳ و ۱۹۷۹، باعث شد تحقیقات زیادی در رابطه با کاهش مصرف سوخت و همچنین استفاده از سوخت هایی مثل الکل و یا سوخت هایی با ارزش حرارتی پایین، که پیش از این به عنوان سوخت اصلی مورد استفاده قرار نمی گرفتند، انجام شود. احتراق مخلوط های بسیار فقیر نیز در این سال ها بیش تر مورد بررسی قرار گرفت. این گونه مخلوط ها در فشار و دمای عادی محترق نمی شوند و باید شرایطی را فراهم کرد که به واکنش ها شتاب داده شود. به

۱- کارشناس ارشد دانشگاه صنعتی امیر کبیر

۲- کارشناس ارشد دانشگاه صنعتی امیر کبیر

۳- دانشیار دانشگاه صنعتی امیر کبیر

عنوان مثال می توان از اکسیداسیون به کمک کاتالیست، تزریق ذرات فعال مثل رادیکال های پر انرژی، افزایش فشار و یا پیش گرم کردن استفاده کرد.

با پیش گرم کردن هوا و افزایش آنتالپی مخلوط بسیار فقیر، حدود اشتعال پذیری آن افزایش پیدا می کند و می توان به احتراقی پایدار رسید [۱]. به عبارت دیگر مخلوط های بسیار فقیر که در دمای محیط قابل اشتعال نیستند را می توان با پیش گرم کردن مشتعل کرد. گاز های خروجی از سیستم تهویه ی معادن زغال سنگ و همین طور بسیاری از صنایع شیمیایی، نمونه هایی از مخلوط هایی بسیار فقیر می باشند.

احتراق با هوای دما بالا (HiTAC) نتیجه ی توسعه ی بازیاب های انرژی است که مدت ها پیش از این برای افزایش راندمان و پایداری احتراق استفاده می شده است. استفاده از این فناوری در کوره ها می تواند مصرف سوخت را حدود ۵۰٪ و آلودگی را حدود ۳۰٪ کاهش دهد، بدون این که اثر منفی بر روی کارایی کوره داشته باشد و امروزه به عنوان راه حلی مناسب برای کاهش آلودگی هوا و درعین حال کاهش مصرف سوخت در صنایع در نظر گرفته می شود [۲]. با به کارگیری فناوری HiTAC در صنایعی که از دمای بالا بهره می گیرند می توان به کاهش آلاینده ها، بهبود فرایند احتراق، یکنواختی پروفیل دما، ارتقا کیفیت محصول کوره و افزایش انتقال حرارت دست پیدا کرد.

ویژگی اصلی این نوع احتراق گسترش آن در حجم وسیعی از کوره و پایداری آن در غلظت های پایین اکسیژن می باشد و گاهی به همین دلیل به آن احتراق حجمی و یا بدون شعله می گویند. یکی از راه هایی که درصنعت برای رسیدن به HiTAC استفاده می شود، تزریق مستقیم سوخت و هوا به داخل کوره توسط نازل های جداگانه است. سرعت بالای جریان هوا و فاصله ی نازل سوخت از هوا باعث می شود تا فرایند اختلاط سوخت، هوا و محصولات احتراق به آرامی انجام شود و در نتیجه غلظت اکسیژن به صورت موضعی کاهش یابد. در نهایت این فرایند منجر به کاهش دمای ماکزیمم شعله و کاهش تولید NO_x می گردد، چون یکی از مکانیسم های اصلی تولید NO_x وابسته به دمای بالا می باشد. یکی دیگر از مزایای کاهش دمای ماکسیمم شعله افزایش عمر نسوز داخل کوره و به تاخیر افتادن زمان تعمیرات دوره ای داخل آن می باشد. فناوری احتراق با هوای دما بالا در توربین ها معمولاً با نام احتراق بی رنگ پخش (colorless distributed combustion) شناخته می شود [۳]. کاربرد این فناوری در توربین ها نه تنها باعث کاهش مصرف سوخت و آلودگی می شود، بلکه کاهش تولید صدا در فرایند احتراق و همین طور کاهش زمان تاخیر جرقه زنی را نیز در پی دارد.

سیستم آزمایشگاهی

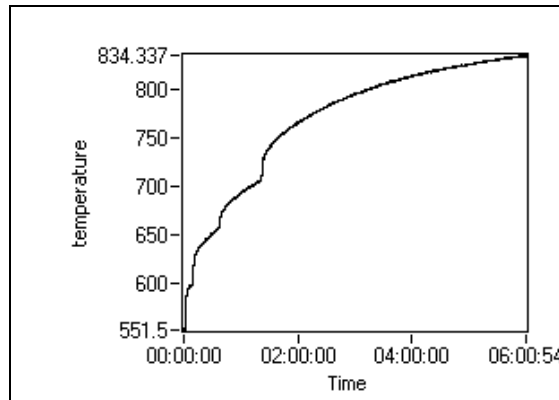
به منظور بررسی پدیده ی احتراق HiTAC لازم است دمای هوا به حد خود اشتعالی سوخت برسد و همزمان میزان اکسیژن هوا نیز باید کاهش یابد. در تحقیقات آزمایشگاهی می توان با استفاده از گرم کن های برقی و رقیق سازی هوا با نیتروژن، دی اکسید کربن و یا سایر گازهای بی اثر این نوع احتراق را بوجود آورد. روش دیگر استفاده از محصولات احتراق می باشد که همزمان دمای آن بسیار بالا و غلظت اکسیژن موجود در آن کم است.

در آزمایشگاه سوخت و احتراق دانشگاه صنعتی امیر کبیر برای دستیابی به این دو هدف از یک کوره ی پیش گرم استفاده شد. محصولات احتراق از کوره ی اول توسط لوله ای که درون آن عایق کاری از جنس جرم نسوز شده است، به کوره ی دوم منتقل می شود. قطر لوله ی خروجی هوا ۱۱ سانتی متر می باشد. در کوره ی دوم مجدداً به هوای گرم شده (بالاتر از ۸۰۰ درجه) و کم اکسیژن کوره ی اول سوخت تزریق می گردد و شعله بدون استفاده از جرقه زن تشکیل می شود. در کوره ی دوم قابلیت عکس برداری از بالای شعله، اندازه گیری همزمان دما، شار حرارتی و آلاینده های حاصل از احتراق وجود دارد. دما با استفاده از ترموکوپل های نوع B و R که متصل به کارت های داده بردار آنالوگ به دیجیتال شرکت Advantech می باشند، ثبت می شود. آلاینده های CO ، CO_2 ، NO ، NO_2 ، غلظت اکسیژن و هیدروکربن های نسوخته نیز توسط آنالیزور گاز testo350 XL اندازه گیری می گردد. در شکل ۱ تصویر کلی سیستم آزمایشگاهی نشان داده شده است. در بخش سمت چپ این شکل کوره ی پیش گرم و در سمت راست کوره ی اصلی دیده می شود.



شکل ۱- نمای کلی کوره ی اصلی و کوره ی پیش گرم

همان طور که پیش از این گفته شد، به منظور بررسی شعله ی HiTAC، از محصولات احتراق کوره ی پیش گرم استفاده می شود و آزمایشات زمانی شروع می گردد که این کوره به حالت پایدار رسیده باشد. معیار پایداری کوره پیش گرم، ثابت شدن دمای محصولات احتراق آن در کوره ی دوم می باشد. در شکل ۲ فرایند پایداری شدن کوره ی پیش گرم مشاهده می شود. در این شکل دمای ثبت شده توسط ترموکوپل نوع R که دقیقاً در ورودی کوره ی دوم و در مرکز جریان هوای داغ قرار دارد، نشان داده شده است. نقاطی که در آن دما به صورت ناگهانی افزایش پیدا کرده است، زمان افزایش دبی گاز در کوره ی پیش گرم می باشد. علت این که شروع این نمودار دمای ۵۵۱ را نشان می دهد این است که برای کاهش زمان تست و کاهش مصرف گاز، کوره در روز قبل در دمای ۶۰۰ درجه خاموش شده است.



شکل ۲- نمودار دما () بر حسب زمان (hr:min:sec) ترموکوپل نصب شده در ابتدای کوره دوم

علاوه بر ترموکوپلی که در ابتدای کوره ی دوم نصب شده، پنج ترموکوپل دیگر نیز در فاصله های ۱۲، ۴۳، ۶۹، ۹۶ و ۱۲۰ سانتی متری از ابتدای کوره قرار داده شده است.

آنالیزور گاز نیز که در خروجی کوره ی دوم نصب شده است، میزان آلاینده های تولید شده در کوره ی اول را در زمان پایداری اندازه می گیرد. با توجه به این که فشار در داخل کوره ی دوم بخاطر اثر دودکش (chimney effect) به مقدار بسیار کمی منفی می باشد، این احتمال وجود دارد که هوا از درزها به داخل کوره نفوذ کند. برای رفع این مشکل ابتدا با آنالیزور گاز درصد اکسیژن را در ورودی کوره ی دوم اندازه گرفته می شود. سپس با تغییر محل آنالیزور، درصد اکسیژن در خروجی کوره ی دوم ثبت می گردد. با مقایسه ی این دو مقدار، در صورتی که درصد اکسیژن خروجی بیشتر از ابتدای کوره باشد (بیش از ۱٪)، نشان دهنده ی فشار منفی زیاد در داخل کوره است. در این حالت شیر پروانه ای که در مسیر دودکش قرار دارد، بسته تر می شود تا فشار داخل کوره مثبت تر گردد و هوای محیط آزمایشگاه به داخل کوره نشت پیدا نکند. بدین ترتیب با ثبت داده های ۶ ترموکوپل و همین طور آنالیزور گاز می توان آزمایشات اصلی را شروع کرد. مشخصات هوای ورودی به کوره ی دوم در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات هوای ورودی به کوره ی دوم

O ₂ %	CO (ppm)	CO ₂ %	NO (ppm)	NO ₂ (ppm)	NO _x (ppm)	T ()
9.56	0	6.48	55	6.4	61	834

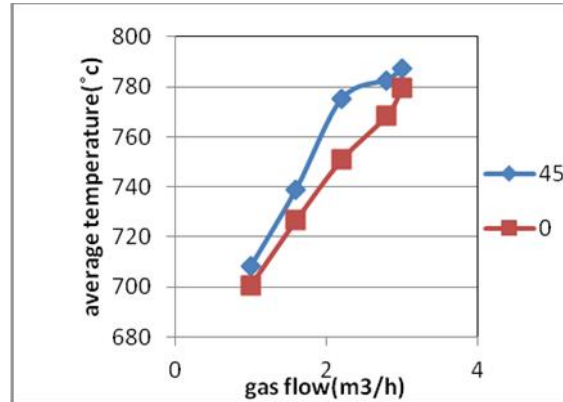
پس از پایداری کوره ی پیش گرم، در کوره ی دوم گاز شهری به وسیله ی انژکتوری که قطر داخلی آن ۶ میلی متر است تزریق می شود. در این تحقیق زوایای پاشش ۰ و ۴۵ درجه مورد بررسی قرار گرفته و تغییرات پارامترهای احتراقی در دبی های ۱ تا ۳.۲ متر مکعب بر ساعت بررسی شده است.

نتایج آزمایشات

با تزریق گاز در کوره ی دوم، علی رغم افزایش دما (شکل ۲) همواره با کاهش میزان NO_x (شکل ۳) مواجه هستیم. این فرایند تحت عنوان بازسوزی (reburning) شناخته می شود.

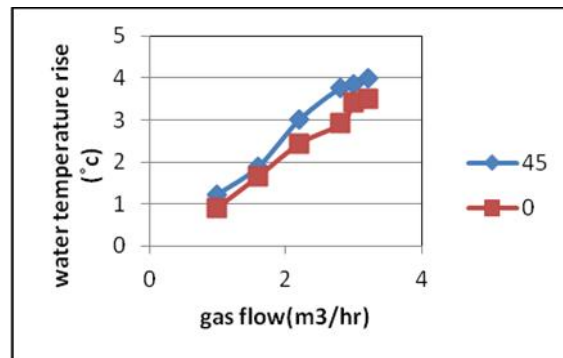
همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود در تمام دبی ها، دمای میانگین تزریق با زاویه ۴۵ درجه از دمای میانگین تزریق با زاویه صفر درجه بیشتر است. در هنگام تزریق با زاویه ۴۵ درجه جریان گاز خیلی سریع تر نسبت به زاویه صفر درجه

با هوا مخلوط می شود. به عبارت دیگر در زاویه ۴۵ درجه سوخت با هوای دما بالا تری اختلاط پیدا می کند و هم شدت این اختلاط بیشتر است. بنابراین نرخ احتراق سرعت بیشتری در زاویه ۴۵ دارد و دمای میانگین در این حالت بیشتر می شود.



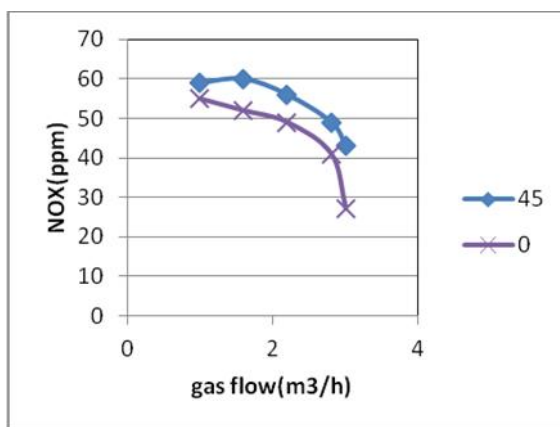
شکل ۳- نمودار دمای میانگین داخل کوره در دبی های مختلف برای انژکتور صفر و ۴۵ درجه

نمودارهای شار حرارتی (شکل ۴) که به آب رسیده است نیز داده های میانگین دما را به خوبی تایید می کند. در این شکل نیز میانگین افزایش دمای آب در زاویه ۴۵ درجه بیش تر از ۰ درجه می باشد. علت این واقعه بالا بودن دمای شعله و در نتیجه افزایش تشعشع در زاویه ۴۵ درجه می باشد. میزان حرارت انتقالی از مکانیسم تشعشع با دما رابطه ی مستقیم از توان ۴ دارد.



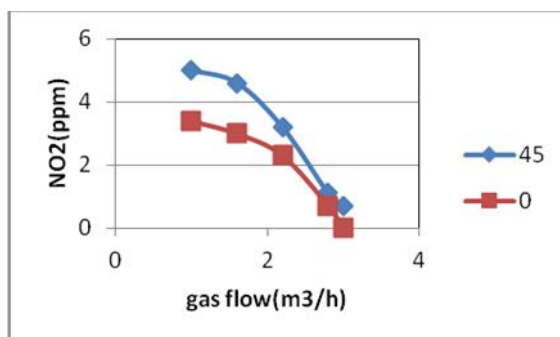
شکل ۴- شار حرارتی رسیده به آب در زوای ۰ و ۴۵ درجه

در شکل ۵ مقایسه ی میزان NO_x تولیدی در دو زاویه تزریق آورده شده است. با توجه به این که دمای شعله در دبی های مختلف انژکتور ۴۵ درجه بیشتر از انژکتور صفر درجه بوده است، طبیعی به نظر می رسد که میزان NO_x تولید شده در زاویه ۴۵ بیشتر از زاویه صفر درجه باشد، چون یکی از مکانیسم های اصلی تولید اکسید های نیتروژن که معروف به مکانیسم زلدویچ می باشد، وابسته به دما است. به عبارت دیگر با افزایش دمای شعله میزان تولید NO_x نیز بالا می رود.



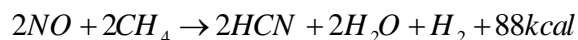
شکل ۵- کاهش میزان NO_x در زوایای انژکتور ۴۵ و ۰ درجه

پدیده ی بسیار جالبی در این آزمایشات صورت پذیرفت و آن صفر شدن میزان NO₂ خروجی از کوره ی اول با افزایش دبی سوخت در کوره ی دوم بود. در شکل ۶ این پدیده برای زوایای ۰ و ۴۵ درجه نشان داده شده است. کاهش میزان NO₂ در زاویه صفر درجه بیشتر از ۴۵ درجه می باشد. مولکول NO نسبت به مولکول NO₂ پایداری بیشتری دارد. بنابراین در محلی که گاز تزریق می شود گاز NO₂ نسبت به NO بسیار سریع تر با رادیکال های دما بالای گاز واکنش می دهد و از بین می رود.

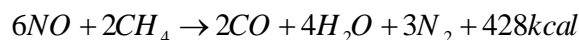


شکل ۶- از بین رفتن گاز NO₂ با تزریق گاز ثانویه در کوره دوم

کاهش NO با هیدروکربن ها اولین بار در سال ۱۹۵۰ توسط پتری و انگل گزارش شد [۴]. میرسون برای واکنش متان با NO دو واکنش زیر را پیشنهاد کرد [۵].



()



بازسوزی فرایندی است که در آن سوخت در پایین دست منطقه احتراق تزریق می شود و به صورت موضعی اطراف محل تزریق به منطقه ای غنی از سوخت تبدیل می گردد و رادیکال های هیدروکربن به وجود آمده می توانند NO_x تولید شده در مرحله ی اول را اکسید کرده و به مولکول های نیتروژن و بخار آب تبدیل کنند. سوختی که در مرحله ی بازسوزی استفاده می شود می تواند به صورت گازی (گاز طبیعی)، مایع (ته مانده نفت)، جامد (زغال سنگ پودر شده) باشد. معمولا ۱۰-۳۰ درصد از کل سوخت در مرحله ی بازسوزی استفاده می شود و می تواند ۳۵-۶۵ درصد از NO_x تولید شده در مرحله ی اول را از بین

ببرد. اگر پس از مرحله‌ی بازسوزی اوره ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) یا آمونیاک (NH_3) تزریق شود، کاهش NO_x به نود درصد هم می‌رسد [۶].

البته بازسوزی در سیستم‌های احتراقی کاربرد دارد که سوخت تزریق شده در مرحله‌ی دوم زمان کافی برای سوختن کامل داشته باشد، در غیر این صورت احتراق ناقص انجام می‌شود و میزان CO و هیدروکربن‌های نسوخته به شدت بالا می‌رود. با توجه به این که احتراق در مرحله‌ی اول نیز به صورت فقیر انجام می‌شود و آزاد سازی انرژی کم تری صورت می‌گیرد، مقدار NO_x تولید شده در مرحله‌ی اول نیز کاهش می‌یابد.

در آزمایشات صورت گرفته با افزایش دبی گاز در کوره دوم به تدریج میزان اکسیژن موجود در هوا سوزانده می‌شود و زمانی که اکسیژن به پایان می‌رسد، با افزایش میزان اندکی گاز در کوره‌ی دوم افزایش شدید میزان CO و H_2 مشاهده می‌شود. در شکل ۴ نیز نقطه‌ای که در آن NO_x به صورت ناگهانی کم شده است (بخصوص انژکتور صفر درجه) در دبی ۳ متر مکعب بر ساعت، دقیقاً همان زمانی است که تمامی اکسیژن کوره‌ی اول مصرف شده است.

با توجه به واکنش شیمیایی که در رابطه‌ی ۱ به آن اشاره شد، با قطعیت می‌توان گفت که پدیده بازسوزی در کوره رخ داده است. در این حالت میزان NO_x نیز به شدت کاهش می‌یابد.

نتیجه گیری

نظر به این که گاز داغ ورودی به کوره‌ی دوم محصولات احتراق یک مشعل صنعتی رایج می‌باشد، نتایج این آزمایشات به واقعیت نزدیک است. چون در بررسی آزمایشگاهی HiTAC ممکن است هوا را بوسیله‌ی گرم کن برقی گرم نموده و رقیق سازی را با درصد‌های مختلف نیتروژن، دی اکسید کربن و بخار آب انجام دهند ولی در این حالت نمی‌توان از این بابت اطمینان حاصل کرد که در واقعیت نیز چنین وقایعی رخ می‌دهد.

به نظر می‌رسد مبحث بازسوزی و احتراق با هوای دما بالا رابطه‌ی تنگانی با هم دارند و می‌توان از فواید این دو روش احتراقی به طور همزمان استفاده کرد.

نتایج آزمایشات نشان می‌دهد هر چقدر شدت اختلاط کاهش یابد و اختلاط به کندی صورت بگیرد، تولید NO_x ، شار حرارتی و دمای شعله کاهش می‌یابد. بنابر این هر چقدر زاویه پاشش به سمت صفر میل کند و راستای جریان گاز هوا موازی تر شود، تولید NO_x و دمای شعله کاهش می‌یابد و احتراق به رژیم بدون شعله نزدیک تر می‌شود.

تشکر و قدر دانی

نویسندگان از حمایت‌های جناب آقای سید مظفر عبدالله (مدیر عامل محترم کشت و صنعت روژین تاک) کمال تشکر و قدردانی را دارند.

مراجع

1. Lloyd S. A. , and Weinberg F. J. , A Burner for Mixtures of Very Low Heat Content. *Journal of Nature*. 251. 1974, pp. 47-49.
2. Wang Y, Gupta A.K., *Combustion of Gaseous Fuels with High Temperature Air in Normal and Micro-gravity Conditions. Sixth International Microgravity Combustion Workshop, NASA Glenn Research Center, Cleveland, OH, CP-2001, pp. 377-380.*
3. Arghode V. K., Gupta A. K., Effect of flow field for colorless distributed combustion (CDC) for gas turbine combustion. *Journal of Applied Energy*, V. 87, 2010, 1631–1640.
4. Patry, M. Engel, G., Formation of HCN by the Action of Nitric Oxide on Methane at Atmospheric Pressure, 1. General Conditions of Formation. *Compt. Rend.*, 231,1950, p. p. 1302–1304.
5. Myerson, A. L., The reduction of nitric oxide 6. in simulated combustion effluents by hydrocarbon–oxygen mixtures. *Fifteenth Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, p. p. 1085–1092, 1974.
6. Smoot, L. D. Hill, S. C. Xus, H., NO_x Control Through Reburning. *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 24,1998, p. p. 385-408.