

احتراق بدون شعله

عیسی خوشرو رودبارکی^۱

شرکت پالایش نفت آبادان
ikhoshrou@gmail.com

چکیده

به دنبال بحران انرژی اول و دوم در دهه های هفتاد و اوایل هشتاد میلادی، فعالیت های پژوهش و توسعه فراوانی در دنیا با تمرکز بر بهبود بازدهی انرژی انجام می پذیرفت. از موثرترین روش برای بهبود بازدهی سامانه های احتراق که در فرایندهای دما بالا به کار می رود، پیش گرمایش هوای احتراق است. فن آوری احتراق بدون شعله نخستین بار به منظور کاهش میزان تشکیل NOx حرارتی در مشعل های کوره های صنعتی و با بهره گیری از هوای احتراق پیش گرم شده توسعه یافت. این تکنیک که احتراق بدون شعله نام گرفت هم اکنون در حد بالایی مورد استفاده قرار می گیرد، کاربردهای بیشتری هم در دست بررسی می باشد. در این نوشتار معرفی احتراق بدون شعله، کاربردهای صنعتی و کاربردهایی که هنوز در مرحله پژوهش هستند مورد توجه قرار گرفته است.

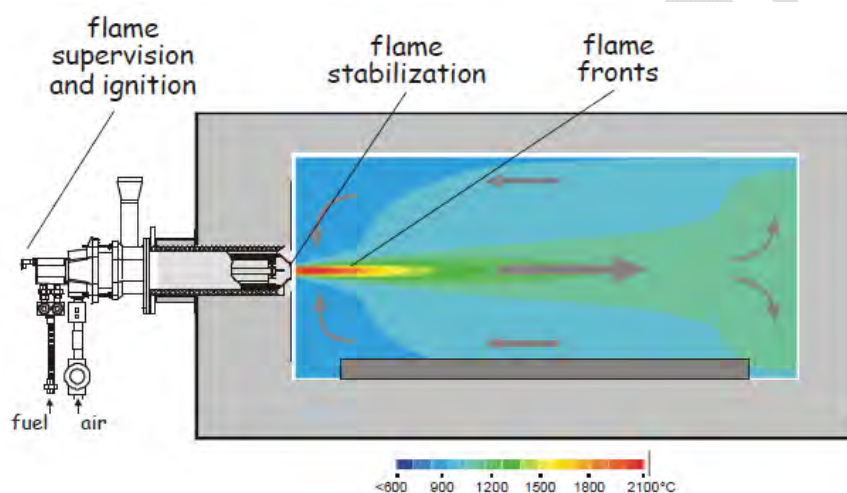
واژگان کلیدی:

NOx حرارتی، پیش گرمایش هوای احتراق، مشعل بازیاب، احتراق بدون شعله، احتراق پایدار.

۱. مسئول مهندسی فرایند احتراق اداره مهندسی پالایش

۱. مقدمه

اگر به آمیزه ای از سوخت و هوا در دامنه شعله وری آن، جرقه ای زده شود، شعله ای تشکیل می گردد. در شکل (۱) ویژگی های اصلی شعله نشان داده شده است. در ناحیه واکنش و یا جبهه شعله دما به سرعت تا نزدیک دمای آدیاباتیک بالا می رود. شعله بر رو و یا نزدیک مشعل تثبیت می گردد. بنابراین احتراقی پایدار و قابل کنترل به دست می آید. روش های گوناگون برای تثبیت شعله مانند تثبیت سازی چرخشی و تیغه ای در زمینه بهبود عملکرد مشعل ها نقش مهمی بازی کرده است. برای نظارت بر کیفیت شعله هم از اثرهای الکتریکی و نوری شعله ها بهره برده می شود. در طراحی های مدرن مشعل ها از آشکارسازهای UV یا یونی ساز در سامانه های خودکار ایمنی شعله استفاده می گردد. در نبود سیگنال شعله، مشعل خاموش می گردد.



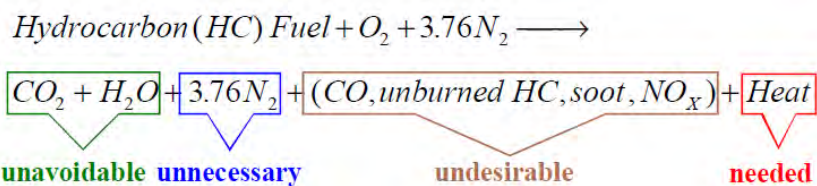
شکل ۱. ویژگی های اصلی شعله

بنابراین می توان گفت شعله دو نقش مهم ایفا می کند:

- تثبیت شعله یک واکنش کنترل شده و پایدار را ضمانت می کند.
- یک شعله پایدار یک سیگنال قابل اعتماد را برای سامانه های ایمنی ایجاد می نماید.

پرسش این است که چرا باید مبنای اثبات شده شعله ها را کنار بگذاریم و مزایای بهره گیری از اکسیداسیون بدون شعله کدام است؟ مهم ترین پاسخ به این پرسش این است که اکسیداسیون بدون شعله می تواند تشکیل NOX را حتی وقتی که از هوای پیش گرم شده با دمای بالا استفاده می شود، متوقف سازد.

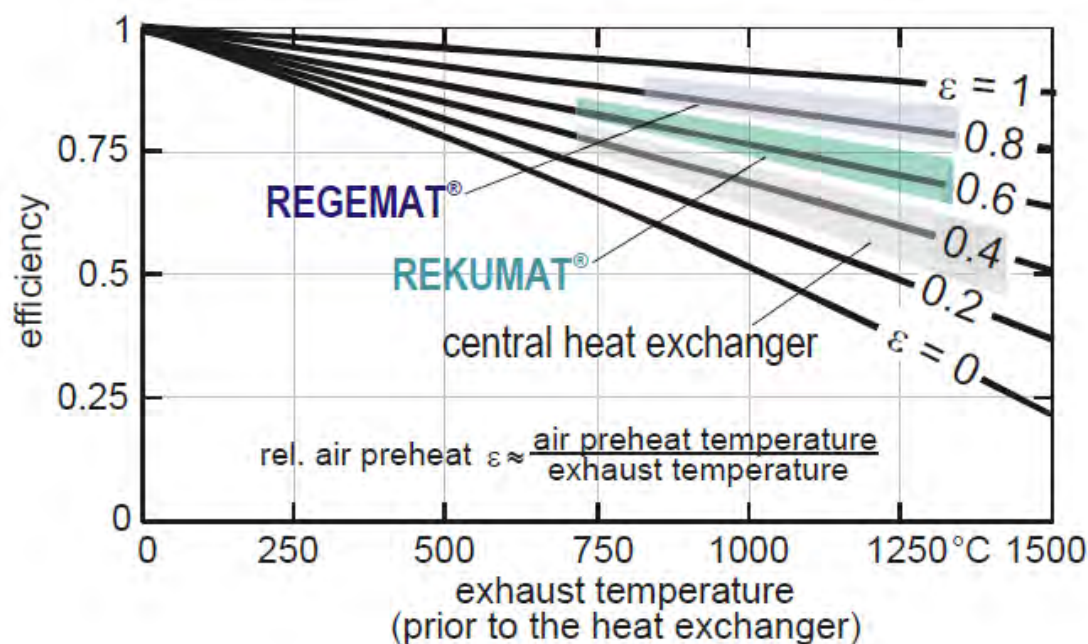
معادله واکنش احتراق یک سوخت هیدروکربنی را در هوا مطابق فرمول زیر در نظر بگیرید:



همان طور که مشخص است تولید CO_2 و آب اجتناب ناپذیر است. نیتروژن موجود در هوا هم برای فرایند احتراق لازم نیست اما جداسازی آن هم اقتصادی نیست. پیشرفت های اخیر در فن آوری جداسازی غشایی تامین اقتصادی هوای غنی از اکسیژن تا ۴۵ درصد را امکان پذیر نموده است. گرچه این موضوع در عمل به دلیل افزایش دمای شعله افزایش میزان تشکیل NO_x را از نیتروژن باقی مانده سبب می شود. همه فرآورده های دیگر احتراق که به عنوان ناخواسته نامیده شده اند مواد آلوده کننده ای هستند که ما به دنبال کاهش یا حذف آنها هستیم.

۲. پیش گرمایش هوای احتراق

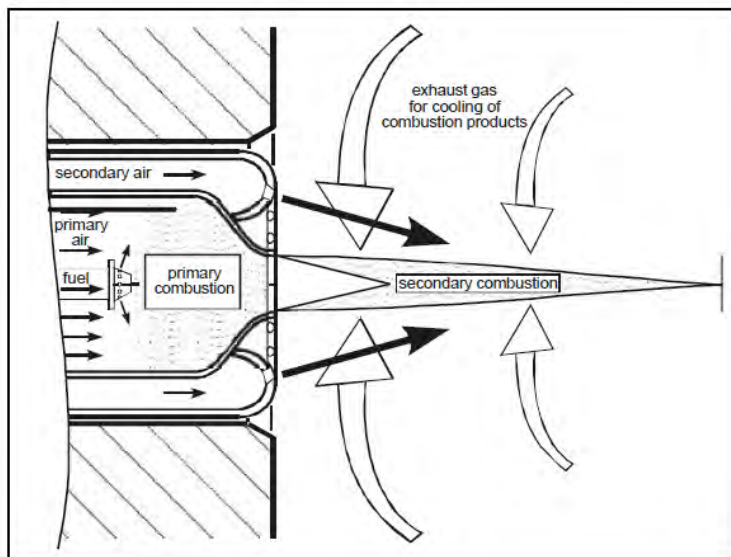
موثرترین روش برای بهبود بازدهی سامانه های احتراق که در فرایندهای دمابالا به کار می رود، پیش گرمایش هوای احتراق است. پیش گرم کن های مرکزی دمای هوا را تا 600°C می رساند. درحالی که سامانه های غیر متمرکز دست یابی به دماهای بالاتری را ممکن می سازد. چون دمای پیش گرم هوا به طور خطی با دمای فرایند افزایش می یابد بازدهی سامانه های احتراق را می توان در یک نمودار به روشنی نشان داد. شکل (۲).



شکل ۲. بازدهی مشعل ها

در همان زمان آگاهی از اثرات منفی NO_x بر سلامت انسان و محیط زیست فشار بالایی بر کاربران و سازندگان تجهیزات احتراق وارد می ساخت. در حالی که کنترل میزان انتشار NO_x در برخی از بخش های صنعت با اقدامات ثانویه مانند به کارگیری مبدل های کاتالیزوری در خودروها با استانداردها منطبق می گردید در صنعت فرایند گرمایی، توسعه و به کارگیری

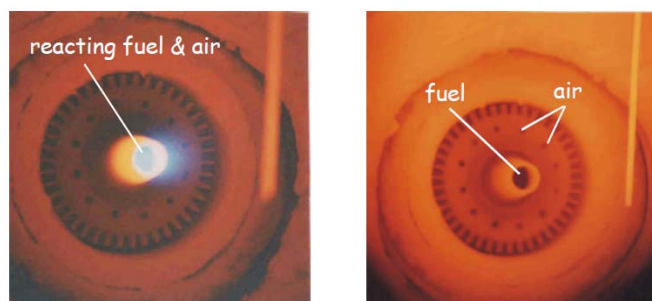
اقدامات اولیه مانند مرحله بندی مورد توجه قرار گرفت. در شکل (۳) نمایی از یک مشعل سرعت بالای دارای سامانه مرحله بندی هوا نشان داده شده است. بهره گیری از این فنون کاهش NOX تا حد استاندارد در فرایندهایی تا دمای 1200°C و ضریب نسبی پیش گرمایش 0.6 (700°C) قابل دستیابی ساخت. گرچه دست یافتن به حدهای بالاتر و هم چنین به کار گیری دماهای پیش گرم بالاتر امکان پذیر نبود.



شکل ۳. نمایی از یک مشعل سرعت بالای دارای سامانه مرحله بندی هوا

۳. اکسیداسیون بدون شعله

در سال ۱۹۸۹ میلادی در جریان یک آزمایش با یک مشعل بازیاب اتفاقی شگفت انگیز رخ داد. در دمای 1000°C کوره و نزدیک 650°C هوای پیش گرم شده هیچ شعله ای دیده نمی شد و سیگنال UV هم آشکار نمی گشت. با این حال سوخت به طور کامل می سوخت. میزان CO در گازهای خروجی به زیر 1ppm رسیده بود و انتشار NOX هم نزدیک صفر بود. ابتدا حتی فکر نمودند که آنالیزور دچار اشکال گردیده است. در حالی که احتراق پایدار و یک نواخت بود شعله ای به چشم نمی آمد.

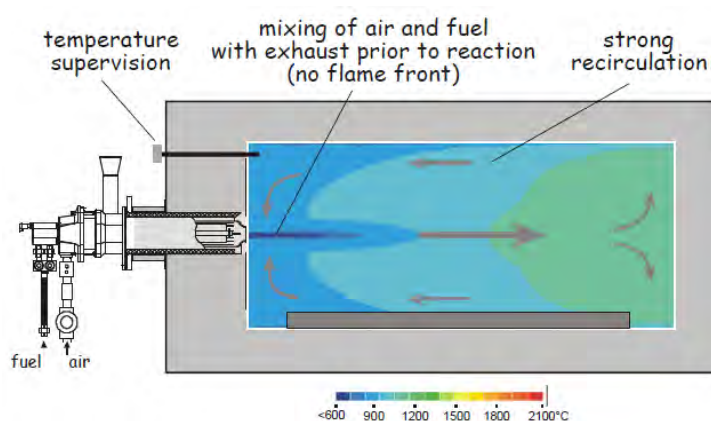


شکل ۴. شعله و FLOX

این شرایط را اکسیداسیون بدون شعله Flameless Oxidation و یا به اختصار FLOX یا MILD combustion و یا Highly Preheated Air Combustion (HiPAC) می نامند.

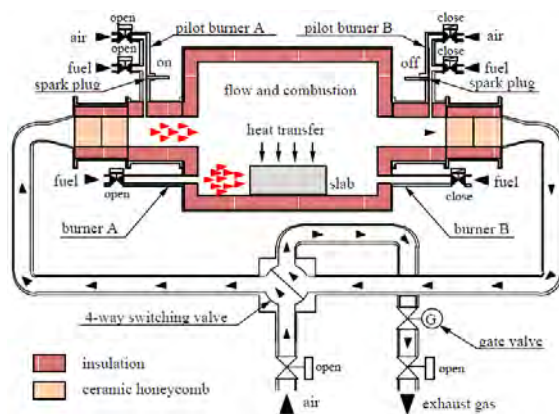
آزمایش های بیشتری برای تعیین شرایط حیاتی اکسیداسیون بدون شعله انجام پذیرفت. دانسته شد که بایستی فواره یا جریان های سریع هوا و سوخت به منظور رسیدن به یک جریان چرخشی قوی پیش از واکنش با هم آمیخته گردند. سپس شعله ای و هم چنین اوج دمایی بالایی نخواهد بود. پیش گرمایش هوا هم یک پیش نیاز برای اکسیداسیون بدون شعله نیست. فن اکسیداسیون بدون شعله به زودی در سراسر دنیا مورد توجه قرار گرفت.

هم زمان در حالی که اولین مشعل های اکسیداسیون بدون شعله گسترش می یافتند و اولین مشعل تجاری در سال ۱۹۹۱ فروخته شد، برنامه های پژوهش و توسعه برای بررسی مبانی اکسیداسیون بدون شعله دنبال می گردید.



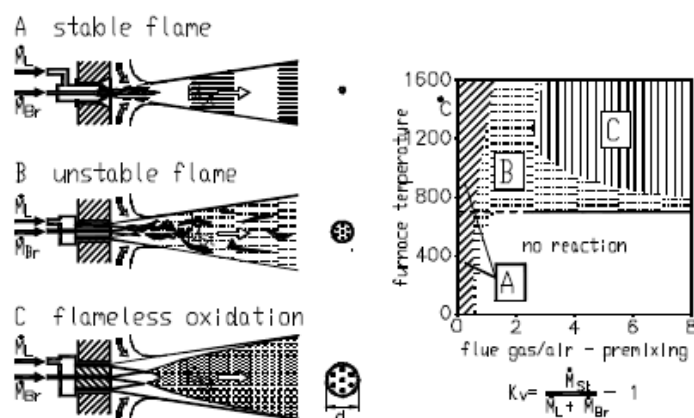
شکل ۵. ویژگی های اصلی اکسیداسیون بدون شعله

نمایی از یک کوره اکسیداسیون بدون شعله در شکل (۶) نشان داده شده است. این کوره دارای یک سامانه جریان متناوب بوده و از دو بازیاب تشکیل شده است. در یک جهت جریان، هوای ورودی از شانه عسلی داغ عبور کرده و پیش گرم می شود. گازهای داغ خروجی هم از انتهای دیگر کوره را ترک می کنند و در گذر از روی شانه عسلی سرمایی آن را گرم می کنند. پس از گذشت مدت معین، دمای شانه عسلی ورودی پایین می آید، در حالی که دمای شانه عسلی طرف خروجی افزایش می یابد. بنابراین جهت جریان را برعکس می کنند. این بار شانه عسلی داغ انتهایی کار گرم کردن هوای ورودی را انجام می دهد و شانه عسلی سردتر گرمای گازهای خروجی را جذب می نماید. سپس جهت این فرایند دوباره تغییر می کند و جای بازیاب های گرمایشی و سرمایشی جا به جا می گردد.



شکل ۶. نمایی از یک کوره فرایند احتراق بدون شعله

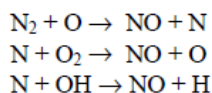
مشابه شعله معمولی، می توان نواحی احتراق پایدار در اکسیداسیون بدون شعله را هم شرح داد. شکل (۷) در بین این ناحیه ها هم پدیده شعله های جدا شونده و ناپایدار رخ می دهد که برای یک احتراق فنی مناسب نیست.



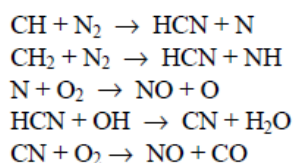
شکل ۷. محدوده پایداری شعله

۴. تشکیل NOx در احتراق

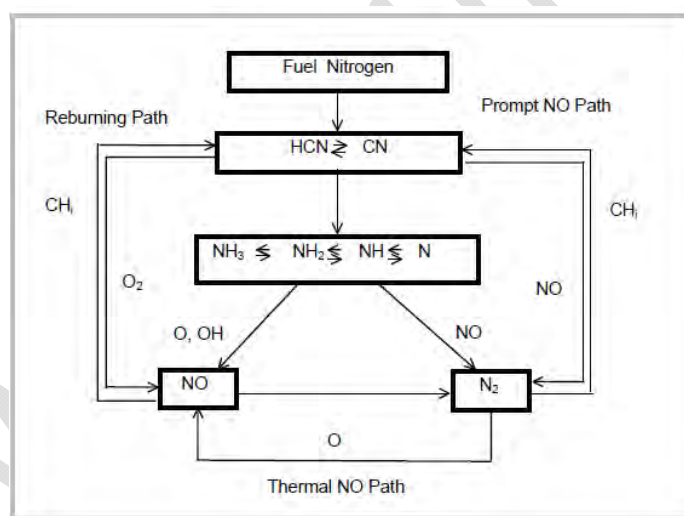
اکسیدهای نیتروژن با فرمول عمومی NOx یکی از اصلی ترین منابع آلوده کننده هوا به حساب می آید. استاندارد هوای پاک اکسیدهای نیتروژن را به نزدیک 0.05ppm محدود می کند. مشاهده شده است که اگر غلظت NO به بیش از 2ppm برسد زیان هایی به برگ گیاهان حساس وارد می شود. بنابراین کنترل انتشار اکسیدهای نیتروژن یکی از اصلی ترین وظایف طراحی و راهبری مشعل ها و کوره های صنعتی پیشرفته می باشد. به طور کلی سه مکانسیم شیمیایی تشکیل NO در احتراق شامل NO حرارتی، NO آنی و NO سوختی وجود دارد. بنا به مکانسیم زل دوویچ (۱۹۴۶ میلادی)، NO حرارتی به دلیل اکسیداسیون مستقیم مولکول نیتروژن در شعله داغ ایجاد می شود و به شرح زیر است:



در یک کوره معمولی شکل گیری NO حرارتی هنگامی که دما بالای 1500°C است، چشم گیر خواهد بود. NO آبی به دلیل متلاشی شدن هیدروکربن، به طور عمده CH و CH_2 ، و حمله به مولکول نیتروژن ناشی می شود با توجه به فنی مور (۱۹۷۱ میلادی) NO آبی در ناحیه غنی سوخت با دمای پایین و زمان ماند کوتاه تشکیل می شود و به صورت زیرمی باشد:



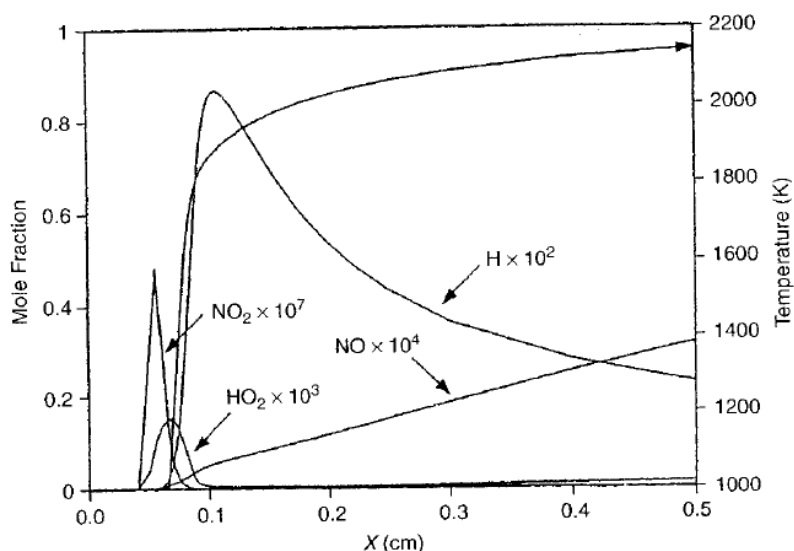
NO سوختی هم در نتیجه اکسیداسیون ترکیبات دارای پیوند نیتروژن سوخت به دست می آید. این موضوع هم بیشتر برای سوخت های جامدی مانند زغال سنگ و زیست توده صدق می کند که در مبنای وزنی ۰,۱ تا ۰,۴ درصد دارای نیتروژن می باشند. پیوندهای نیتروژنی هنگامی که سوخت گرم می شود و به حالت بخار در می آید به صورت فاز گازی آزاد می شود. با تجزیه گرمایی این ترکیبات در ناحیه واکنش رادیکال هایی مانند N ، HCN ، CN و NH تشکیل می شود و به NO تبدیل می شود. مسیر دقیق تشکیل و تخریب NOX سوختی به طور کامل روشن نشده است گرچه یک مسیر ساده شده توسط وندت (۱۹۹۱ میلادی) همانند شکل (۸) ارائه شده است.



شکل ۸. مسیر ساده شده تشکیل و تخریب NOX سوختی

شکل (۹) غلظت بالای دی اکسید نیتروژن را در نزدیکی ناحیه شعله در یک احتراق گاز متان با درصد هوای اضافه

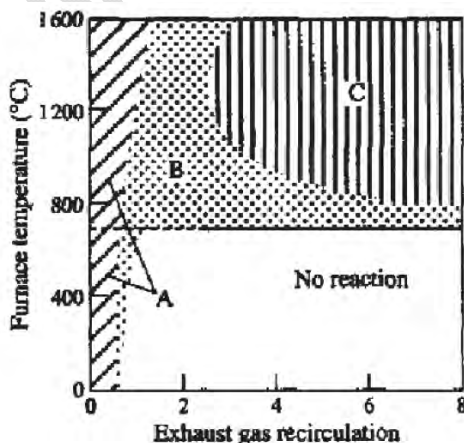
۱۰ درصد در فشار اتمسفر نشان می دهد. پروفایل های NO ، H و HO_2 نیز نشان داده شده است.



شکل ۹. پروفایل تشکیل HO_2 , NO , H , NO_2 در یک شعله

۵. مبانی احتراق بدون شعله

دو شرط اصلی مورد نیاز برای احتراق بدون شعله رقیق شدن بالا و دمای افزایش یافته واکنش دهنده ها می باشد. با واگردانی گازهای خروجی از ناحیه واکنش هر دوی این شرایط به دست می آید. کشاندن گازهای خروجی به ناحیه احتراق برای آغاز یک احتراق MILD بسیار مهم است. (Özdemir & Peters, 2001). بسته به میزان بازگرداندن، ممکن است ترکیب های گوناگونی از دماها و نرخ واگردانی حالت های احتراق گوناگونی را دست دهد که در شکل (۱۰) نشان داده شده است. (Wünning, J.A. & Wünning, J.J., 1997).



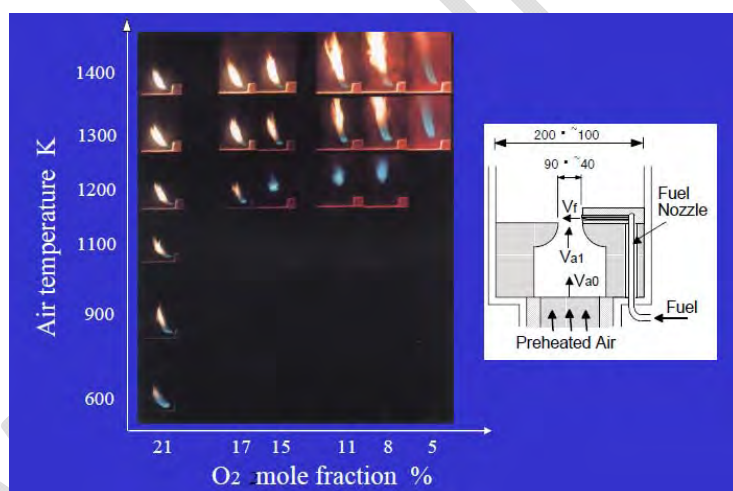
شکل ۱۰. محدوده پایداری احتراق معمولی و احتراق بدون شعله

محور افقی میزان واگردانی گازهای خروجی که برابر با نسبت گاز خروجی به هوای تمیز است را نشان می دهد. از نظر ریاضی نرخ واگردانی از رابطه زیر به دست می آید:

$$K_v = \frac{\dot{M}_E}{\dot{M}_F + \dot{M}_A}$$

M دبی جرمی و زیر نویس های E مربوط به گاز خروجی بازگردانده شده، F سوخت و A هوای احتراق تمیز را نشان می دهد. محور عمودی، دمای کوره و یا همان دمای مخلوط واکنش دهنده ها است.

ناحیه A دامنه شعله های معمولی را نشان می دهد، جایی که نرخ واگردانی کمتر از ۳۰ درصد است. این نوع شعله ها پایدار هستند. هنگامی که نرخ واگردانی افزایش می یابد و به ناحیه B می رسیم، شعله حاصل ناپایدار می گردد. اگر دمای زیر دمای خود اشتعالی باشد (خط افقی در $700^\circ C$)، این شعله ها خاموش می شوند. در ناحیه C ، جایی که نرخ واگردانی به اندازه کافی افزایش یافته و دما هم بالای دمای خود اشتعالی است، یک احتراق پایدار به دست می آید. این نوع شرایط را احتراق $MILD$ می نامیم. این نمودار در حقیقت تفاوت احتراق معمولی و احتراق بدون شعله را در افزایش گسترده محدوده شعله وری و هم چنین محدوده بهبود یافته پایداری شعله نشان می دهد. واکنش در سطوح بسیار پایین اکسیژن و بهبود پایداری شعله در شرایط احتراق بدون شعله که با دمای بالاتر از دمای خود اشتعالی شناخته می شود، سبب می شود که شعله همواره درون کوره پایدار بماند. (Katsuki & Hasegawa, 1998). در شکل (۱۱) عکس برداری مستقیم یک شعله را در شرایط گوناگون دمایی و غلظت اکسیژن نشان می دهد.

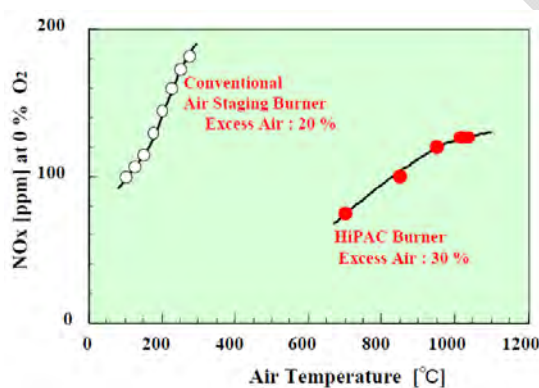


شکل ۱۱. عکس برداری مستقیم شعله در شرایط گوناگون دمایی و غلظت اکسیژن

گرچه رژیم های احتراق دیگری نیز وجود دارند که ویژگی های مشابهی را نشان می دهند ولی نام های گوناگونی دارند. در حالی که کاربرد آنها کمی متفاوت است همه آنها بر اساس بسیار مشابه کار می کنند. بر مبنای این مشاهده که در شرایط مشخصی فرایند احتراق $MILD$ ممکن است شعله غیر قابل دیدن و شنیدن تولید نماید اکسیداسیون بدون شعله و یا به اختصار $FLOX$ نام گرفته است. نام های مشابه دیگر در این باره احتراق بدون شعله، احتراق بدون رنگ یا شعله های نامرئی می باشد. نام های دیگری هم مانند احتراق با هوای دما بالا ($HiPAC$) Highly Preheated Air Combustion، فن آوری احتراق دما بالا ($HiCOT$) یا احتراق با آنتالپی اضافه کاربرد دارد. همه این فن آوری های احتراق تفاوت اندکی با هم دارند، ولی همه آنها بر مبنای این اصل اساسی که واکنش در سطوح رقت بالا و در شرایط دمای بالا رخ می دهد، استوار است. به همین دلیل دسته بندی آنها در گروه احتراق $MILD$ مناسب به نظر می رسد.

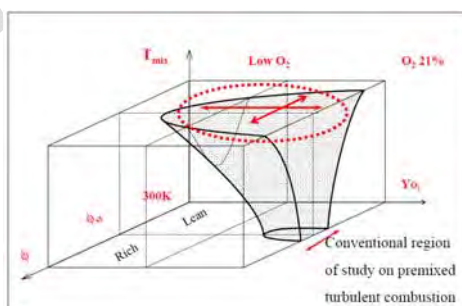
بارقیق سازی جریان اکسیژن، واکنش احتراق توزیع بیشتری می یابد که خود آزادسازی انتشار گرما را به دنبال دارد. با آزادسازی گرما که در حجم بزرگ تری رخ می دهد، از ایجاد اوج دمایی جلوگیری می شود، بنابراین تشکیل NO حرارتی تا حد زیادی متوقف می گردد... (Wünning, J.A. & Wünning, J.J., 1997). البته با آن که آزادسازی گرما در حجم بزرگ تری رخ می دهد، میزان کلی ثابت است، بنابراین در شرایط احتراق MILD نرخ آزادسازی گرما در واحد سطح پایین تر است. (Hasegawa et al., 1997).

آمیختن سوخت و هوا و یا آمیزه سوخت - هوا با حجم بالای گازهای خروجی حاصل از احتراق یک کوره، منجر به تشکیل مخلوط رقیق پیش از واکنش احتراق می شود. این موضوع کاهش شکل گیری NOX حرارتی را به دنبال دارد. در شکل (۱۲) تغییرات میزان انتشار NOX با دمای هوای پیش گرم در دو حالت بهره گیری از مشعل HiPAC و یک مشعل معمولی دارای سامانه مرحله بندی هوا نشان داده شده است.



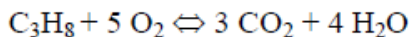
شکل ۱۲. تغییرات میزان انتشار NOX با دمای هوا

در شکل (۱۳) هم دامنه شعله وری بر حسب تابعی از Y_{O_2} ، T_{mix} و ϕ نشان داده شده است.

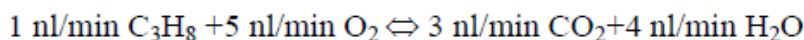


شکل ۱۳. دامنه شعله وری بر حسب تابعی از Y_{O_2} ، T_{mix} و ϕ

در یک رشته از آزمایش ها، تزریق پروپان به فضای احتراق، جایی که به طور شیمیایی با اکسیژن ماده اکسیدکننده پیش گرم شده واکنش صورت می داد، انجام پذیرفت. معادله احتراق استیوکیومتری هم کنش پروپان - هوا به شرح زیر است:



و بر مبنای حجمی معادله:



خواهد بود. بنابراین برای احتراق کامل 1 nl/min از سوخت پروپان تزریقی، اکسیژن مورد نیاز برابر با 5 nl/min و هوای مورد نیاز هم 23.8 nl/min خواهد بود. در این آزمایش هوای احتراق با تزریق گاز خنثی نیتروژن رقیق گردید. بنابراین جزء حجمی اکسیژن در هوا کاهش یافت. از نظر تنوری حجم اکسیژن در هوا از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$\text{Oxygen (Vol\%)} = ((0.21 \times \text{Air}) / (\text{Air} + \text{Nitrogen})) \times 100$$

در طی آزمایش مقادیر جریان کلی (نرخ هوا + نرخ نیتروژن) و جریان سوخت ثابت مانده گرچه جریان هوا تغییر می یابد که به طور مستقیم بر درصد هوای اضافه و ضریب رقیق سازی اثر می گذارد. این مقادیر هم به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\text{Dilution Coefficient} = \text{DC} = (\text{A/F})_{\text{act}} / (\text{A/F})_{\text{Theo.}}$$

$$\text{Percent Excess Air} = 100 * ((\text{A/F})_{\text{act}} - (\text{A/F})_{\text{Theo.}}) / (\text{A/F})_{\text{Theo.}} = 100 * (\text{dilution coefficient} - 1)$$

در این مطالعه آزمایشی ضریب رقیق سازی با بهره گیری از معادله ساده زیر به دست می آید:

$$\text{Air Excess Factor } (\lambda) = \text{Air flow}_{\text{Measured}} / \text{Air flow}_{\text{Stoic}} = (0.21 \times \text{Air Flow}) / (5 \times \text{Gas Flow})$$

مقادیر واقعی میزان انتشار NOx و CO هم در شرایط مختلف برای ایجاد شرایط مقایسه به مقادیر معادل استیوکیومتری تبدیل شده است. روابط تجربی زیر بدین منظور به کار می رود:

$$\text{NO}_x\text{-stoichiometric (ppm)} = \text{Air Excess Factor } (\lambda) \times \text{NO}_x\text{-measured (ppm)}$$

$$\text{CO-stoichiometric (ppm)} = \text{Air Excess Factor } (\lambda) \times \text{CO-measured (ppm)}$$

۶. کاربردها در صنایع

۶-۱. کاربرد در صنایع فلزات

در حالی که اولین مشعل های نوع recuperative & regenerative FLOX در اوایل دهه نود میلادی نصب می گردید، برای کاربردهای گوناگون طراحی های مختلف مشعل FLOX ارائه می گردید. بیشتر این مشعل ها هم در کوره های عملیات حرارتی صنایع فلزی نصب گردید. پروژه های زیادی با هدف بهبود طراحی مشعل ها و یا بررسی اثرات اکسیداسیون بدون شعله بر روی فرایندهای مشخص انجام پذیرفت. تمرکز یکی از این طرح های پژوهش و توسعه بر تکمیل مشعل های سرامیکی recuperative و لوله های تابشی بود. در لوله های تابشی و بیشتر از آن در لوله های تابشی سرامیکی، بازدهی و NOx به دلیل آن که دمای درونی در لوله های تابشی بالاتر از دمای فرایندی است، مبحث مهمی است. نقطه عطف هم در سال ۱۹۹۴ میلادی رخ داد که چند صد لوله های تابشی سرامیکی و مشعل FLOX در یک خط تولید نوار فلزی سیلیکونی نصب گردید. شکل (۱۴) از آن پس تاکنون چندین هزار مشعل سرامیکی و لوله های

تابشی نصب گردیده است. در حالی که این لوله ها نخست برای جایگزینی گرمایش الکتریکی و لوله های فلزی که دارای عمر کوتاهی بودند برای کاربری های دما بالا طراحی شده بودند، بیشتر و بیشتر در حتی در فرایندهای دما پایین هم مورد استفاده قرار گرفتند. این لوله ها در مقایسه با لوله های فلزی تا دو برابر شدت گرما تامین می نمود.



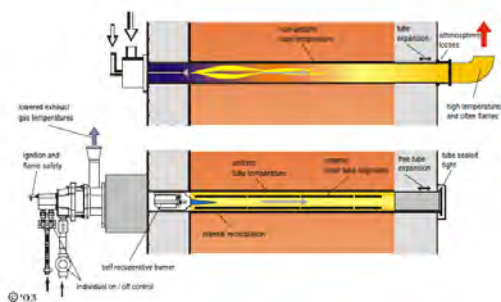
شکل ۱۴. نصب لوله های تابشی سرامیکی در یک خط تولید نوار فلزی سیلیکونی

آخرین پیشرفت در این زمینه یک لوله درونی ویژه تصویر (۱۵) برای لوله های تابشی تک انتهایی FLOX می باشد. شکل ویژه لوله درونی با بهبود واگردانی میزان انتشار NOX را به حداقل می رساند.



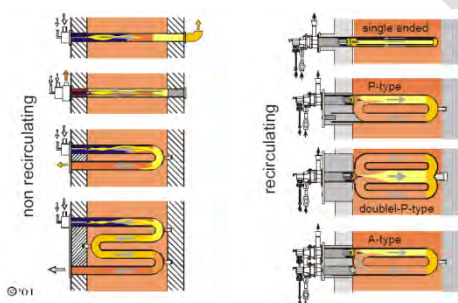
شکل ۱۵. طراحی جدید لوله درونی

در شکل (۱۶) یک طرح بهسازی را نشان داده شده است که در آن از یک لوله مستقیم قدیمی برای تبدیل به مشعل FLOX **Self Recuperative** بهره گرفته شده است. این راه حل برای کاستن هزینه ها و هم چنین کاهش مدت زمان از سرویس خارج بودن کوره انجام شده است. در پی این اقدام صرفه جویی انرژی تا ۴۰ درصد، همگنی توزیع دما، افزایش طول عمر لوله و حذف هدررفت اتمسفری حاصل شده است.



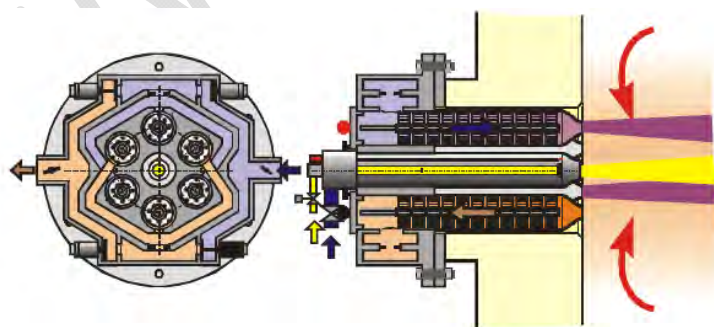
شکل ۱۶. بروز آوری لوله های فلزی با لوله های recuperative single ended

سپس بر روی تکمیل لوله های تابشی خطوط نوار عمودی متمرکز گردیدند. تا آن موقع، برای این نوع کاربردها لوله های W شکل استفاده می شد. در سال ۲۰۰۱ میلادی در TKS دورتموند به لوله های P مانند دوگانه مجهز گردید. شکل (۱۷).



شکل ۱۷. لوله های P مانند دوگانه

لوله های P مانند دوگانه از نظر مساحت سطح به دلیل داشتن پایه هایی با قطر بزرگ تر با لوله های W شکل رقابت می کند. طراحی واگردانی یک توزیع دمایی همگن را سبب می شود. هم چنین لوله های تابشی بازیاب نوع A که واگردانی درونی را امکان پذیر می سازد، در دست توسعه می باشد. در سال ۱۹۹۵ میلادی طراحی برای نشان دادن پتانسیل طراحی یک مشعل فشرده نوع بازیاب آغاز شد. این مشعل، بازیاب های شانه عسلی سرامیکی را که با مشعل یک پارچه شده، به کار می برد. شکل (۱۸).



شکل ۱۸. مشعل نوع خود بازیاب

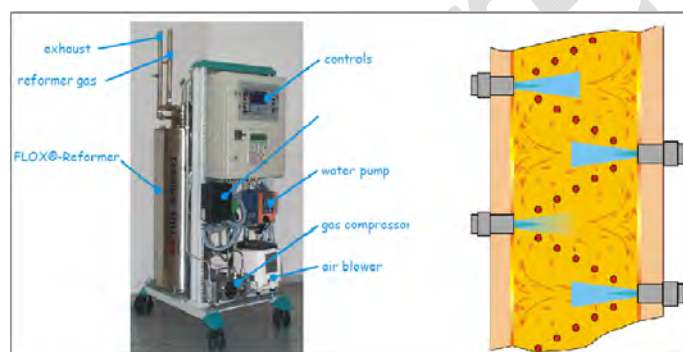
در صنعت سرامیک پتانسیل بالایی برای بهره‌گیری از این فن آوری نوین احتراق وجود دارد. گرچه بیشتر فرایندها در این بخش به شدت به هم وابسته هستند و آغاز تغییرات نیازمند پژوهش‌های بیشتر و متقاعد نمودن مشتریان برای دست کشیدن از روش‌های سنتی می‌باشد.

۳-۶. کاربرد در صنعت شیشه

صنعت شیشه یک منتشر کننده اصلی NOx می‌باشد. در این بخش به طور سنتی بازیابی برای پیش گرمایش هوای احتراق و گاهی هم سوخت به کار می‌رود. تغییرات بنیانی در کوره‌های ذوب شیشه به دلیل عدم امکان از سرویس خارج نمودن به آسانی امکان پذیر نیست. در ضمن از آن جا که بسیاری از جنبه‌های این فن آوری هنوز روشن نشده نمی‌توان پیش بینی نمود که اثر تغییر فرایند احتراق بر محصول چه خواهد بود. گرچه با توجه به هزینه بالای تصفیه گازهای خروجی، هر تلاشی برای پیدا نمودن راه حلی برای کاهش انتشار NOx بایستی انجام پذیرد.

۴-۶. کاربرد در صنایع شیمیایی

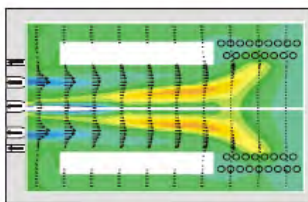
فرایندهای شیمیایی به شدت انرژی بر هستند. اکسیداسیون بدون شعله پتانسیل بالایی به طور عمده در فرایندهای پتروشیمی و تبدیل دارد. در شکل (۱۹) بهره‌گیری از تکنیک FLOX® reformer در یک تجهیز آزمایشی نشان داده شده است.



شکل ۱۹. FLOX® reformer در یک تجهیز آزمایشی

۵-۶. کاربرد در تولید هم زمان توان و حرارت

در یک پروژه پژوهشی دیگر، یک مشعل FLOX در موتور استرلینگ توسعه یافت. شکل (۲۰). در کنار انتشار پایین NOx و بازدهی بالا، طراحی فشرده و پتانسیل برای هزینه تولید پایین در تیراژ بالای تولید عامل‌های مهمی بودند. بهره‌گیری از موتور استرلینگ در واحدهای تولید هم زمان توان و حرارت (CHP) برای غیرمتمرکز نمودن تولید توان الکتریکی مد نظر است.



شکل ۲۰. توسعه مشعل در موتور استرلینگ

در سال های گذشته، تلاش برای توسعه سامانه های پیل سوختی در واحدهای تولید توان و حرارت نیز به طور فزاینده افزایش یافته است. احتراق بدون شعله در این زمینه یک فرایند آرمانی برای این فرایندهای جمع و جور تبدیل می باشد. در شکل (۲۱) یک واحد تبدیل برای تولید در سایت هیدروژن و انتقال به دو ایستگاه سوخت هیدروژنی در مادرید و مونیخ نشان داده شده است.



شکل ۲۱. کاربرد FLOX® reformer در ایستگاه سوخت هیدروژنی فرودگاه مونیخ

فن آوری امیدوارکننده دیگر میکرو توربین های گازی می باشد که می تواند از محفظه احتراق بدون شعله بهره ببرد. پژوهش های جدید پتانسیل احتراق بدون شعله را در صنعت تولید توان، توربین های گازی، احتراق زغال سنگ و فرایندهای آبی شامل فرایندهایی که در آنها سوخت زیستی و جداسازی CO₂ به کار می رود، نشان می دهد. به نشانی زیر نگاه کنید: www.oxy-coal.de.

۶-۶. کاربرد در سوخت های زیستی

علاقه مندی روز افزونی به بهره گیری از سوخت های زیستی به دلیل جایگزین پذیری و عدم انتشار CO₂ آنها ایجاد شده است. اما این سوخت ها اغلب غیر یکنواخت هستند. احتراق بدون شعله، سوختن بدون مشکل به دلیل نبود محدودیت پایداری شعله و هم چنین احتراق عاری از گازهای آلاینده را برای این سوخت فراهم می سازد. در این زمینه پژوهش های فراوانی در دست اقدام است. برای اطلاعات بیشتر به نشانی زیر مراجعه فرمایید: www.eu-projects.de.

۷. نتیجه گیری

موثرترین روش برای بهبود بازدهی سامانه های احتراق که در فرایندهای دامبالا به کار می رود، پیش گرمایش هوای احتراق است. احتراق بدون شعله نخستین بار به منظور کاهش میزان تشکیل NOx حرارتی در مشعل های کوره های صنعتی و با بهره گیری از هوای احتراق پیش گرم شده توسعه یافت. در حالی که این فن آوری هم اکنون در حد بالایی مورد استفاده قرار می گیرد، کاربردهای دیگر هم در حال پیشرفت می باشد. پژوهش های جدید پتانسیل احتراق بدون شعله را در صنعت تولید توان، توربین های گازی، احتراق زغال سنگ و فرایندهای آبی شامل فرایندهایی که در آنها سوخت زیستی و جداسازی CO₂ به کار می رود، نشان می دهد. توسعه به منظور بهینه سازی مشعل های بازیاب و بهبود دهنده ادامه دارد. نه تنها به دلیل بهای بالای انرژی و بازدهی بالا و کاهش آلایندهای زیست محیطی جذاب است بلکه این فن آوری هم چنین به دلیل توزیع همگن دمایی بهتر در کوره، شوک گرمایی کمتر در مشعل و در نتیجه

نیاز به تعمیرات کمتر، شدت تولید صدای کمتر و آلودگی صوتی کمتر محیط و بهره گیری کم سخت گیرانه تر از سوخت به دلیل عدم نیاز به پایداری شعله مورد توجه می باشد. تا امروز هزاران مشعل از این نوع فن آوری نوین احتراق در کاربردهای گوناگون مورد استفاده قرار گرفته است. در بیشتر مواقع کاهش میزان انتشار NOX مشوق بهره گیری از این نوع مشعل ها بوده است. اما در بسیاری از موارد فواید زیر هم حاصل گشته است:

- توزیع همگن دمایی بهتر
- شوک گرمایی کمتر در مشعل و در نتیجه نیاز به تعمیرات کمتر
- شدت تولید صدای کمتر و آلودگی صوتی کمتر
- اشکالات کمتر مشعل به دلیل سهولت راهبری
- بهره گیری کم سخت گیرانه تر از سوخت به دلیل عدم نیاز به پایداری شعله

توسعه به منظور بهینه سازی مشعل های بازیاب و بهبود دهنده ادامه دارد. بهای بالای انرژی مبانی بازیابی را به دلیل پتانسیل بالاتر بازدهی جذاب تر خواهد ساخت. این فن آوری برای حالت های زیر توسعه یافته و در دست بهره برداری اند:

- کوره های پتروشیمی (ریفررها)
- ریفرمهای میکرو NOX برای پیل های سوختی
- محفظه های احتراق توربین گازی
- دفع گازهای زاید

WWW.KOUIRAN.COM

۸. مراجع

- "Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry", Vol. A-17, Nitric acid, Nitrogen Oxides, pp297-340, VCH Publishers, Germany, 1989.
- Dr. Joachim G. Wüning, "FLOX® – Flameless Combustion", THERMPROCESS-Symposium 2003.
- Narayanan Krishnamurthy, Wlodzimierz Blasiak Anders Lugnet, "Development of High Temperature Air and Oxy-Fuel combustion technologies for minimized CO₂ and NO_x emissions in Industrial Heating", The Joint International Conference on "Sustainable Energy and Environment (SEE)", 1-3 December 2004, Hua Hin, Thailand.
- Yuying LIU, Jean-Michel MOST, "Effects of Diluents on the Behavior of the Diluted Combustion Regime", European Combustion Meeting 2009.
- Hamdi Mohamed, Benticha Hmaeid and Sassi Mohamed, "Fundamentals and Simulation of MILD Combustion", Thermal Power Plants, InTech Europe, January, 2012.
- K. Abbasi Khazaei, A.A. Hamidi, M. Rahimi "Numerical Modeling and Simulation of Highly Preheated and Diluted Air Combustion Furnaces", SID, Vol. 22, No. 2, June 2009 - 107.
- Blasiak W, Dong W, Lille S, "Highly Preheated Air Combustion Research in Sweden", the 2nd International Seminar on High Temperature Combustion, Jan. 17-18, 2000, Stockholm, Sweden.

* صدرنژاد، خطیب الاسلام، کرمانپور، احمد، "سوخت و انرژی"، انتشارات علمی دانشگاه شریف، تهران، ۱۳۸۶.

* نیهانی، نادر، "سوخت و احتراق"، انتشارات ناقوس، چاپ اول، تهران، ۱۳۸۴.