مجموعه مقالات هفتمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران
۲۵ و ۲۴ بهمن ۱۳۹۶، ایران، تهران، دانشگاه صنعتی شریف
FCCI-2018-1038

طراحی و پیاده‌سازی تکنولوژی احتراق بدون شعله در یک بویلر آزمایشگاهی

جواد امینیان
استادیار دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی-دانشگاه شهید بهشتی
j_aminian@sbu.ac.ir

چکیده

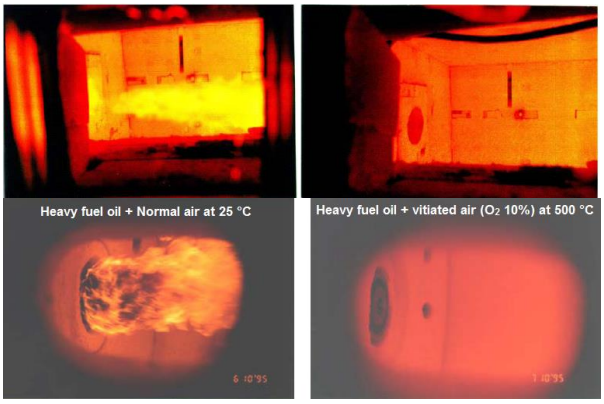
در این مقاله رژیم احتراق بدون شعله در یک بویلر آزمایشگاهی طراحی و پیاده‌سازی گردید. هدف اصلی مشخص کردن عوامل موثر بر پایداری رژیم احتراقی مذکور جهت افزایش راندمان حرارتی (کاهش مصرف سوخت) و به طور همزمان کاهش تولید آلاینده‌ها می‌باشد. وجه تمایز اصلی تحقیق حاضر با تحقیقاتی قبلی در این است که در این آزمایش با استفاده از یک مشعل قدیمی از نوع پیش‌آمیخته و بدون نیاز به جاگزینی آن با مشعلهای پیشرفته فلاکس[1]، که قیمت بالایی دارند، رژیم احتراق بدون شعله در یک بویلر آزمایشگاهی در ابعاد بویلرهای موجود در موتورخانه ساختمانهای مسکونی ایجاد گردیده است. نکته نوآورانه مقاله حاضر در این است که با ترکیب تکنیکهای طراحی مکانیکی (ساخت رکوپراتور راندمان بالا) و طراحی فرآیندی (تنظیم پیشگرمایش و رقیق‌سازی هوا) رژیم احتراق بدون شعله بدون نیاز به تعویض مشعل قدیمی ایجاد گردیده. در تستهای انجام گرفته تمام ویژگیهای کیفی و ظاهری رژیم احتراق بدون شعله نظیر شعله حجیم، کم صدا و کم فروغ حاصل شده است. علاوه بر این، مزایای اصلی احتراق بدون شعله شامل ۱۰٪ کاهش مصرف سوخت در یک راندمان حرارتی یکسان به همراه ۱۳٪ کاهش تولید ناکس و توزیع تقریباً یکنواخت حرارت در بویلر آزمایشگاهی محقق شده است.

کلمات کلیدی: احتراق بدون شعله، تست راندمان حرارتی، تست آلایندگی، مشعل قدیمی، موتورخانه ساختمانها

۱- مقدمه

احتراق بدون شعله یکی از تکنولوژی‌های نوین احتراقی است که در اوایل قرن بیست و یکم مورد توجه بسیاری از محققین و صنعتگران احتراقی در سراسر دنیا قرار گرفت. این رژیم احتراقی برای اولین بار در کشور آلمان تحت عنوان اکسیداسیون بدون شعله[2] مطرح گردید [۱] و از آن پس در کشورهای مختلف تحت عناوین متفاوتی نظیر احتراق با هوای دما بالا[3] و یا رقیق‌سازی متوسط تا زیاد اکسیژن[4] مورد بررسی قرار گرفت.

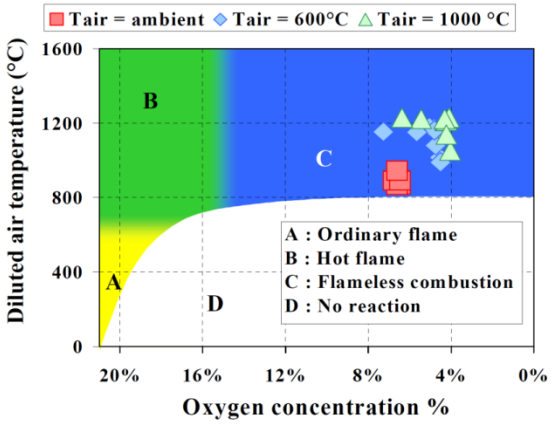
از مزایای تکنولوژی احتراق بدون شعله می‌توان به این موارد اشاره نمود [۲]: ۱-توزیع یکنواخت دما در کل محفظه احتراق. ۲-افزایش راندمان حرارتی (یا کاهش میزان مصرف سوخت در یک راندمان برابر). ۳-کاهش تولید آلاینده‌ها (به دلیل کاهش مصرف سوخت و کاهش دمای بیشینه). ۴-تولید محصولات با کیفیت به دلیل توزیع یکنواخت دما در سراسر محفظه احتراق. ۵-افزایش عمر مشعل و محفظه احتراق به دلیل جلوگیری از ایجاد نقاط داغ ناشی از دمای بیشینه شعله. ۶-عدم تخریب کاتالیست موجود در لوله‌های راکتور (در صورت کاتالیستی بودن فرآیند). ۷-کاهش آلودگی صوتی در مراکز صنعتی به دلیل عدم وجود جبهه شعله که در نتیجه این احتراق به صورت تقریباً بدون صدا انجام می‌گیرد. تمام این مزایا سبب شده که احتراق بدون شعله به طور وسیعی در دهه اخیر مورد توجه قرار گیرد و تحقیقات بسیاری در زمینه تعیین شرایط عملیاتی، مکانیزمها و پارامترهای موثر بر آن انجام شود [۱ تا ۱۲]. شکل (۱) تصویر دو کوره صنعتی با سوخت گاز و مایع را نشان می‌دهد که در دو رژیم احتراق معمولی غیرپیش‌آمیخته و بدون شعله کار می‌کنند.



شکل (۱) محفظه احتراق با سوخت (بالا) گازی و (پایین) سوخت نفت سنگین در شرایط (چپ) احتراق معمولی غیرپیش‌آمیخته (راست) احتراق بدون شعله [۳]

تفسیری از ملزومات رژیم احتراق بدون شعله در شکل (۲) نشان داده شده است. در این شکل محور افقی غلظت اکسیژن در منطقه واکنش و محور عمودی دمای واکنشگرهای درون محفظه احتراق را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با کاهش غلظت اکسیژن ورودی به منطقه واکنش و افزایش همزمان دمای واکنشگرها به دمایی بالاتر از دمای خود اشتعالی، رژیم احتراقی از حالت معمولی به حالت بدون شعله میل می‌کند.

[1] FLOX burner
[2] Flameless Oxidation (FLOX)
[3] High Temperature Air Combustion (HiTAC)
[4] Moderate to Intense Low oxygen Dilution (MILD)



شکل (۲) شرایط عملیاتی در رژیمهای احتراقی مختلف [۳]

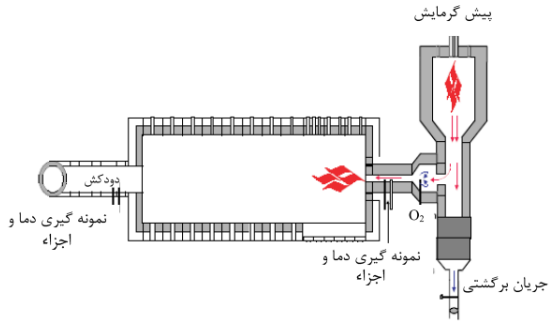
چگونگی پیش‌گرمایش واکنشگرها به دماهای بالا (در حدود دمای خود اشتعالی) برای دستیابی به رژیم احتراق بدون شعله از چالش‌های پیش روی این تکنولوژی محسوب می‌شود. رکوپراتورهای معمولی که مناسب‌ترین گزینه جهت پیش‌گرمایش هوا در صنایع احتراقی هستند به دلیل داشتن راندمان حرارتی پایین نتوانسته‌اند در حوزه احتراق بدون شعله مورد توجه محققین و صنعتگران واقع شوند. در مقابل، تجهیزاتی مانند مشعل‌های ثانویه و هیترهای الکتریکی که استفاده از آنها منجر به صرف منابع انرژی خارجی و کاهش راندمان کلی سیستم می‌شود فقط جهت انجام تحقیقات در مقیاس آزمایشگاهی قابل استفاده می‌باشند و کاربرد صنعتی ندارند. از دیگر چالشهای پیش‌روی این تکنولوژی، لزوم استفاده از مشعلهای ویژه و گران قیمت جهت پیاده‌سازی آن در صنایع مختلف است. به عبارت دیگر، تاکنون هیچ گزارش تحقیقاتی یا تجاری مبنی بر پیاده‌سازی احتراق بدون شعله با مشعلهای سنتی و قدیمی در مقیاس آزمایشگاهی و یا صنعتی ارائه نشده است. در ادامه مهم‌ترین پژوهش‌های تجربی صورت گرفته در حوزه احتراق بدون شعله با تمرکز بر نحوه پیش‌گرمایش هوا و همچنین معرفی مشعلهای مدرن مورد نیاز ارائه می‌گردد.

۲- چالش اول تکنولوژی احتراق بدون شعله: نحوه پیشگرمایش هوا

۲-۱- استفاده از مشعل ثانویه

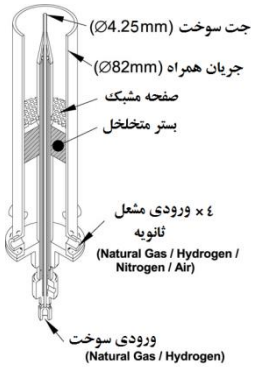
مشعل‌های ثانویه عمدتاً به منظور راه‌اندازی[1] ابتدایی سیستم‌های احتراقی با مقیاس بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرند. هنگامیکه محفظه احتراق سرد است راه‌اندازی سیستم توسط مشعل‌های اصلی ممکن است به طول بیانجامد. برای حل این مشکل می‌توان از مشعل‌های ثانویه (کمکی) استفاده نمود. این مشعل‌ها که توان حرارتی کمتری نسبت به مشعل‌های اصلی دارند پس از راه‌اندازی سیستم از مدار خارج می‌شوند. در حوزه احتراق بدون شعله برخی از پژوهشگران از مشعل‌های ثانویه به عنوان ابزار پیش‌گرمایش هوا استفاده کرده‌اند. همان‌طور که در ادامه خواهیم دید در تحقیقات آنها مشعل ثانویه به طور پیوسته در مدار بوده و پیش‌گرمایش هوا تا دماهای بسیار زیاد را به طور مداوم انجام می‌دهد. بنابراین، در این سیستم‌ها از دو مشعل اصلی و ثانویه استفاده می‌شود که هر کدام از آنها سوخت و هوای مستقل دریافت می‌کنند. این امر منجر به افزایش چشمگیر مصرف سوخت و به تبع آن کاهش راندمان کلی سیستم می‌گردد.

وبر و همکارانش [۴] در سال ۲۰۰۰ بر روی یک کوره پایلوت با توان ۰/۵۸ مگاوات موجود در IFRF[2]، احتراق گاز طبیعی با هوای پیش‌گرم شده (۱۳۰۰C) را در رژیم احتراق بدون شعله مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده افزایش ۶۰ درصدی نرخ تابش گرمایی را در حالت احتراق بدون شعله نسبت به احتراق معمولی نشان داد. کوره مورد مطالعه شامل محفظه احتراقی با مقطع عرضی $2*2\ m^2$ و طول ۶/۲۵ m می‌باشد که در شکل (۳) به صورت شماتیک نشان داده شده است. در این سیستم هوای پیش‌گرم شده توسط مشعل ثانویه از نازل مرکزی و سوخت گازی از دو نازل پیرامونی به محفظه احتراق تزریق می‌شوند.



شکل (۳) کوره نیمه صنعتی موجود در IFRF [۴]

دالی و همکارانش در سال ۲۰۰۲ مطابق شکل (۴) از یک مشعل آزمایشگاهی برای بررسی ساختار رژیم احتراق بدون شعله بهره گرفتند [۵].



شکل (۴) شماتیک مشعل استفاده شده در آزمایش دالی و همکارانش [۵]

این مشعل که به نام "جت در اکسیدکننده داغ[3]" شناخته می‌شود شامل یک نازل مرکزی با قطر داخلی ۴/۲۵ mm می‌باشد که مخلوطی از متان و هیدروژن

[1] Start-up

[2] International Flame Research Foundation

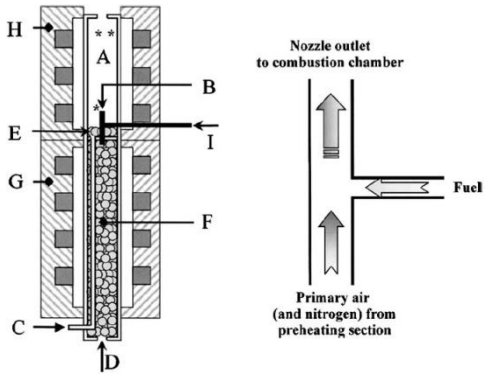
[3] Jet-in-Hot Coflow (JHC) burner

با حجم‌های برابر را با عدد رینولدز حدود ۱۰۰۰۰ به داخل اکسیدکننده داغ تزریق می‌کند. نازل تزریق سوخت توسط یک آنالوس هم مرکز با قطر ۸۲ mm احاطه شده است که جریان اکسیدکننده داغ و رقیق‌شده را به منطقه واکنش تزریق می‌نماید. به منظور جلوگیری از اتلاف حرارتی به محیط، آنالوس مورد نظر از جنس سرامیک ساخته شده است. نکته مورد نظر در این است که درون آنالوس یک مشعل ثانویه قرار گرفته که علاوه بر گرم‌کردن اکسیدکننده بخشی از محصولات احتراق را برای رقیق‌سازی اکسیدکننده به منطقه واکنش هدایت می‌کند. بنابراین، برای پیش‌گرمایش اکسید کننده، سوخت اضافی در مشعل ثانویه مصرف می‌شود که در صنعت قابل توجیه و استفاده نیست.

۲-۲- استفاده از هیتر الکتریکی

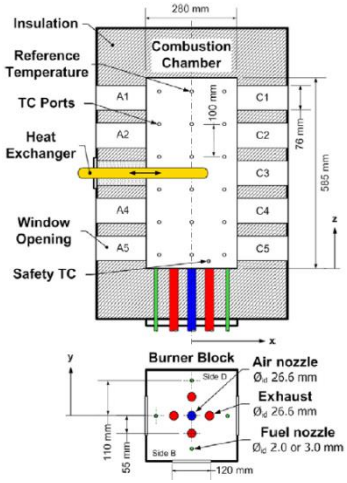
از آنجاکه احتراق بدون شعله جزء تکنولوژی‌های نوین در عرصه احتراق محسوب می‌شود و هنوز بسیاری از مکانیزم‌های مرتبط با این رژیم احتراقی مجهول است، بسیاری از محققین اقدام به طراحی و ساخت کوره‌های احتراقی در مقیاس آزمایشگاهی نموده‌اند. در این مطالعات صرفاً پیش‌گرمایش واکنش‌دهنده‌ها به دمای بالاتر از دمای خود اشتعالی مخلوط سوخت و اکسیدکننده مد نظر بوده و اقتصادی بودن نحوه پیش‌گرمایش دور از نظر قرار گرفته است. بنابراین، استفاده از هیترهای الکتریکی که می‌توانند حجم اندکی از هوا را تا دماهای بالا گرم کنند مورد استفاده قرار گرفته است.

برای مثال، کاوالیگولو و همکارانش [۶] در سال ۲۰۰۳ اثر میزان بازگردش گازهای حاصل از احتراق به منطقه واکنش را بر تغییر رژیم احتراق از حالت معمولی به حالت بدون شعله در یک مشعل پایلوت که با سوخت متان و اتان کار می‌کرد بررسی نمودند. سیستم مورد مطالعه آنها، مطابق شکل (۵)، یک سیلندر شیشه‌ای بسته از جنس کوارتز بود که از لحاظ ساختاری به دو بخش محفظه احتراق و بخش پیش‌گرمایش هوا تقسیم می‌شد. قطر داخلی محفظه احتراق ۵۰ mm و طول آن ۳۷۰ mm بود. همان طور که از شکل (۵) بر می‌آید، جریانهای سوخت و هوای اولیه[1] (هوای پیش‌گرم شده مورد نیاز برای دستیابی به رژیم احتراق بدون شعله) به صورت عمود بر هم اختلاط می‌یابند و به این ترتیب جریانی نیمه پیش آمیخته قبل از ورود به محفظه احتراق پدید می‌آید. هوای اولیه به صورت مستقیم وارد بخش پیش‌گرمایش شده و پس از دریافت حرارت با سوخت مخلوط می‌گردد. قبل از دستیابی به رژیم احتراق بدون شعله، محفظه احتراق می‌بایستی با استفاده از احتراق معمولی راه‌اندازی و پیش‌گرم شود. به همین منظور در این مطالعه با استفاده از هوای موسوم به هوای ثانویه ، که از طریق لوله‌ای از میان بخش پیش‌گرمایش عبور می‌کند، هوای مورد نیاز احتراق در حالت معمولی تأمین گردیده است. حرارت لازم برای پیش‌گرمایش هوا تا دمای ۱۳۰۰، توسط یک هیتر الکتریکی تأمین می‌شود. به منظور افزایش حرارت منتقل شده به هوا، ناحیه پیش‌گرمایش توسط ساچمه‌های ساخته شده از کوارتز پر شده است.



شکل (۵) (راست) نازل تزریق سوخت و هوا (چپ) طرح کلی مشعل پایلوت A: محفظه احتراق B: نازل C: ورود هوای ثانویه D: ورودی هوای اولیه E: ساچمه‌های کوارتزی F: ناحیه پیش گرمایش G: هیتر الکتریکی اصلی H: هیتر الکتریکی بالایی برای کاهش دفع حرارت I: ورود سوخت *: موقعیت ترموکوپل‌ها [۶]

سزوگ و همکارانش [۷] در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ به طراحی و آزمایش کوره احتراقی MILD[2] با توان ۲۰kW و با قابلیت استفاده از سوخت‌های گازی CNG و LPG پرداخته و اندازه‌گیری‌های مربوط به دما و ترکیب درصد محصولات احتراق را در دو حالت احتراق معمولی و احتراق بدون شعله گزارش کردند. شکل (۶) طرح کلی کوره احتراق مورد مطالعه را نشان می‌دهد. محفظه احتراق به طول ۵۸۵ mm و مقطع عرضی ۲۸۰*۲۸۰ mm^2 می‌باشد. در این مطالعه به منظور پیش‌گرمایش هوای احتراق از یک هیتر الکتریکی با قابلیت افزایش دمای هوا تا ۵۴۰°C استفاده گردید. نتایج آزمایش حاکی از این بود که برای سیستم احتراقی مورد مطالعه، مومنتوم جت سوخت پایداری احتراق بدون شعله را کنترل می‌کند.

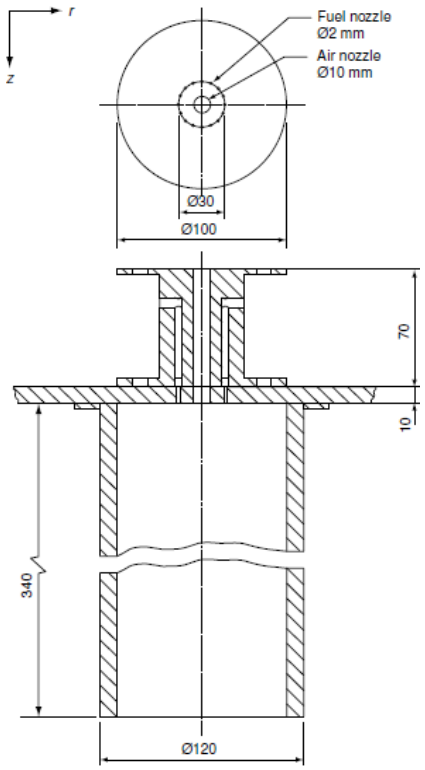


شکل (۶) طرح کلی کوره احتراق MILD [۷]

[1] Primary air

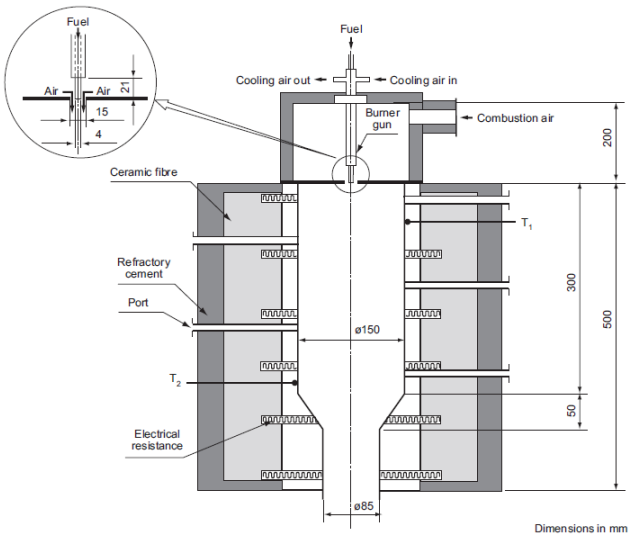
[2] Moderate to Intense Low oxygen Dilution

ورسیمو و همکارانش [۸] طی سالهای ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۵ مطالعات جامعی روی پارامترهای تأثیرگذار بر رژیم احتراق بدون شعله در یک محفظه احتراق آزمایشگاهی با سوخت متان انجام دادند. پژوهش‌های صورت گرفته شامل بررسی اثر دمای هوای پیش‌گرم شده، درصد هوای اضافه، توان حرارتی سوخت[1] و سرعت هوای ورودی بر ترکیب درصد دود و همچنین رادیکال هیدروکسیل (OH*) تولیدی می‌باشند. آنها با استفاده از روش تصویرسازی نورتابی شیمیایی[2]، نواحی تشکیل رادیکال هیدروکسیل را مورد بررسی قرار دادند. از آنجاکه رادیکال هیدروکسیل به علت طول عمر کوتاه تنها در ناحیه واکنش[3] امکان نورتابی شیمیایی دارد، روش ذکر شده می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را از موقعیت و اندازه ناحیه واکنش نتیجه دهد. محفظه احتراق مورد مطالعه یک سیلندر شیشه‌ای از جنس کوارتز، با قطر داخلی ۱۰۰mm و طول ۳۴۰mm می‌باشد که شماتیک آن در شکل (۷) به همراه مشعل تعبیه شده در آن نشان داده شده است. مشعل شامل یک نازل با قطر ۱۰mm برای تأمین هوای احتراق و ۱۶ نازل پیرامونی با قطر ۲mm برای تأمین سوخت متان می‌باشد. در این مطالعه یک سیستم گرمایش الکتریکی هوای مورد نیاز احتراق را تا دمای ۷۰۰°C پیش‌گرم می‌کند.



شکل (۷) طرح کلی محفظه احتراق به همراه مشعل تعبیه شده [۸]

ربولا و همکارانش [۹] در سال ۲۰۱۳ با اندازه‌گیری دمای موضعی و غلظت اجزا در یک کوره آزمایشگاهی، تأثیر دمای هوای پیش‌گرم‌شده، درصد هوای اضافه، توان حرارتی سوخت و سرعت هوای ورودی را بر ترکیب درصد دود و همچنین راندمان احتراق در رژیم احتراق بدون شعله مورد مطالعه قرار دادند. همان طور که از شکل (۸) بر می‌آید، محفظه احتراق شامل یک سیلندر با قطر داخلی ۱۵۰mm و طول ۳۰۰mm و مشعل شامل یک نازل با قطر داخلی ۴mm برای تأمین سوخت متان می‌باشد. در این کوره اختلاط بین دود و هوای ورودی قبل از وارد شدن واکنش‌دهنده‌ها به محفظه احتراق صورت می‌گیرد. در این مطالعه حرارت مورد نیاز برای پیش‌گرمایش هوا تا دمای ۷۰۰°C، توسط سیستم گرمایش الکتریکی تأمین شده است. این سیستم علاوه بر پیش‌گرمایش هوا وظیفه پیش‌گرم کردن دیواره‌های محفظه احتراق تا دمای ۹۰۰°C را بر عهده دارد.



شکل (۸) طرح کلی کوره آزمایشگاهی ربولا و همکارانش [۹]

با توجه به نیاز به دمای پیشگرمایش بالا در رژیم احتراق بدون شعله، ملاحظه می شود که تکنیک رایج برای پیش گرمایش هوای احتراق در تمامی تحقیقات اخیر استفاده از هیترهای الکتریکی بوده است. همانند مشعلهای ثانویه، پیش‌گرمایش هوا توسط هیترهای الکتریکی در مقیاس‌های بزرگ صنعتی هیچگونه توجیه اقتصادی نداشته و صرفاً در مقیاس‌های آزمایشگاهی و کوچک مورد توجه پژوهشگران احتراقی می‌باشد. یک راهکار عملیاتی و صنعتی برای پیش‌گرمایش هوای احتراق تا دماهای بالا استفاده از انواع مشعلهای بازیاب[4] می‌باشد که به دلیل ساختار ویژه محدود به کاربردها و صنایع خاص بوده که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

[1] Fuel thermal input
[2] Chemiluminescence imaging
[3] Reaction zone
[4] Regenerative/recuperative burners

۳- چالش دوم تکنولوژی احتراق بدون شعله: استفاده از مشعلهای خاص

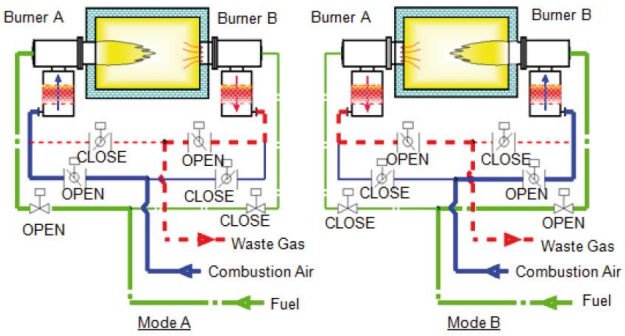
مشعلهای بازیاب که به دو دسته رکوپریتیو و رجنریتیو تقسیم‌بندی می‌شوند یک راهکار صنعتی برای پیاده‌سازی تکنولوژی احتراق بدون شعله به شمار می‌روند. شکلهای (۹) و (۱۰) به ترتیب یک نمونه از مشعلهای رکوپریتیو و رجنریتیو را نشان می‌دهند. تفاوت دو مشعل مذکور در شیوه بازیاب حرارت از دود و انتقال آن به هوای احتراق است.

مطابق شکل (۹) در یک مشعل رکوپریتیو، هوا از یک مجرای حلقوی داخلی (در شکل فقط نوک مشعل مشخص است) که در تماس با سطح انتقال حرارت پره‌دار[1] است به محفظه احتراق تزریق می‌شود و همزمان دود داغ از روی سطح انتقال حرارت پره‌دار عبور کرده و پس از پیشگرمایش هوای احتراق از کانال حلقوی انتهای مشعل، مشخص شده در شکل (۹)، خارج می‌شود.

شکل (۹) یک نمونه مشعل بازیاب رکوپریتیو [۱۰]

اما در مشعلهای رجنریتیو سطح انتقال حرارت بین هوا و دود حذف شده و هوای احتراق مستقیماً از منافذ سرامیکی می‌گذرد که قبلاً توسط دود داغ شده‌اند. لذا، با حذف مقاومت حرارتی دیواره، راندمان مشعلهای رجنریتیو از مشعلهای رکوپریتیو بیشتر می‌شود. اما از طرفی به دلیل عملکرد خاص، کاربرد مشعلهای رجنریتیو پیچیده‌تر از نوع رکوپریتیو است. مطابق شکل (۱۰) یک نمونه مشعل رجنریتیو شامل شش جفت نازل است که به صورت متناوب برای پاشش سوخت و هوا و سپس برای خروج دود استفاده می‌شوند. برای اینکه عملکرد کوره‌های مجهز به مشعلهای رجنریتیو به صورت مداوم باشد بایستی مطابق شکل (۱۱) این مشعلها را به صورت زوجی و روبروی هم استفاده نمود. در مدت زمان مشخصی که یک مشعل نقش تزریق‌کننده سوخت و هوا را ایفا می‌کند، مشعل روبرو نقش دودکش داشته و محیط سرامیکی متخلخل داخل آن تا حدود ۱۲۰۰ °C توسط دود گرم می‌شود. سپس، مشعل اول خاموش شده، نقش دودکش را پیدا می‌کند و مشعلی که سرامیک آن داغ شده هوا و سوخت را پیشگرم کرده و به محفظه احتراق تزریق می‌کند. با انجام بازیابی مؤثر حرارت دود در این مشعلها میزان مصرف سوخت تا حد زیادی کاهش می‌یابد. اما محدودیت کاربرد مشعلهای رجنریتیو به دلیل عملکرد خاصی که دارند از نوع رکوپریتیو بیشتر بوده و عمدتاً برای کوره‌های خاصی در صنایع ذوب شیشه و فولاد استفاده می‌شوند.

شکل (۱۰) یک نمونه مشعل بازیاب رجنریتیو [۱۰]



	Mode A	Mode B
Burner A	Combustion	Regeneration
Burner B	Regeneration	Combustion

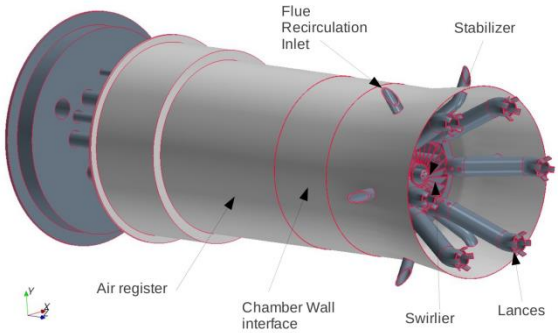
شکل (۱۱) نحوه عملکرد مشعلهای بازیاب رجنریتیو [۱۱]

ملاحظه می‌شود که همه مشعلهای بازیاب اعم از رکوچریتیو یا رجنریتیو در دو نقش اساسی عمل می‌کنند: ۱-تزریق سوخت و هوا ۲-تخلیه دود. به عبارت دیگر، مشعلهای بازیاب فقط در کوره‌های خاصی نظیر ذوب شیشه یا شکل‌دهی فولاد کاربرد دارند که در آنها دودکش سنتی از کوره حذف شده و در مقابل، مشعلهای بازیاب نقش دودکش را ایفا می‌کنند. بنابراین، از نقاط ضعف مشعلهای بازیاب علاوه بر هزینه نسبتاً بالا، می‌توان به محدودیت کاربرد آنها، صرفاً در مواردیکه امکان حذف دودکش سنتی را دارند اشاره نمود.

باتوجه به محدودیتهای زیاد مشعلهای بازیاب، در سالهای اخیر کنسرسیومی متشکل از شرکتهای ایتالیایی Macchi و Sofinter که از سازندگان بنام انواع بویلرهای نیروگاهی هستند مشعلهایی با تکنولوژی احتراق بدون شعله را برای بویلرهای صنعتی که امکان حذف دودکش را ندارند توسعه داده‌اند [۱۲]. هدف این طرح ساخت بویلرهای ۳۰ مگاواتی مجهز به مشعلهای Low-NOx با قابلیت استفاده از سوخت گاز طبیعی و سوخت مایع است. در این طرح مطابق

[1] Finned heat transfer surface

شکل (۱۲) مسیرهای بازگردش دود[1] را به نوک مشعل اضافه نموده‌اند. توسط این لوله‌های بازگردش، در اثر فشار منفی نوک مشعل دود داغ به داخل مشعل بازگردش داده شده و منجر به پیش‌گرمایش سوخت می‌شود. در این طرح دیگر نیازی به حذف دودکش از محفظه احتراق و یا استفاده زوجی نیست. درنتیجه این نوع مشعلها برای بویلرها و کوره‌های صنعتی جهت پیاده‌سازی احتراق بدون شعله کاربرد خواهند داشت، البته با هزینه سرمایه‌گذاری بالا جهت تعویض مشعلهای قدیمی با مشعلهای جدید.



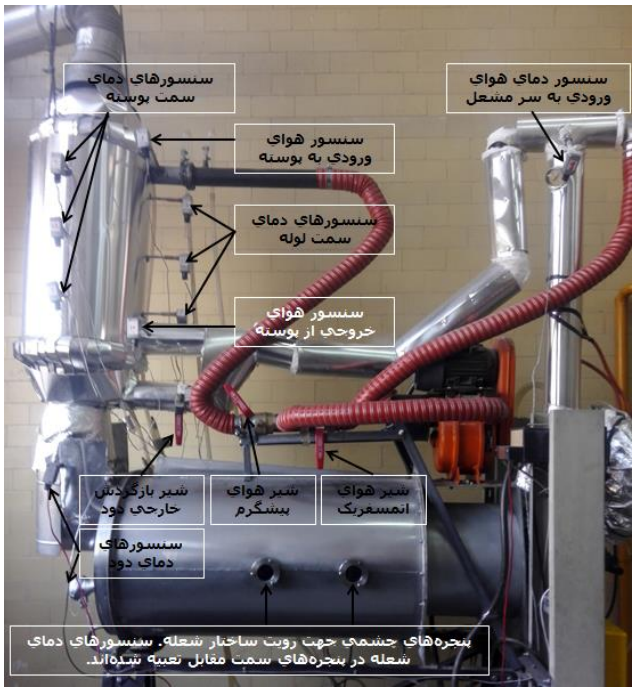
شکل (۱۲) مشعل جدید طراحی شده برای رژیم احتراق بدون شعله توسط شرکت Macchi ایتالیا [۱۲]

با توجه به این موارد این سوال مطرح می‌شود که آیا برای پیاده‌سازی احتراق بدون شعله بایستی حتماً از مشعلهای گران قیمت بازیاب استفاده نمود؟ یا به عبارت دیگر، آیا می‌توان احتراق بدون شعله را در کوره‌ها و بویلرهای سنتی که امکان حذف دودکش را ندارند با هزینه پایینتر پیاده‌سازی نمود؟ در ادامه با توسعه یک روش نوآورانه که ترکیبی از تکنیکهای طراحی مکانیکی و طراحی فرآیندی است، امکانسنجی فنی پیاده‌سازی احتراق بدون شعله در یک بویلر آزمایشگاهی که مجهز به یک مشعل پیش‌آمیخته سنتی است مورد بررسی قرار می‌گیرد. این تحقیق تجربی تحت حمایت مالی سازمان توسعه برق ایران و در ادامه شرکت مادر تخصصی تولید برق حرارتی در آزمایشگاه نیروگاه بخار پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور انجام گرفته است.

۴- پیاده‌سازی احتراق بدون شعله در یک بویلر آزمایشگاهی

۴-۱-معرفی بویلر آزمایشگاهی و تجهیزات اندازه‌گیری

شکل (۱۳) بویلر آزمایشگاهی، در ابعاد بویلرهای ساختمانهای مسکونی، و رکوپراتور نصب شده در مسیر دود بویلر به همراه شیرهای دستی و سنسورهای دما جهت پایش آنلاین دمای دود و هوا در نقاط مختلف را نشان می‌دهد. در مجموع ۱۲ سنسور نوع k توسط ۱۲ کارت کنترل فرآیند به مانیتور متصل شده‌اند تا امکان بررسی و ذخیره‌سازی اطلاعات دمایی در طول تستهای مختلف فراهم گردد. همچنین، مطابق شکل (۱۴) و (۱۵) ترکیب محصولات احتراق و افت فشار رکوپراتور توسط آنالایزر پرتابل اندازه‌گیری گردید. ترکیب محصولات احتراق جهت بررسی میزان تولید آلاینده‌های NO و CO و همچنین میزان حضور اکسیژن در دود مورد استفاده قرار گرفت. جهت بررسی احتمال گرفتگی مبدل در اثر رسوب‌گذاری دود نیز میزان افت فشار مبدل در دوره‌های مختلف اندازه‌گیری وثبت گردید.



شکل (۱۳) نمای کامل رکوپراتور و بویلر آزمایشگاهی به همراه سنسورها و شیرهای نصب شده بر روی آن

مطابق شکل (۱۴) ملاحظه می‌شود که حداکثر افت فشار رکوپراتور کمتر از ۱۵ میلی‌بار بوده و در طول یک سال انجام آزمایشهای مختلف تغییر محسوسی نکرد. این امر نشانگر عدم تشکیل رسوب در رکوپراتور می‌باشد.

شکل (۱۴) اندازه‌گیری افت فشار رکوپراتور با آنالایزر پرتابل برحسب میلی‌بار

[1] Flue recirculation inlet

شکل (۱۵) اندازه‌گیری ترکیب درصد محصولات احتراق

۴-۲-تکنیک عملیاتی پیاده‌سازی احتراق بدون شعله

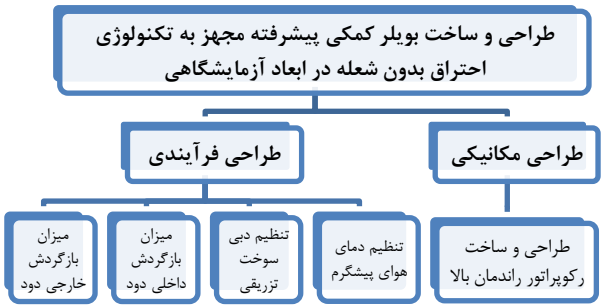
در این پروژه تاکید بر پیاده‌سازی یک رژیم احتراقی جدید در بویلر آزمایشگاهی موجود و مشخص کردن عوامل موثر بر پایدارسازی رژیم احتراق بدون شعله جهت:

- کاهش مصرف سوخت
- کاهش تولید آلاینده‌ها

می‌باشد. مطابق شکل (۱۶) مبحث طراحی در این پروژه در دو فاز مجزا و البته کاملاً مرتبط با یکدیگر انجام شده است که عبارتند از:

۱. طراحی مکانیکی
۲. طراحی فرآیندی

در فاز طراحی مکانیکی برای رسیدن به رژیم احتراق بدون شعله نیاز به پیشگرمایش هوای احتراق تا سطوح بالای حرارتی می‌باشد که با استفاده از مبدلهای حرارتی رایج موجود در بازار این امر امکان‌پذیر نیست. از این رو در این پروژه یک رکوپراتور راندمان بالا شبیه‌سازی، طراحی و ساخته شده است. جزئیات روند شبیه‌سازی با تکنیک CFD، طراحی مکانیکی و ساخت رکوپراتور راندمان بالا خارج از هدف اصلی مقاله حاضر است.



شکل (۱۶) مراحل اصلی پیاده‌سازی رژیم احتراق بدون شعله در بویلر آزمایشگاهی موجود

در فاز طراحی فرآیندی جهت پایدارسازی احتراق بدون شعله درون بویلر آزمایشگاهی موجود متغیرهای مختلفی از قبیل:

- تنظیم دمای هوای پیشگرم،
- تنظیم دبی سوخت تزریقی،
- تنظیم بازگردش داخلی بخشی از دود توسط دمپر تعبیه شده در دودکش،
- رقیق‌سازی هوای پیشگرم شده توسط بازگردش خارجی بخشی از دود،

مورد بررسی قرار گرفته‌اند که نتیجه حاصل از تستهای متعدد انجام گرفته بر روی مجموعه بویلر آزمایشگاهی و رکوپراتور جدید در ادامه تشریح می‌شوند.

۴-۳- بررسی اثر پارامترهای عملیاتی بر رژیم احتراقی

در این پروژه تستهای متعددی در شرایط عملیاتی مختلف با هدف بررسی پارامترهای عملیاتی مختلف انجام گرفت که به دلیل محدودیت بحث امکان تشریح کامل آنها وجود ندارد. جدول (۱) میزان بازگردش خارجی دود، و میزان بازگردش داخلی دود (درصد بازشدگی دمپر مسدود کننده جریان دود) را به همراه اطلاعات نسبت هم‌ارزی و درصد هوای اضافه برای مجموعه تست احتراق شماره ۴ نشان می‌دهد. براساس دبی سوخت گاز طبیعی تزریق شده و با در نظر گرفتن ارزش حرارتی گاز طبیعی برابر MJ/kg ۴۹، توان حرارتی بویلر در مجموعه تست شماره ۴ بین ۲۵٫۵ تا ۲۹٫۴ کیلووات به دست می‌آید. در همه تستها میزان هوای اضافه با پایش اکسیژن دود توسط آنالایزر پرتابل اندازه‌گیری شده است.

جدول (۱) بررسی اثر میزان بازگردش خارجی دود بر راندمان حرارتی بویلر در مجموعه تست شماره ۴

کد تست	دبی سوخت گاز طبیعی (gr/sec)	میزان باز بودن دمپر بازگردش داخلی دود (٪)	میزان بازبودن شیر بازگردش خارجی دود (٪)	نسبت هم‌ارزی (Ø)	دمای هوای احتراق (°C)	دبی آب تزریقی (Lit/hr)	توان حرارتی منتقل شده به آب (kW)	راندمان حرارتی بویلر (%)
F4-01	۰٫۶۰	٪۱۰۰	۰	۰٫۸۱	۳۶	۷۹۰	۱۷٫۴۳	۶۰٫۸۱
F4-02	۰٫۶۰	٪۱۰۰	۰	۰٫۸۳	۲۷۹	۷۹۰	۱۸٫۳۵	۶۴٫۰۱
M4-03	۰٫۶۰	٪۱۰۰	٪۲۵	۰٫۹۰	۲۳۹	۷۹۵	۱۹٫۸۵	۶۹٫۲۵
F4-04	۰٫۶۰	٪۱۰۰	٪۵۰	۰٫۹۶	۲۰۴	۷۹۵	۱۸٫۴۷	۶۴٫۴۲
F4-05	۰٫۵۲	٪۱۰۰	۰	۰٫۸۵	۲۵۹	۸۰۵	۱۴٫۹۶	۵۹٫۹۰
M4-06	۰٫۵۲	٪۱۰۰	٪۲۵	۰٫۹۱	۲۵۷	۷۸۰	۱۶٫۳۱	۶۵٫۳۰
F4-07	۰٫۵۲	٪۱۰۰	٪۵۰	۰٫۹۷	۲۳۵	۷۸۰	۱۵٫۸۵	۶۳٫۴۹

در تستهای قبل (در اینجا تشریح نشده‌اند) ملاحظه گردید که بازگردش داخلی دود که در نتیجه بستن جزئی دمپر دود حاصل می‌شود اثر چندانی بر راندمان حرارتی بویلر ندارد. علت این امر می‌تواند تقابل میان افزایش زمان اقامت دود در محفظه احتراق با کاهش زمان اقامت دود در رکوپراتور باشد. مورد اول سبب افزایش فلاکس حرارتی به جداره آب اطراف شده و بالطبع راندمان بویلر را افزایش می‌دهد. اما مورد دوم سبب کاهش نرخ انتقال حرارت به هوای احتراق شده و درنتیجه راندمان بویلر کاهش می‌یابد. تقابل این دو عامل در محفظه احتراق و رکوپراتور موجود سبب شده است که بازگردش داخلی دود

اثر چندانی بر راندمان حرارتی بویلر نداشته باشد. البته این نتیجه کاملاً موردی و مختص شرایط این مسئله است. در مقیاسهای بزرگتر و هندسه‌های متفاوت، بایستی میزان تقابل این دو پارامتر با یکدیگر سنجیده شود. به هر حال، در این پروژه با توجه به اینکه بازگردش داخلی دود اثر مهمی بر راندمان بویلر نداشته، در تمامی تستهای مجموعه شماره ۴، دمپر دود کاملاً باز نگه داشته شده است. هدف از انجام مجموعه تست شماره ۴ دستیابی به رژیم احتراق بدون شعله با ثابت نگه داشتن دمای آب خروجی است. به عبارت دیگر، امکان رسیدن به ویژگیهای احتراق بدون شعله نظیر توزیع یکنواخت دما در محفظه احتراق، کاهش تولید آلاینده‌ها و افزایش راندمان بویلر با حفظ دمای آب خروجی در این تست مورد بررسی قرار گرفت. در این مجموعه، دو سری تست احتراقی با دبی‌های ۰٫۶ و ۰٫۵۲ گرم بر ثانیه تزریق گاز طبیعی انجام گرفت که اطلاعات آنها در جدول (۱) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در هر دو دبی ۰٫۶ و ۰٫۵۲ گرم بر ثانیه تزریق گاز طبیعی، تستهای M4-03 و M4-06 که در آنها میزان گشودگی شیر بازگردش خارجی دود ۲۵٪ است بیشترین راندمان حرارتی بویلر حاصل شده است. با افزایش گشودگی شیر بازگردش خارجی دود تا ۵۰٪ در هر دو دبی، مشاهده می‌شود که راندمان حرارتی بویلر افت می‌کند.

۴-۴- بررسی حصول ویژگیهای رژیم احتراق بدون شعله

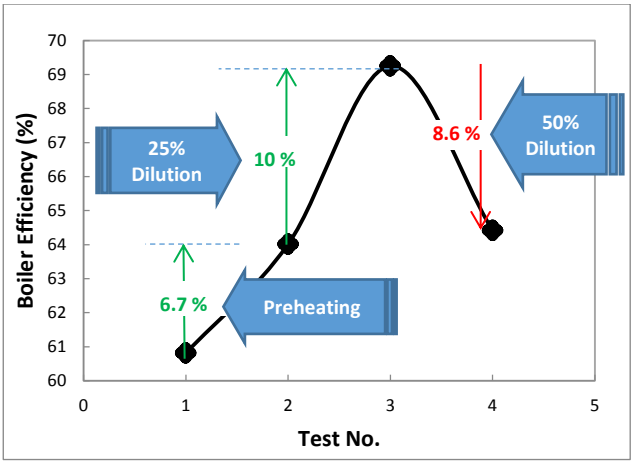
ویژگیهای مطلوب رژیم احتراق بدون شعله نسبت به احتراق معمولی که در این پروژه به دنبال بررسی و پیاده‌سازی آن هستیم عبارتند از:

- افزایش راندمان احتراق
- بلند و حجیم شدن شعله (افزایش فلاکس حرارتی منتقل شده به دیواره بویلر)
- کاهش تولید آلاینده‌های NOx و CO (به دلیل کاهش حداکثر دمای شعله)

۴-۴-۱- افزایش راندمان احتراق

مطابق شکل (۱۷) در تست شماره ۱ (کد F4-01 در جدول (۱)) احتراق معمولی ۰٫۶ gr/s گاز طبیعی با هوای اتمسفریک (دمای محیط ۱۵ °C و غلظت اکسیژن ۲۱٪ حجمی) انجام شده است که پس از گذشت ۱ ساعت به منظور پایا شدن شرایط سیستم، راندمان ۶۰٫۸۱٪ برای بویلر به دست آمده است. در ادامه با پیشگرم کردن هوای احتراق تا دمای ۲۷۹ °C راندمان بویلر به ۶۴٪ رسید که حدود ۶٫۷ درصد افزایش را نشان می‌دهد. در مرحله بعد با حفظ پیشگرمایش هوا، شیر بازگردش خارجی دود تا ۲۵٪ باز شد که منجر به رقیق شدن هوای ورودی به سر مشعل می شود.

رقیق‌سازی جریان هوای پیشگرم باعث کند شدن واکنشهای احتراقی سوخت و "اکسیژن محدود[1]" شده و امکان فرار سوخت و اکسیژن از نواحی دما بالای شعله به مناطق پایین دست و انجام "احتراق تضعیف شده[2]" را فراهم می‌نماید. درنتیجه، با رقیق‌سازی جریان هوای پیشگرم طول و حجم شعله بزرگتر شده و فلاکس حرارتی بیشتری به جداره آب اطراف بویلر منتقل می‌شود.



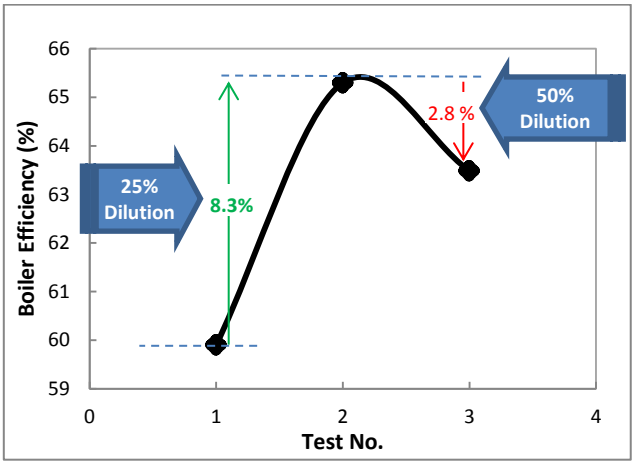
شکل (۱۷) بررسی اثرات پیشگرمایش و رقیق‌سازی هوای احتراق بر راندمان بویلر در دبی ۰٫۶ gr/s گاز شهری

با این کار راندمان بویلر با افزایش ۱۰ درصدی به بیش از ۶۹٪ می‌رسد. ذکر دو نکته در اینجا ضروری است. اول اینکه با بازکردن شیر بازگردش خارجی دود، بخشی از دودی که وارد لوله‌های رکوپراتور می‌شده برای رقیق‌سازی هوا استفاده می‌شود و درنتیجه راندمان رکوپراتور به میزان جزئی افت می‌کند. این امر را می‌توان از کاهش دمای پیشگرم از ۲۷۹ °C در تست F4-02 به ۲۳۹ °C در تست M4-03 (جدول (۱)) مشاهده نمود. اما حجیم شدن و بلند شدن شعله در محفظه احتراق این کاهش پیشگرمایش هوا را جبران نموده و فلاکس حرارتی بیشتری که به دیواره بویلر منتقل می‌شود نهایتاً منجر به افزایش راندمان بویلر می‌گردد. نکته دوم اینکه رقیق‌سازی جریان هوای اتمسفریک (۲۱٪ اکسیژن) به مقادیر پایینتر توسط بازگردش خارجی جریان دود، طبیعتاً منجر به کاهش انتالپی حاصل از احتراق می‌شود. اما پیشگرمایش هوا نسبت به احتراق معمولی (تست F4-01) این کاهش را جبران کرده و نهایتاً این تقابل منجر به افزایش انرژی حاصل از احتراق و درنتیجه افزایش راندمان بویلر می‌شود. از اینرو است که جهت نیل به ویژگیهای مطلوب احتراق بدون شعله در شرایط صنعتی، پیشگرمایش هوا به مقادیر زیاد و رقیق‌سازی آن به مقادیر کنترل شده به طور همزمان مورد نیاز است.

در تست چهارم نشان داده شده در شکل (۱۷) ملاحظه می‌شود که رقیق‌سازی بیشتر هوا توسط بازکردن شیر بازگردش خارجی دود به مقدار ۵۰ درصد منجر به کاهش راندمان بویلر به میزان ۸٫۶ درصد شده است. علت این امر کند شدن بیش از حد واکنشهای احتراقی درنتیجه کمبود زیاد اکسیژن برای واکنش با سوخت بوده که راندمان بویلر را تا ۶۴٫۴٪ کاهش داده است. بنابراین، ملاحظه می‌شود که برای نیل به حداکثر راندمان بویلر که حاصل از تغییر رژیم احتراقی به شرایط بدون شعله است، مقادیر مناسب رقیق‌سازی هوا برای سوختهای مختلف مورد نیاز است. برای اطمینان از نتایج حاصل از این تست، آزمایشهای پیشگرمایش و رقیق‌سازی هوا برای دبی سوخت ۰٫۵۲ gr/s مجدداً تکرار شد. شرایط عملیاتی و نتایج حاصل از تست جدید در ردیفهای ۵ تا ۷ جدول (۱) و همچنین شکل (۱۸) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که ۲۵٪ گشودگی شیر بازگردش خارجی دود منجر به رقیق‌سازی مناسب هوای پیشگرم و

[1] Deficient oxygen
[2] Vitiated combustion

افزایش راندمان بویلر به میزان ۸٫۳ درصد شده است. اما افزایش گشودگی شیر بازگردش خارجی به ۵۰٪ راندمان بویلر را ۲٫۸ درصد کاهش داده است.



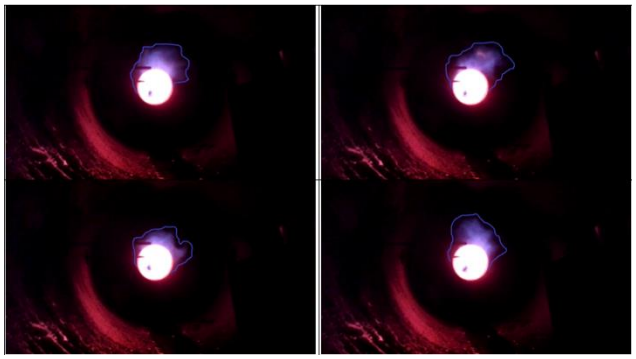
شکل (۱۸) بررسی اثرات پیشگرمایش و رقیق‌سازی هوای احتراق بر راندمان بویلر در دبی ۰٫۵۲ gr/s گاز شهری

۴-۴-۲- بلند و حجیم شدن شعله

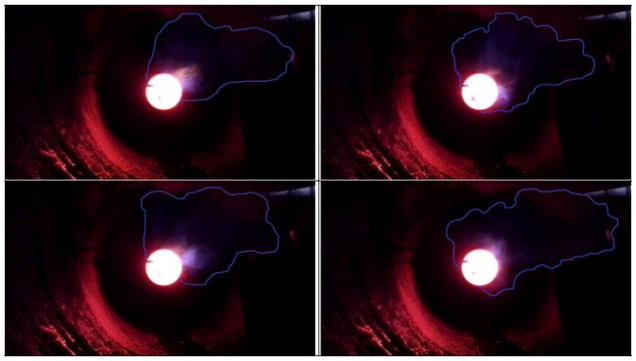
شکلهای (۱۹) و (۲۰) تغییر ساختار شعله در تست F4-01 و M4-03 را نشان می‌دهد. در شکل (۱۹) شعله کوچک و قوی حاصل احتراق ۰٫۶ gr/s گاز طبیعی با هوای اتمسفریک را ملاحظه می‌نمایید که وضوح رنگ آبی شعله دلالت بر واکنشهای احتراقی سریع و شدید ناشی از دسترسی سوخت به اکسیژن با غلظت ۲۱٪ دارد. اما در شکل (۲۰) که مربوط به پیشگرمایش و رقیق‌سازی هوا توسط بازگردش خارجی دود در تست M4-03 است شعله‌ای حجیم و تضعیف شده به رنگ آبی مات و کم فروغ تولید نموده که از ویژگیهای ظاهری رژیم احتراق بدون شعله است.

۴-۴-۳- کاهش تولید آلاینده‌های NOx و CO

در رژیم احتراق بدون شعله با توجه به اینکه حداکثر دمای شعله به دلیل کند شدن واکنشهای احتراقی ناشی از رقیق‌سازی هوا کاهش می‌یابد، انتظار می‌رود که مقدار تولید آلاینده‌های احتراقی نظیر NOx کاهش یابد. جدول (۲) اثر پیشگرمایش و رقیق‌سازی هوای احتراق بر میزان تولید NO را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که اگر پیشگرمایش هوا به تنهایی انجام شود، میزان تولید NO از ۴۰ ppm در تست F4-01 تا ۵۸ ppm در تست F4-02 افزایش می‌یابد. علت این امر افزایش حداکثر دمای شعله است که می‌تواند پیوندهای سه‌گانه بیشتری از نیتروژن موجود در هوا ($N \equiv N$) را شکسته و تولید ناکس را افزایش دهد. به همین دلیل در تمامی صنایع از جمله بویلرهای نیروگاهی، امکان پیشگرمایش هوای احتراق به مقادیر بالا وجود ندارد چراکه میزان تولید ناکس را شدیداً افزایش می‌دهد. اما درصورتیکه به همراه پیشگرمایش هوای احتراق، غلظت اکسیژن را در آن کاهش دهیم (توسط بازگردش خارجی دود به جریان هوای پیشگرم شده) سرعت واکنشهای احتراقی کندتر شده و دمای حاصل از احتراق کاهش می‌یابد. درنتیجه انرژی حاصل از احتراق تضعیف شده، پیوندهای سه‌گانه کمتری از نیتروژن هوا را شکسته و میزان تولید NOx کاهش می‌یابد.



شکل (۱۹) شعله کوچک و قوی حاصل از احتراق معمولی (بدون پیشگرمایش و رقیق‌سازی هوا) مربوط به تست F4-01 در جدول (۱)



شکل (۲۰) شعله حجیم و تضعیف شده حاصل از رژیم احتراق بدون شعله (پیشگرمایش تا ۲۳۹ °C و رقیق‌سازی هوا در اثر ۲۵٪ بازکردن شیر بازگردش خارجی دود) مربوط به تست M4-03 در جدول (۱)

این امر در تستهای F4-02 تا F4-04 از جدول (۲) به روشنی به چشم می‌خورد. بنابراین، سوییچ کردن از احتراق معمولی (تست F4-01) به احتراق پیشگرم شده (تست F4-02) مقدار ناکس تولیدی را ۳۳٪ افزایش می‌دهد. اما در ادامه درصورتیکه علاوه بر پیشگرمایش هوا در تست F4-02 رقیق‌سازی همزمان هوا را هم انجام دهیم میزان تولید ناکس در تست M4-03 که در رژیم احتراق بدون شعله است حدود ۱۳٪ کاهش می‌یابد. در ادامه، با افزایش رقیق‌سازی هوا در تست F4-04 میزان تولید NOx حدود ۲۷٪ دیگر کاهش می‌یابد، اما این رژیم احتراقی مطلوب نیست چراکه مطابق جدول (۱) نه تنها راندمان بویلر افت می‌کند بلکه به دلیل رقیق‌سازی بیش از اندازه هوا، مقدار اکسیژن مورد نیاز برای واکنشهای احتراقی شدیداً کاهش یافته و منجر به تولید مقادیر زیادی CO می‌شود. پس همانگونه که برای افزایش راندمان احتراق بایستی مقدار رقیق‌سازی مناسب برای جریان هوا صورت گیرد، برای کاهش تولید آلاینده‌ها نیز بایستی هوای پیشگرم شده را به میزان مناسبی

رقیق نمود. در تستهای F4-05 تا F4-07 در جدول (۲) که در دبی سوخت ۰٫۵۲ gr/s انجام شده‌اند نیز رفتار کاملاً مشابهی دیده می‌شود.

جدول (۲) بررسی اثر میزان پیشگرمایش و رقیق‌سازی هوا بر میزان تولید NO و CO در تست شماره ۴

کد تست*	دبی سوخت گاز طبیعی (gr/sec)	میزان بازنوردن شیر بازگردش خارجی دود (٪)	نسبت هم‌ارزی (Ø)	درصد هوای اضافه (%)	دمای هوای احتراق (°C)	راندمان حرارتی بویلر (%)	میزان تولید CO (ppm)	میزان تولید NO (ppm)
F4-01	۰٫۶۰	۰	۰٫۸۱	٪۲۴	۳۶	۶۰٫۸۱	۰	۴۰
F4-02	۰٫۶۰	۰	۰٫۸۳	٪۲۰	۲۷۹	۶۴٫۰۱	۰	۵۳
M4-03	۰٫۶۰	٪۲۵	۰٫۹۰	٪۱۱	۲۳۹	۶۹٫۲۵	۰	۴۶
F4-04	۰٫۶۰	٪۵۰	۰٫۹۶	٪۴	۲۰۴	۶۴٫۴۲	۱۹۴۰	۳۳
F4-05	۰٫۵۲	۰	۰٫۸۵	٪۱۷	۲۵۹	۵۹٫۹۰	۱۴	۴۶
M4-06	۰٫۵۲	٪۲۵	۰٫۹۱	٪۱۰	۲۵۷	۶۵٫۳۰	۲/۵	۴۱
F4-07	۰٫۵۲	٪۵۰	۰٫۹۷	٪۳	۲۳۵	۶۳٫۴۹	۱۴۰	۳۰

۵- نتیجه‌گیری

به عنوان جمع‌بندی ملاحظه می‌شود که در تستهای فوق‌الذکر تمام ویژگیهای رژیم احتراق بدون شعله شامل ۱- افزایش راندمان احتراق بویلر ۲- بلند و حجیم شدن شعله که منجر به افزایش فلاکس حرارتی منتقل شده به دیواره بویلر می‌شود و ۳- کاهش تولید آلاینده‌های NOx و CO به دلیل کاهش حداکثر دمای شعله حاصل گردیده است. این مزایای احتراق بدون شعله، بدون نیاز به تعویض مشعل قدیمی با مشعلهای بازیاب گران قیمت و صرفاً با ترکیب تکنیکهای طراحی مکانیکی و طراحی فرآیندی حاصل گشت. در فاز طراحی مکانیکی جهت پیشگرمایش موثر هوای احتراق یک رکوپراتور راندمان بالا طراحی و ساخته شد. در فاز طراحی فرآیندی نیز چهار پارامتر دمای هوای پیشگرم، دبی سوخت تزریقی، میزان بازگردش داخلی دود و میزان رقیق‌سازی هوای پیشگرم توسط بازگردش خارجی دود مورد بررسی قرار گرفتند که از میان آنها بازگردش داخلی دود کمترین اثر و بازگردش خارجی دود بیشترین اثر را در تغییر رژیم احتراقی از حالت معمولی به بدون شعله نشان دادند. این نتیجه که تماماً با تکنیکهای صنعتی، و نه صرفاً آزمایشگاهی، حاصل گشته این امکان را فراهم می‌سازد که در مقیاسهای صنعتی نیز با استفاده از نتایج حاصل از این پروژه و بدون نیاز به تعویض مشعلهای سنتی کنونی، رژیم احتراق بدون شعله را پیاده‌سازی نمود تا به طور همزمان راندمان حرارتی افزایش و میزان تولید آلاینده‌ها کاهش یابد.

۶- مراجع

[1] J. A. Wünning and J. G. Wünning, Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation, Progress in Energy Combustion Science 23 (1997) 81-94.

[2] H. Tsuji, A. K. Gupta, T. Hasegawa, M. Katsuki, K. Kishimoto, M. Morita, High Temperature Air Combustion: From Energy Conservation to Pollution Reduction, 2002, CRC Press.

[3] A. Milani and J. G. Wünning, What is Flameless Combustion?, IFRF Online Combustion Handbook, 2002.

[4] S. Orsino, R. Weber , U. Bollettini, Numerical simulation of combustion of natural gas with high temperature air, Combustion Science and Technology 170 (2001) 1-34.

[5] B. B. Dally, A. N. Karpetis, R. S. Barlow, Structure of turbulent non-premixed jet flames in a diluted hot coflow, Proceedings of the Combustion Institute 29 (2002) 1147-1154.

[6] A. Cavigiolo, M. A. Galbiati, A. Effuggi, D. Gelosa, R. Rota, MILD combustion in a laboratory-scale apparatus, Combustion Science and Technology 175 (2003) 1347-1367.

[7] G. G. Szegö, B. B. Dally, G. J. Nathan, Operational characteristics of a parallel jet MILD combustion burner system, Combustion and Flame 156 (2009) 429-438.

[8] A. S. Veríssimo, A. M. A. Rocha, P. J. Coelho, M. Costa, Experimental and numerical investigation of the influence of the air preheating temperature on the performance of a small-scale mild Combustor, Combustion Science and Technology 187 (2015) 1724-1741.

[9] A. Rebola, M. Costa, P. J. Coelho, Experimental evaluation of the performance of a flameless combustor, Applied Thermal Engineering 50 (2013) 805-815.

[10] WS Co., http://www.flox.com/en/prod/REKUMAT.html

[11] NIPPON steel and SUMITOMO metal group, https://www.eng.nssmc.com/english/whatwedo/steelplants/rolling/regenerative_burner_type_reheating_furnace/

[12] Mcchi-Sofinter group, http://www.macchiboiler.it/en/research-development/burners/

تقدیر و تشکر

پروژه حاضر در غالب قرارداد پژوهشی به شماره ۱۵-۱-۲۳۱-۹۴ با سازمان توسعه برق ایران و در ادامه با شرکت مادر تخصصی تولید برق حرارتی انجام پذیرفته است. بدین وسیله از حمایتهای مالی شرکتهای مذکور جهت انجام این تحقیق سپاسگزاری می‌گردد.