مجموعه مقالات نهمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران
۱۹ تا ۲۱ بهمن ۱۴۰۰، ایران، شیراز، دانشگاه شیراز
FCCI-2022-0075

بررسی احتراق بدون شعله در سوخت های مایع و محفظه احتراق این نوع سوخت ها

مرتضی جاهدی[1*]، محمد امین زمانی[2]، محمد حسن سعیدی[3]
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک ، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، morteza.jahedi@mech.sharif.ir
۲- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران،mohamadaminzamani74@gmail.com
۳- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، saman@sharif.edu
* نویسنده مخاطب

چکیده
فرایند احتراق، مهم‌ترین بخش تولید توان از مصرف انرژی‌های فسیلی می باشد. سخت‌گیری قوانین زیست محیطی در سال‌های اخیر مبنی بر استفاده از سوخت های فسیلی و لزوم کاهش آلاینده های آن، خصوصا اکسیدهای نیتروژن و مونواکسید کربن، صنایع فعال در حوزه احتراق را به سمت طراحی، ساخت و پیاده سازی انواع فرایندها، مشعل ها و تجهیزاتی به منظور بهینه سازی مصرف سوخت،افزایش بازده و کاهش آلاینده‌های گازی سوق داده است. یکی از این فناوری‌های نوظهور احتراق بدون شعله می‌باشد. تئوری پردازی،استخراج دانش فنی و مطالعات احتراق بدون شعله هنوز به چهل سال نیز نمی‌رسد؛و این امر لزوم مطالعات و پژوهش های درخور در این حوزه را می‌طلبد. که در این مقاله سعی شد مهمترین اقدامات انجام شده در زمینه ایجاد احتراق بدون شعله با استفاده از سوخت مایع جهت رسیدن به مقیاس های صنعتی بررسی شود و طرح های پیشنهادی و مزایا و محدودیت های آنها روشن شود. سوخت های مایعی که در صنعت استفاده می شوند معمولا بازدهی خوب ولی تولید آلاینده بالایی دارند از آنجاییکه احتراق بدون شعله هم تولید آلاینده را کاهش می دهد و هم بازده را افزایش می دهد بنابراین این ایده پیاده سازی این نوع احتراق برای سوخت‌های مایع بسیار کاربردی خواهد بود.
کلمات کلیدی: احتراق بدون شعله، سوخت مایع، محفظه احتراق، کاهش آلاینده ها، افزایش بازدهی احتراق

مقدمه

احتراق بدون شعله [1] فناوری جدیدی است که هنوز راه خود را به صنایع ایران باز نکرده ولی با اینحال موسسات پژوهشی کشور، کم و بیش از این فناوری در مقیاس آزمایشگاهی استفاده می کنند. رایج ترین راه رسیدن به این نوع احتراق بدین گونه است که گاز های حاصله از احتراق را بجای خارج کردن، مجدداً وارد محفظه احتراق کرده تا با سوخت و هوای مورد نیاز احتراق مخلوط شود و علاوه بر گرم کردن آنها تا دمای خود اشتعالی مخلوط، غلظت اکسیژن را نیز پایین آورده و حالت خاصی از احتراق بوجود آید که در آن بیشینه دمای محفظه احتراق از حالت احتراق عادی کمتر می شود که این موجب همگنی دمایی در داخل محفظه می شود که کاهش گرادیان دمایی و افزایش سطح دما موجب افزایش بازده حرارتی کوره یا بویلر می شود (حرارت یکنواختی به محصول داده می شود)؛ و همچنین کاهش دمای بیشینه محفظه باعث کاهش تولید NO از طریق مکانیزم های مربوط به آن می شود. همچنین کربن موجود در مونو اکسید کربن که در مرحله اول نسوخته باقی مانده بود، با سوزانده شدن مجدد، تبدیل به دی اکسید کربن شده و بنابراین شاهد کاهش این آلاینده نیز خواهیم بود. از دیگر فواید این نوع احتراق نیز می توان به کاهش صدا و ارتعاشات مزاحم[1] اشاره کرد که می‌تواند در طول عمر تجهیزات تاثیرگذار باشد.

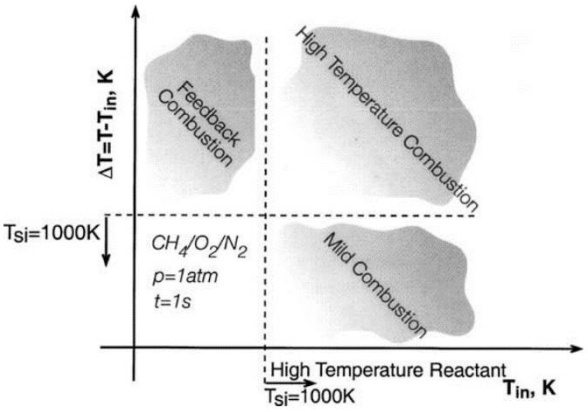
حال پس از آشنایی با این نوع احتراق و مزایای آن،نحوه‌ی پیاده سازی آن مورد مطالعه قرار می‌گیرد. اولین مشعل هایی که با احتراق بدون شعله کار می کردند همگی گاز سوز بودند و کار با این مشعل ها نسبتا ساده بود اما خیلی از اوقات صنایع و نیروگاه ها به جای سوخت گازی مجبور به استفاده از سوخت مایع هستند و همچنین این نوع سوخت‌ها ممکن است بازدهی مناسبی نداشته باشند؛ بنابراین محققین به دنبال پیاده سازی این نوع احتراق بر روی سوخت های غیرگازی افتادند چراکه احتراق بدون شعله بازدهی بیشتری را نیز سبب می شود.
از آنجایی که پیش بینی می شود در آینده محققان کشور به سمت بررسی این نوع احتراق برای کار با سوخت های مایع و حتی پیاده سازی عملی آن بروند و نیز از آنجا که مرور متمرکزی بر روی احتراق بدون شعله برای سوخت های مایع، چه از نظر هندسه محفظه احتراق و چه از نظر نوع سوخت، صورت نگرفته بود تصمیم گرفته شد این مقاله ارائه شود.

بدنه اصلی مقالات

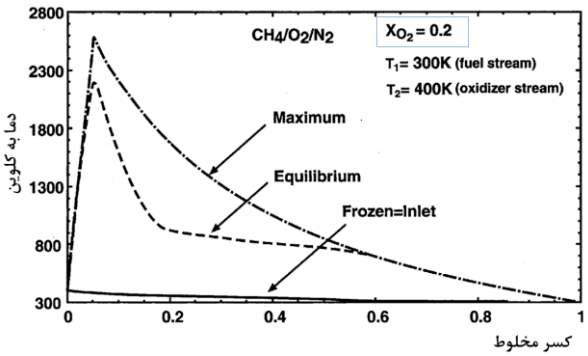
از آنجا که این نوع احتراق ممکن است در ابتدا غیرقابل لمس باشد، بهتر است تعریفی برای این نوع احتراق تبیین کنیم تا درک آن ساده تر شود. کاوالیر و همکاران [۲] تعریفی دو شرطی برای وقوع این احتراق ارائه دادند: «اگر همزمان دمای خود اشتعالی مخلوط از دمای ورودی کمتر و از اختلاف بیشترین دمای محفظه احتراق با دمای ورودی بیشتر باشد، احتراق بدون شعله است». وابستگی شدید احتراق بدون شعله را می توان از همین تعریف متوجه شد؛ در این تعریف بجز اختلاف دمای بیشینه(در واقع دمای بیشینه) بقیه دماها ثابت هستند. دمای بیشینه به نوع مخلوط، دمای ورودی، شرایط مرزی و پیش مخلوط و غیر پیش مخلوط بستگی دارد.به عنوان مثال برای مخلوط استوکیومتری متان، اکسیژن و نیتروژن در یک راکتور خوب همزده شده[2]، کاوالیر و همکاران به نمودار شکل ۱ رسیدند که حالات مختلف احتراق را نشان می دهد. دمای خود اشتعالی مخلوط نام برده شده ۱۰۰۰ کلوین بوده و برای اینکه احتراق بدون شعله رخ دهد باید دمای ورودی بیشتر از ۱۰۰۰ کلوین شود و همچنین اختلاف دمای بیشینه نیز کمتر از دمای خود اشتعالی شود.
در احتراق بدون شعله دو خاصیت نقش تعیین کننده ای بازی میکنند، دما که راجع به آن صحبت شد و غلظت یا رقت اکسنده (یا اکسیژن). برای رقیق کردن اکسنده معمولاً از بازچرخش محصولات احتراق به صورت داخلی یا خارجی استفاده می شود. از رقیق کننده های معمول می توان به نیتروژن، دی اکسید کربن و بخار آب اشاره کرد که معمولاً در سوخت های هیدروکربنی دو مورد آخر جزو محصولات احتراق هستند. بازچرخش محصولات احتراق علاوه بر رقیق کردن اکسنده موجب کاهش دمای خروجی(و کاهش هدر رفت انرژی) و افزایش دمای ورودی(و انتقال آنتالپی

[1] Flameless Combustion
[2] Well-Stirred Reactor

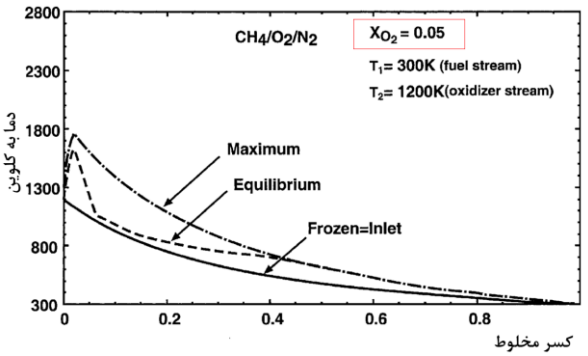
به جریان ورودی) می شود که این خود به بدون شعله شدن احتراق کمک می‌کند.



شکل۱: نمودار تغییرات اختلاف دمای بیشینه به ازای دمای ورودی و حالتهای مختلف احتراق برای مخلوط متان، اکسیژن و نیتروژن[۲]



الف) اکسنده رقیق نشده

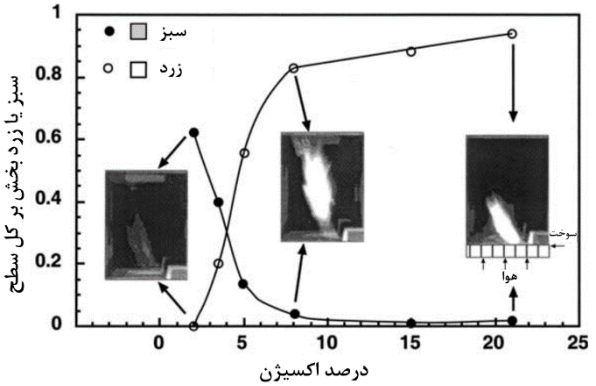


ب) اکسنده رقیق شده با دمای ورودی بالا

شکل۲: نمودار دمای ورودی، دمای متعادل، دمای بیشینه برای اکسنده رقیق نشده(الف) و اکسنده رقیق شده با دمای ورودی بالا(ب)[۲]

با توجه به شکل۲، رقیق شدن اکسنده و افزایش دمای ورودی باعث می شود دمای بیشینه محفظه احتراق کاهش محسوسی داشته باشد درحالیکه روند کلی تغییرات دما تغییر چندانی نکند؛ این مزیت بزرگی است چراکه از بوجود آمدن نقاط داغ داخل محفظه جلوگیری کرده و تولید ناکس را کمتر می کند.

همچنین رقیق شدن اکسنده باعث افزایش حجم شعله و کاهش روشنایی آن می شود؛ نمودار شکل۳ رنگ های مختلف شعله پروپان در دمای ۱۴۰۰ کلوین و به ازای درصد های مختلف رقت اکسنده را نشان می دهد. در این نمودار وقتیکه غلظت اکسیژن از ۲۱٪ به ۸٪ کاهش می یابد، رنگ شعله از زرد به آبی میل می کند و در ادامه وقتی غلظت اکسیژن از ۸٪ به زیر ۵٪ می رسد شعله بی رنگ می شود.



شکل۳: عکسهای شعله و درصد رنگهای سبز و زرد در درصدهای مختلف رقیقسازی اکسنده برای سوخت پروپان در دمای۱۴۰۰کلوین[۲]

با این توضیحات به پارامتر های تأثیر گذار در احتراق بدون شعله پی بردیم و علت نامگذاری این احتراق را نیز متوجه شدیم.

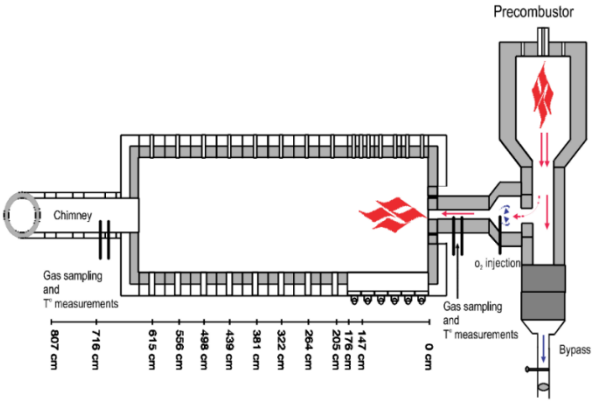
بحث بر روی نتایج

در رابطه با احتراق مایعات به روش احتراق معمولی، رایج ترین روش این است که مایع به کمک یک اتمایزر[1] بصورت اسپری در محفظه احتراق پاشیده شود که در این رابطه اطلاعات تجربی بسیاری کسب شده که با توجه به نوع اتمایزر و یا نوع سوخت می توان به این اطلاعات دست یافت. برای مثال در سال ۱۹۹۵ ام سی دونل و همکاران[۳] داده های آزمایشی مربوط به سوخت متانول و با استفاده از اتمایزر از نوع ساده به همراه اندازه گیری های بخار در داخل اسپری ها را ارائه دادند. اما در آن آزمایش نه مخلوط رقیق شده بود و نه پیش گرم(که جزو شرایط احتراق بدون شعله هستند). یا در سال ۱۹۹۸ سامرفلد و همکاران[۴] احتراق ایزوپروپانول را با استفاده از اتمایزر فشاری در جریان هوای پیش گرم آشفته به منظور دستیابی به داده های آزمایشی جهت اعتبار سنجی نتایج حاصل از حل عددی مورد بررسی قرار دادند اما همچنان مخلوط آنها رقیق نبود و شرایط احتراق بدون شعله را ارضا نمی کرد بنابراین اولین بار در سال ۲۰۰۵ وبر و همکاران[۵] جنبه‌های کاربردی اساسی و صنعتی احتراق گاز طبیعی، روغن‌های سوخت سنگین و سبک و زغال سنگ را در هوای بسیار پیش گرم شده بررسی کردند. آزمایشات آنها در یک کوره آزمایشی با ورودی حرارتی سوخت ۰,۵۸ مگاوات و هوای احتراق تا دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد پیش گرم شده بود و انژکتورهای سوخت را خارج از جریان هوای احتراق قرار دادند. اگرچه کوره با هوای اضافی ۱۰ درصد کار می‌کرد، اما به دلیل ورود مقادیر زیادی از گازهای دودکش چرخشی به داخل جت‌های سوخت قبل از احتراق، فرآیند احتراق در شرایط شدیداً زیر استوکیومتری رخ می‌داد و شرط رقیق بودن را نیز ارضا می کرد. شکل۴ شماتیک کوره آزمایش وبر و همکاران را نشان می دهد که خود این کوره گاز سوز بوده ولی با تغییراتی در آن توانستند برای مایعات نیز استفاده کنند.

نتایجی که آنان به آن دست یافتند این است که سوخت های روغنی سبک تحت احتراق بدون شعله، رفتاری مشابه با سوخت های گازی تحت احتراق بدون شعله دارند ولی برای سوخت های سنگین روغنی و زغال سنگ شعله

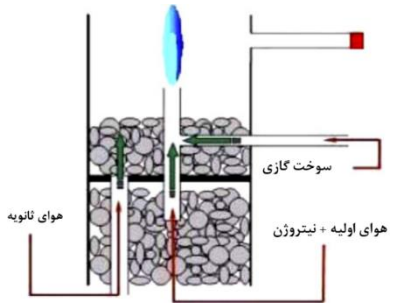
[1] Atomizer

همواره قابل مشاهده بود اما در تمام آزمایشات مونوکسید کربن در دود های خروجی یافت نشد و شار حرارتی تقریبا در تمام کوره یکنواخت بود که این خود یک گام رو به جلو محسوب می شد.

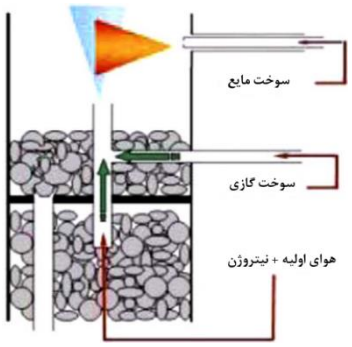


شکل۴: شماتیک کوره آزمایش وبر و همکاران[۵].

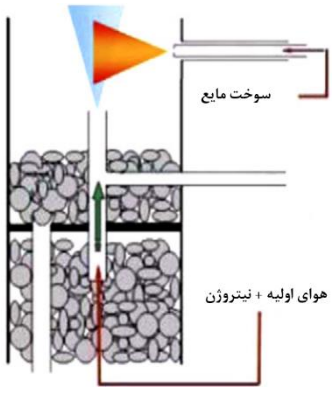
در ادامه در سال ۲۰۱۱ درودی و همکاران[۶] آزمایشاتی جهت بررسی پایداری احتراق بدون شعله برای هیدروکربن‌های مایع با استفاده از یک مشعل در مقیاس آزمایشگاهی، که شامل نازل دوگانه متمرکز شده بود، بر روی n-اکتان مایع خالص به عنوان سوخت مرجع انجام دادند. آنان نشان دادند که پیکربندی دو نازل اجازه می دهد تا شرایط احتراق بدون شعله را با تزریق مستقیم هیدروکربن های مایع مختلف در یک محیط احتراق بدون شعله که قبلاً با استفاده از سوخت گازی بدست آمده بود را بتوان حفظ کرد. آنان همچنین دریافتند که ، ناحیه احتراق بدون شعله در فضای $T_{avg} - K_V$ هنگام استفاده از هیدروکربن های مایع نسبت به هیدروکربن های گازی بزرگ می شود. درودی و همکاران یک مشعل در مقیاس آزمایشگاهی مجهز به یک نازل جت با سرعت بالا که قبلاً برای احتراق بدون شعله سوخت‌های گازی ساخته شده بود، به طور مناسب اصلاح و استفاده کردند. مشعل اتمسفر در مقیاس آزمایشگاهی یک لوله کوارتز عمودی است که توسط دو بخش ساخته شده است: منطقه پیش گرم کننده هوا و محفظه احتراق (ارتفاع ۳۵۰ میلی متر، قطر داخلی ۵۰ میلی متر). همانطور که در شکل ۲-الف مشاهده می شود، با استفاده از پیکربندی تک نازل (با قطر داخلی ۳ میلی متر) هوا و سوخت گازی از پایین محفظه احتراق تغذیه می شوند. از آنجایی که هم سوخت و هم هوای اولیه (همراه با نیتروژن رقیق‌کننده در صورت نیاز) وارد یک نازل می شوند، پیش‌آمیختگی جزئی از هوا و سوخت قبل از ورود به محفظه احتراق ایجاد می‌شود. با این حال، هیچ اکسیداسیون سوخت در داخل نازل به دلیل زمان ماند[1]کوتاه اتفاق نمی افتد (در ۱۰۰۰ کلوین، بسته به نرخ جریان، در محدوده ۰,۰۰۱ تا ۰,۰۰۰۱ ثانیه است). شکل ۵-الف همچنین ورودی هوای ثانویه را نشان می دهد که هم برای روشن کردن مشعل و هم برای تغییر چرخه داخلی اگزوز استفاده می شود. این پیکربندی تک نازل برای سوخت‌های مایع مناسب نیست، زیرا تجزیه در اثر حرارت ممکن است به‌رغم زمان ماند کم، نازل را مسدود کند. علاوه بر این، روشن کردن مشعل با استفاده از سوخت مایع بسیار دشوار است. بنابراین از پیکربندی دو نازل استفاده کردند که اصلاح شده تک تازل است. شکل ۵-ب و ج را ببینید، هوای پیش گرم شده از طریق نازل پایینی وارد محفظه احتراق می شود، در حالی که سوخت مایع به عنوان یک اسپری خوب پراکنده و همگن از طریق اتمایزر ایربلاست جت ساده جانبی با آب خنک شده (قطر داخلی لوله تغذیه سوخت ۰,۴ میلی متر است) تزریق می شود. این دو جت به صورت عمود برهم کنش می کنند و در یک منطقه تلاطم زیاد با یکدیگر مخلوط می شوند.



شکل ۵-الف: سیستم تغذیه واکنش دهنده ها در حالت تک نازل خوراک سوخت: گاز[۶].



شکل ۵-ب: سیستم تغذیه واکنش دهنده ها در حالت دو نازل خوراک سوخت: مایع و گاز[۶].



شکل ۵-ج: سیستم تغذیه واکنش دهنده ها در حالت دو نازل خوراک سوخت: مایع[۶].

از آنجایی که آتش زدن مشعل در مقیاس آزمایشگاهی در پیکربندی دونازل با سوخت مایع در عمل به راحتی انجام نمی شود، مشعل همیشه با یک سوخت گازی در پیکربندی تک نازل روشن می شود (شکل ۵-الف). پس از این که شرایط بدون شعله در پیکربندی تک نازل به دست آمد، انتقال از پیکربندی تک نازل با سوخت گازی به دو نازل با سوخت مایع (شکل ۵-ج) با کاهش تدریجی نرخ جریان گاز تغذیه شده به نازل پایین در حالی که سرعت جریان مایع از دستگاه اتمایزر افزایش می یابد (شکل ۵-ب) انجام

[1] Residence time

می شود. به همین دلیل، در طول انتقال از یک پیکربندی تک نازل به یک پیکربندی دو نازل، دو سوخت مختلف به طور همزمان به مشعل تغذیه شده است، گاز از نازل پایین و مایع از نقطه تزریق جانبی، که به تدریج نسبت گاز به مایع را کاهش می‌دهد.

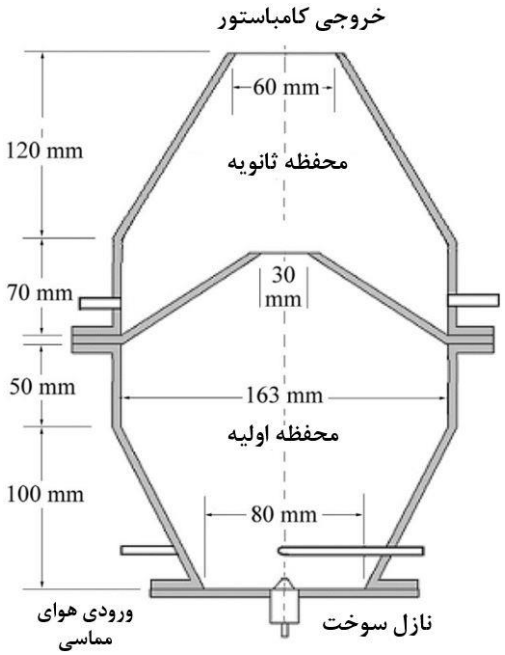
دو سال بعد ردی و کومار[۱] بصورت تجربی و عددی یک احتراق دو مرحله ای را تنظیم کردند که قادر به دستیابی به احتراق بدون شعله با سوخت‌های مایع(نفت سفید[1]، دیزل و بنزین) برای ورودی‌های حرارتی مختلف ۲۰، ۳۰، ۴۰، و ۶۰ کیلووات و چگالی انتشار حرارت ۵ تا ۱۵ مگاوات بر متر مکعب است. آنها با تجزیه و تحلیل ویژگی های جریان نشان دادند که کاهش قطر درگاه خروجی محفظه اولیه(مرحله اول)، نرخ چرخش مجدد محصولات احتراق را افزایش می‌دهد و به دستیابی به حالت احتراق بدون شعله کمک می‌کند و همچنین با تغییر حالت احتراق از حالت معمولی به حالت احتراق بدون شعله، سطوح انتشار صوتی ۶ تا ۸ دسی بل کاهش می یابد.

یک پیکربندی احتراق دو مرحله ای مبتنی بر چرخش در مطالعه آنان در نظر گرفته شد(شکل ۶). بر اساس قطر خروجی محفظه اولیه، سه پیکربندی مختلف احتراق D30، D45 و D60 را شامل می شود. از مطالعات محاسباتی متوجه شدند که محفظه احتراق با قطر ۳۰ میلیمتر(D30) یک پیکربندی بهینه برای دستیابی به احتراق بدون شعله با سوخت مایع است. همچنین نتیجه گرفتند نسبت رقت واکنش‌دهنده[2] (R_{dil}) و طول ناحیه گردش مجدد با کاهش قطر درگاه خروجی محفظه اولیه افزایش می‌یابد زیرا کاهش اندازه درگاه خروجی جریان معکوس را در محفظه احتراق افزایش می‌دهد.

نسبت رقت واکنش دهنده: نسبت برهمکنش نرخ خالص جریان جرم در یک صفحه به نرخ جریان جرم کل واکنش دهنده ها است. این نسبت معیاری برای گردش مجدد محصولات احتراق و تعامل آنها با مخلوط تازه است.

محفظه احتراق به صورت عمودی بر روی پایه آزمایشی همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است قرار می گیرد. سوخت مایع در یک مخزن فولادی تحت فشار ذخیره می شود. هوا از طریق چهار پورت تزریق مماسی که در نزدیکی قسمت پایین محفظه احتراق قرار دارد تزریق می شود(در محدوده ۵۰ تا ۹۰ متر بر ثانیه) و سوخت مایع از طریق یک انژکتور چرخشی فشاری نصب شده در مرکز تزریق می شود. انژکتورهای چرخشی فشار با دبی جرمی ۱,۷۲، ۲,۷۲، ۳,۵۴ و۵,۲۳ کیلوگرم در ساعت در فشار پاشش ۹ بار برای تزریق سوخت به محفظه احتراق استفاده می شود. یک انژکتور سوخت به صورت مرکزی در پایین محفظه احتراق با زاویه مخروط اسپری انژکتور ۴۵ درجه نصب شده است. محفظه احتراق ابتدا با یک شمع مشتعل می شود و با یک مخلوط پیش مخلوط LPG-هوا کار می کند. برای اطمینان از تثبیت اولیه شعله، استوکیومتری نرخ جریان سوخت مایع و هوا حفظ می شود. هوای ثانویه در نزدیکی مخروط میانی تزریق می شود. اثر ترکیبی تزریق هوای ثانویه و اسپری سوخت به حفظ دمای مخروط میانی در محدوده مجاز کمک می کند.

پس از انجام آزمایشات به این نتیجه رسیدند که افزایش پیش گرمایش و رقیق شدن سوخت و اکسید کننده به دلیل R_{dil} بالا، نرخ تبخیر قطرات را بهبود می بخشد و ناحیه واکنش را به طور یکنواخت در کل حجم احتراق پخش می کند. بنابراین شعله زرد معمولی (که در قطر ۶۰ میلیمتر ایجاد شده بود) به تدریج از بین می رود و به حالت احتراق بدون شعله (در قطر ۳۰ میلیمتر) تبدیل می شود.



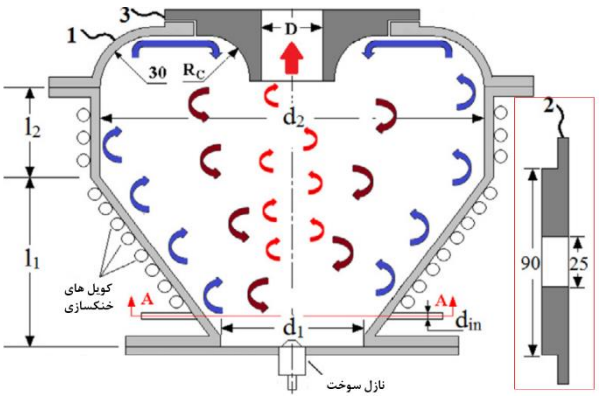
شکل ۶: شماتیک احتراق دو مرحله ای[۱].

در سال ۲۰۱۴ ردی و همکاران[۷] با هدف افزایش مقیاس مشعلی که در حالت احتراق بدون شعله کار میکند مطالعات خود را انجام دادند. مشعل با سوخت نفت سفید در ابتدا در چگالی انتشار حرارت ۵,۴ مگاوات بر متر مکعب کار می کرد (ورودی حرارتی ۲۱,۵ کیلووات) و هدف رساندن چگالی انتشار حرارت به ۲۱,۵ مگاوات بر متر مکعب (ورودی حرارتی ۸۴,۷ کیلووات) بود. در ابتدا یک پیکربندی مبتنی بر جریان چرخشی برای تزریق هوا اتخاذ کردند و یک نازل نوع چرخشی فشار با قطر متوسط ساتر [3] (SMD) ۳۷-۳۵ میکرو متر برای تزریق سوخت استفاده شد. در ابتدا، احتراق بدون شعله برای ورودی حرارتی ۲۱,۵ کیلو وات تثبیت شد. اما هنگامیکه سعی شد این محفظه احتراق در شدت های بالاتر یعنی ۱۰,۲، ۱۶,۳ و ۲۱,۱ مگاوات بر متر مکعب مقیاس شود، افزایش نرخ جریان سوخت منجر به احتراق ناقص و تجمع سوخت نسوخته در محفظه احتراق شد.

با بررسی هایی که انجام دادند متوجه شدند که دو اشکال اساسی وجود دارد که باعث محقق نشدن احتراق بدون شعله می شود: (الف) یک زاویه مخروط پاشش و قطر متوسط ساتر ثابت، عدد چگالی قطرات را افزایش می دهد. (ب) نسبت رقت واکنش دهنده ها (R_{dil}) با افزایش ورودی حرارتی کاهش می یابد.

برای حل این مسائل، یک پیکربندی احتراق اصلاح شده با کمک محاسبات عددی اتخاذ کردند که در آن یک پخ[4] در نزدیکی خروجی برای افزایش R_{dil} ایجاد شده است(شکل ۷).

[1] Kerosene
[2] Reactant dilution ratio
[3] Sauter mean diameter (SMD)
[4] chamfer



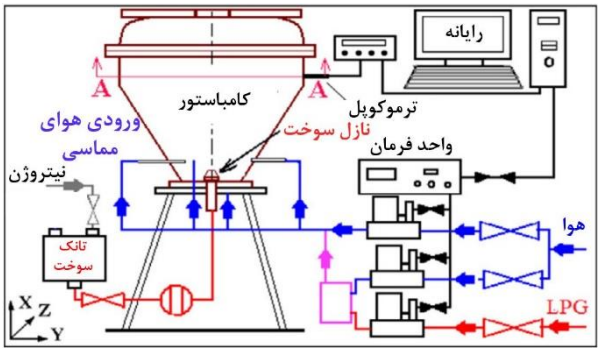
شکل ۷ : جزئیات ابعادی محفظه احتراق(ابعاد به میلیمتر می باشند)

شکل ۷ محفظه احتراق بهبود یافته است(فریم شماره ۱ با فریم شماره ۳)، اگر فریم شماره ۲ که در کادر قرمز رنگ قرار دارد را با فریم شماره ۳ عوض کنیم به ساختار اولیه می رسیم[۷]. شکل ۷ جزئیات ابعادی محفظه احتراق را نشان می دهد. ردی و همکاران با قرار دادن یک فلنج پخ در بالای محفظه به طور موثر قطر درگاه اگزوز را از ۹۰ میلی متر به قطر D برای شدت حرارت خاص کاهش دادند. نحوه راه اندازی سیستم نیز به اینگونه است که در ابتدا، مخلوط LPG-هوای مخلوط شده با یک جرقه مشتعل شده و محفظه احتراق به مدت ۲ تا ۳ دقیقه کار می کند تا محفظه احتراق پیش گرم شود. در ادامه سوخت نفت سفید با فشار ۵ بار با باز کردن شیر توپی در خط سوخت تزریق می شود. سپس سرعت جریان LPG به تدریج کاهش یافته و فشار تزریق نفت سفید به طور همزمان به ۹ بار افزایش می یابد. یک شعله پایدار در حالت احتراق معمولی با مخلوط نفت سفید-هوا استوکیومتری برای ۴-۵ دقیقه بعدی ایجاد شد. پس از یک زمان راه اندازی اولیه ۷ تا ۸ دقیقه ای، دمای دیواره احتراق به حدود ۹۰۰ کلوین میرسد. سپس شعله معمولی به تدریج به حالت احتراق بدون شعله تغییر می کند. این استراتژی برای درک و ارزیابی تأثیر تغییر قطر درگاه خروجی بر انتقال بین حالت احتراق معمولی (۹۰ میلی‌متر) و حالت احتراق بدون شعله (۳۰ میلی‌متر) اقتباس شده است.

و در انتها با بررسی‌های تجربی دقیق نشان داده شد که حالت احتراق بدون شعله در شدت‌های بالا با ناحیه واکنش و دما به طور یکنواخت در محفظه احتراق در تمام شدت‌های حرارتی به دست می‌آید و محفظه احتراق پیشنهادی را می توان با در نظر گرفتن اجزای برتر برای کاربرد های عملی واقعی راه اندازی کرد.

شکل ۸ یک نمودار شماتیک از تنظیمات آزمایشی ردی و همکاران را نشان می دهد. محفظه احتراق به صورت عمودی بر روی پایه آزمایش قرار می گیرد. نفت سفید با فشار ۹ بار در یک مخزن فولادی ضد زنگ تحت فشار ذخیره می شود و انژکتور سوخت در مرکز محفظه احتراق قرار دارد. انژکتور سوخت یک چرخش در جهت عقربه های ساعت به اسپری سوخت داده و از این رو یک تزریق هوا در خلاف جهت عقربه های ساعت برای ایجاد نیروی برشی بیشتر به جریان و در نتیجه اختلاط و تبخیر بیشتر قطرات ایجاد می شود.

در سال ۲۰۱۵ جینگجینگ یه و همکاران[۸] تأثیر نوع سوخت، نسبت هم ارزی، گاز حامل، فشار عملیاتی، و سرعت جت هوا بر پایداری احتراق و انتشار آلاینده ها را بصورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آنها سه نوع سوخت اتانول، استون و n-هپتان را تبخیر کرده و به کمک هوا یا نیتروژن به محفظه احتراق منتقل کردند. از جمله نتایجی که به آن رسیدند این است که پایداری احتراق به شدت به نوع سوخت وابسته است، مثلا n-هپتان که به دلیل اشتعال سریع آن تحت همه شرایط فشار بالایی که مورد مطالعه قرار گرفت، ناپایدارترین است. همچنین با افزایش فشار در تمام سوخت ها شاهد افزایش میزان NO_X تولیدی شدند. از دیگر نتایجی که به آن دست یافتند این است که افزایش سرعت جت هوا باعث کاهش دمای اوج می شود و این خود انتشار NO_X را کاهش می دهد همچنین زمانی که سوخت به جای هوا توسط نیتروژن حمل می شود، انتشار NO_X کاهش می یابد.

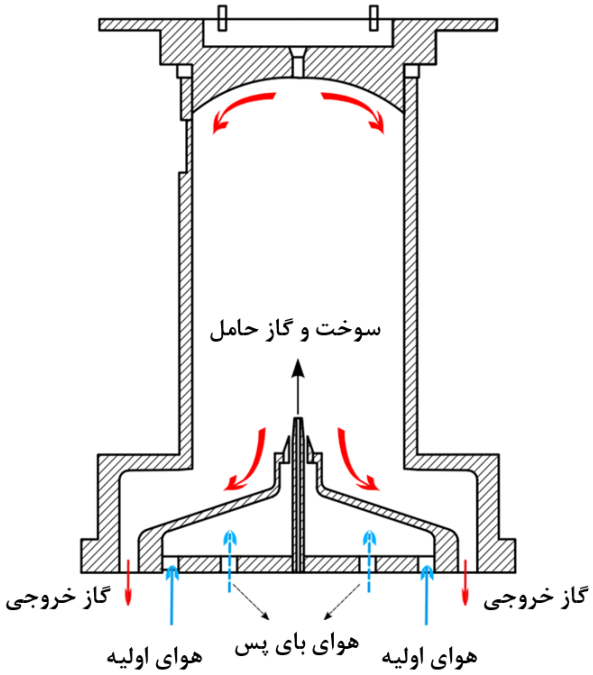


شکل ۸: نمودار شماتیک از راه اندازی آزمایشی[۷]

در شکل ۹ محفظه احتراق را مشاهده می کنید که برخلاف مطالعات گذشته، آرایش نازل متفاوتی در این مطالعه برای احتراق غیر پیش مخلوط اتخاذ شده است. به طور خلاصه، حالت پیش گرم برای گرم کردن کل محفظه احتراق است، پس از آن احتراق به حالت احتراق بدون شعله تغییر می کند. سوخت های مایع شامل اتانول (خلوص بالای ۹۶٪)، استون (خلوص بالای ۹۹٫۸٪). و n-هپتان (خلوص بیش از ۹۹٪)، تبخیر شده و در یک بخاری الکتریکی در بالادست احتراق با یک گاز حامل مخلوط می شوند.

برای جلوگیری از تراکم در طول لوله سوخت، سوخت و گاز حامل تا ۴۴۳ کلوین گرم می شوند. از هوا یا نیتروژن به عنوان گاز حامل استفاده می شود که به ترتیب با نرخ ۰٫۰۹۷۵ گرم بر ثانیه و ۰٫۰۹۴۴ گرم بر ثانیه تزریق می شود. ورودی حرارتی ۴/۷ کیلووات بود که شدت حرارتی را برای همه آزمایش‌ها ۷ مگاوات بر متر مکعب می‌دهد.

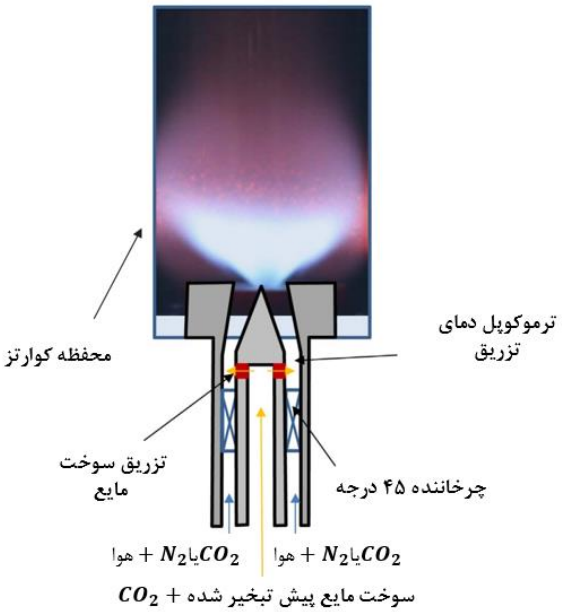
لوله‌های هوای بای‌پس که هوا در آن‌ها توسط گازهای خروجی پیش گرم نمی‌شود، در مرکز بازگیرنده نصب می‌شوند تا دمای پیش‌گرم هوا را در صفحه خروجی جت هوا کنترل کنند. مخلوط کردن هوای گرم اولیه با مقدار معینی از هوای بای پس سرد به دستیابی به دمای پیش گرم مورد نظر کمک می کند. دمای پیش‌گرم روی ۵۰ ± ۸۷۳ کلوین تنظیم می‌شود تا از خوداشتعالی واکنش‌دهنده‌ها اطمینان حاصل شود. مخلوطی از هوای اولیه و هوای بای پس از نازل هوا تزریق می شود. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، سوخت و گاز حامل از یک نازل سوخت مرکزی به محفظه احتراق اصلی تزریق می شوند. نازل سوخت و نازل هوا متحدالمرکز هستند، اما نازل سوخت ۱٫۴۴ میلی متر بالاتر از صفحه خروجی نازل هوا قرار دارد. دو قطر نازل هوا، ۱۰ میلی‌متر و ۶٫۲ میلی‌متر، برای بررسی اثر سرعت جریان حرکت جت هوا استفاده شد و قطر نازل سوخت در ۲ میلی‌متر ثابت نگه داشته شد. قسمت بالای نیمکره ای داخل محفظه احتراق اصلی، گردش مجدد گازهای خروجی را هدایت می کند و واکنش دهنده ها را قبل از احتراق رقیق می کند. ترکیبی از پیش گرم کردن هوا و چرخش مجدد قوی محصولات داغ شرایط احتراق بدون شعله را ایجاد می کند.



شکل ۹: محفظه احتراق بدون شعله جینگ جینگ یه و همکاران. شامل یک محفظه اشتعال، محفظه احتراق اصلی (۵۸ میلی متر در ۵۸ میلی متر در ۲۰۰ میلی متر) و یک دستگاه بازگیرنده [1]برای پیش گرم کردن هوا با گرمای بازیابی شده از گازهای خروجی است[۸].

در سال ۲۰۱۸ خلیل و گوپتا[۹] که احتراق بدون شعله را احتراق پراکنده بی رنگ[2] (CDC) می نامند، با هدف تقویت احتراق بدون شعله با استفاده از دو سوخت مایع از پیش تبخیر شده جی پی ۸[3] و اتانول در یک مشعل چرخشی آزمایشات خود را انجام دادند.

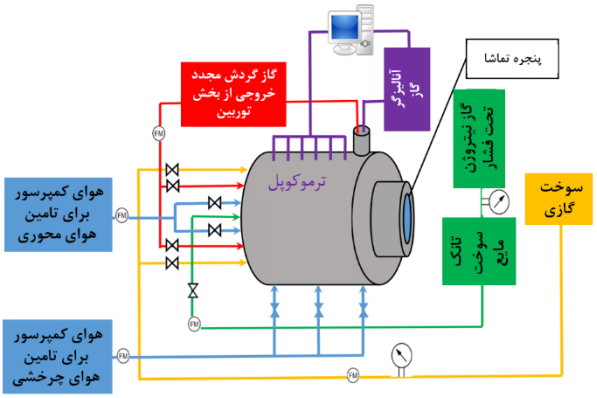
خلیل و گوپتا برای راه اندازی مشعل، متان به خط هوا تزریق کردند و هنگامی که مشعل تثبیت شد، سوخت به تدریج به سوخت مایع (به صورت بخار) تبدیل شد تا اینکه مشعل کاملاً با سوخت مایع کار کرد. یکی از چالش هایی که خلیل و گوپتا با آن روبرو بودند این بود که هر دو سوخت مورد بررسی، جی پی ۸ و اتانول، دارای سرعت شعله آرام بسیار بالاتری در مقایسه با متان هستند که این می تواند باعث ناپایداری شود زیرا مشعل چرخشی مورد استفاده در آزمایش ها برای سوخت های گازی طراحی شده بود درحالیکه سوخت مایع از قبل تبخیر شده در مقایسه با سوخت گازی چگالی زیادی خواهد داشت که منجر به سرعت جریان کمتر در سوراخ‌های تزریق می‌شود. این سرعت پاشش پایین، همراه با سرعت سوختن بالاتر سوخت‌های مایع در دماهای بالاتر، در حالی که از پیش تبخیر شده تزریق می‌شدند، منجر به تمایل بیشتر به بازگشت به عقب به سمت محل تزریق شد. این سناریو منجر به نوسان شعله بین نقطه تزریق و چرخاننده[4] در پایین دست خواهد شد.که این ناپایداری با افزودن دی اکسید کربن به خط سوخت مایع کاهش می یابد؛ بطوریکه سرعت جریان را از طریق پورت های تزریق سوخت مایع افزایش داده و به تثبیت شعله کمک می کند. همچنین مشاهده کردند که افزودن دی اکسید کربن به کاهش هرگونه کک شدن یا ترک خوردگی سوخت مایع نیز کمک می کند. دی اکسید کربن اضافه شده به خط سوخت، سرعت جریان را به طور قابل توجهی در خطوط تغذیه سوخت افزایش داد و زمان ماند در خطوط را به کمتر از ۱ ثانیه کاهش داد. این افزودن دی اکسید کربن هر گونه تجزیه حرارتی را به حداقل می رساند. برای پیش تبخیر، خط سوخت مایع را (سوخت مایع + دی اکسید کربن) با استفاده از نوارهای گرمایشی[5] گرم کردند، در حالی که مخلوط هوا، نیتروژن و دی اکسید کربن با استفاده از یک پیش گرم کن هوا گرم شد. بدنه مشعل نیز با استفاده از نوار گرمایشی گرم می شود. این امر از متراکم شدن سوخت مایع در داخل مشعل پس از تبخیر در خط سوخت مایع جلوگیری می کند. نوارهای گرمایش و پیش گرمکن هوا برای حفظ دما در نقطه تزریق در $۷۰۰K \pm ۱۰K$ کنترل می شدند(شکل ۱۰). مقدار دی اکسید کربن اضافه شده به سوخت حداقل مقدار مورد نیاز برای عملکرد پایدار مشعل بود. خلیل و گوپتا آزمایش ها در مقادیر بالاتر (تا ۱۲۵ درصد از حداقل مقدار مورد نیاز) انجام دادند وبه نتیجه جالب و غیر منتظره ای رسیدند و آن این است که این آزمایشات هیچ تاثیری از مقدار اضافی دی اکسید کربن در خط سوخت بر روی رفتار کلی شعله و انتشار گازهای گلخانه ای مشاهده نشد.



شکل۱۰: شماتیک مشعل چرخشی خلیل و گوپتا. مشعل در لوله کوارتز با قطر داخلی ۳ اینچ و طول ۱۲ اینچ محبوس شده است[۹].

آدام کسانی و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۹ با نگاه ویژه به طرح هایی که تا آنموقع ارائه شده بودند و دسته بندی آنها، یک محفظه احتراق بدون شعله با هدف ساده کردن هندسه ساختاری یک احتراق بدون شعله با سوخت مایع و فرآیند احتراق کلی برای دستیابی به حالت بدون شعله طراحی کردند. همانطور که متوجه شدید طرح های قبلی که در این مقاله ارائه شدند، اکثر این طرح ها هندسه های کاملاً پیچیده ای داشتند و همچنین در مقایسه با مقیاس صنعتی بسیار کوچک بودند. آدام و همکارانش نیز به این مسئله آگاه بودند بنابراین، یک احتراق بدون شعله با سوخت مایع در مقیاس نیمه صنعتی با استفاده از هندسه استوانه‌ای ساده طراحی کردند تا هزینه ساخت را به حداقل برساند و ثابت کنند که ساختار هندسی حداقل تأثیر را بر میزان موفقیت در دستیابی به حالت بدون شعله دارد(شکل ۱۱).

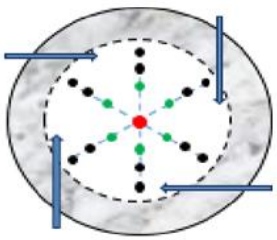
[1] recuperator
[2] Colorless Distributed Combustion
[3] JP-8
[4] swirler
[5] heating tapes



شکل ۱۱: تنظیم آزمایش آدام و همکاران[۱۰].

محفظه احتراق تازه طراحی شده دارای دو لایه مواد در ساخت است. دیواره داخلی محفظه احتراق از سیمان نسوز صنعتی با درجه حرارت بالا ساخته شده است که توسط یک لایه ضخیم از دیواره فولادی ضد زنگ پوشانده شده است. قطر داخلی محفظه احتراق ۳۰۰ میلی متر است، در حالی که ضخامت لایه نسوز ۶۵ میلی متر است و به دنبال آن دیواره بیرونی فولاد ضد زنگ با ضخامت ۱۰ میلی متر قرار دارد. ۱۲ ورودی هوا به طور مماس برای وارد کردن جریان چرخشی به محفظه احتراق نصب شده بودند. از سوی دیگر، ۱۸ پورت ورودی در کناره ورودی در یک آرایه شش ضلعی مستقر بودند. این درگاه‌ها بین ورودی‌های هوا، ورودی سوخت گاز یا ورودی‌های بازچرخش گاز اگزوز (EGR)[1] قابل تعویض هستند. در مرکز آرایه شش ضلعی یک اتمایزر سوخت مایع قرار دارد(شکل ۱۲ را ببینید). در همین حال، کانال اگزوز در بالای محفظه احتراق در انتهای دیگر، روبروی قسمت ورودی قرار دارد. یک پنجره مشاهده ساخته شده از کوارتز امکان بازرسی تجسم را فراهم می کند.

در مرحله اول تحقیق، آزمایش هایی با استفاده از سوخت گازی برای تولید حالت بدون شعله انجام شد. سوخت LPG با موفقیت برای دستیابی به حالت بدون شعله با استفاده از پیکربندی که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، استفاده شد که خود یک گام مهم در تولید حالت بدون شعله در یک محفظه بزرگ بود. در نهایت نیز برای سوخت مایع از این محفظه استفاده کردند و به نتایج قابل قبولی رسیدند.



شکل ۱۲: ترکیبات درگاه‌های کناری ورودی(قرمز: تزریق کننده سوخت مایع، سبز: سوخت گاز، مشکی: هوای محوری، فلش ها: هوای چرخشی)[۱۰]

در سال ۲۰۲۱ مردانی و همکاران[۱۱] احتراق اسپری نفت سفید تحت شرایط متعارف و رقیق شده گرم بصورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند و تأثیر جداگانه متغیرهای مختلف از جمله غلظت اکسیژن، دما و سرعت هوای هم‌جریان، سرعت جریان سوخت و فشار تزریق و در نهایت نوع نازل اسپری بر پارامترهای متعدد مانند پایداری شعله، ساختار، درخشندگی، میدان دما، و توزیع کیفی رادیکال CH، و همچنین HCO و NO_2 با دقت کمتر، در منطقه واکنش، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها در ادامه ذکر می شود:

۱- افزایش در فشار تزریق و دمای هم جریان[2]، پایداری شعله اسپری را افزایش می‌دهد، در حالی که رقیق‌سازی پایداری شعله را کاهش می‌دهد.

۲- الگوی اسپری مخروطی جامد با زاویه پاشش کمتر از مخروط های توخالی با زاویه پاشش بیشتر، پایداری بهتری دارد.

۳- سوخت‌های مایع، در مقایسه با سوخت‌های گازی، برای ایجاد شعله پایدار، به دمای پیش گرمایش بالاتری برای همان سطح رقت نیاز دارند.

۴- اثرات ترکیبی پیش گرمایش و رقیق سازی ساختار شعله اسپری را به گونه ای تغییر می دهد که حجم شعله کاهش می یابد، میدان دما یکنواخت تر می شود، دمای پیک به کمتر از ۱۵۰۰ کلوین محدود می شود و نوسانات دما به طور قابل توجهی کاهش می یابد، که ظاهرا به شرایط رژیم احتراق بدون شعله نزدیک می شود.

بخش آزمایش از یک میله مرکزی متقارن تشکیل شده است که توسط یک لوله بیرونی احاطه شده است که در آن اسپری سوخت مایع به صورت عمودی از طریق یک اتمایزر چرخشی فشار تجاری به جت حلقوی هوای هم‌جریان تزریق می‌شود.

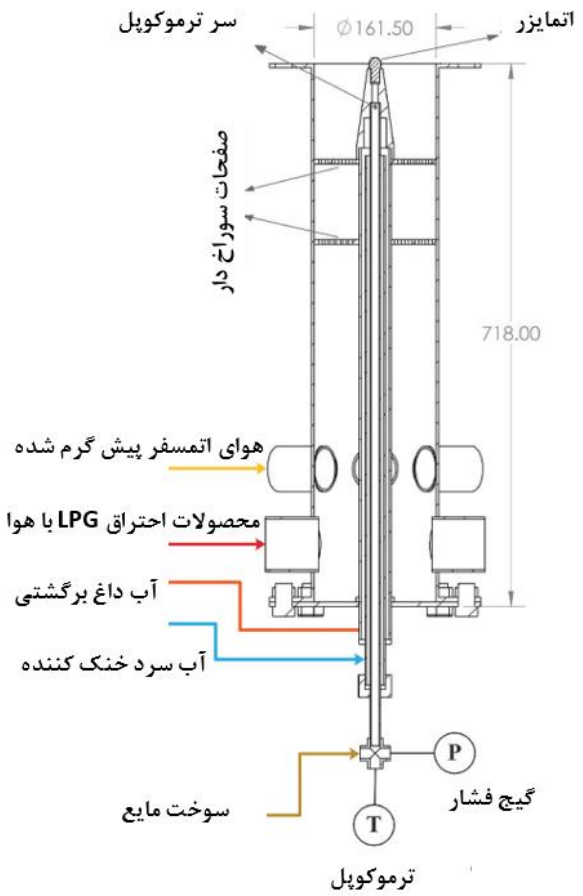
هوای اتمسفر یا به مشعل ثانویه یا مستقیماً به بخش آزمایش (مشعل اولیه) توسط یک دمنده کانال جانبی عرضه می شود(شکل ۱۳ را ببینید). برای اطمینان از تبخیر نشدن سوخت مایعی که در داخل لوله مرکزی جریان دارد، میله مرکزی با یک سیستم خنک کننده آب مدار بسته خنک می شود. سوخت مایع توسط یک پمپ به بخش تست عرضه می شود. نفت سفید به عنوان سوخت اولیه برای کاربرد گسترده آن در صنعت و ترکیب شیمیایی پیچیده استفاده می شود که رفتار احتراق آن را از سایر سوخت های سبک تک جزئی متمایز می کند. برای بررسی اثرات زاویه پاشش و الگوی پاشش، از چهار نوع نازل مختلف استفاده کرده اند.

همچنین با تحلیل نتایج اندازه گیری دما نشان دادند که ناحیه ای از گاز با دمای بالا در مجاورت محور مرکزی شعله وجود دارد(که به عنوان هسته شعله در نظر گرفته می شود) که در آن منطقه نسبتاً سردتری در زیر هسته شعله ظاهر می شود که احتمالاً در نتیجه تبخیر قطرات است. علاوه بر این، افزایش سرعت جریان هوا، هسته شعله را بلند می کند و منطقه سرد زیر آن را گسترش می دهد. با این حال، افزایش فشار تزریق باعث تقویت هسته شعله و افزایش دمای اوج آن می شود.

در نهایت توصیه شد که برای نزدیک شدن هرچه بیشتر به شرایط عملی در مشعل های تجاری، افزایش بیشتر دمای پیش گرمایش و رقیق شدن دو راهکار عملی هستند و همچنین داده هایی تجربی ارائه شده در آن مقاله می تواند برای صحت سنجی کار های عددی که در آینده صورت می گیرد و در رابطه با احتراق سوخت مایع از طریق اسپری در شرایط بدون شعله می باشند بکار گرفته شود.

[1] exhaust gas recirculation (EGR)

[2] co-flow



شکل ۱۳ مشعل استفاده شده در آزمایش مردانی و همکاران[۱۱].

نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی شد مهمترین اقدامات انجام شده در زمینه ایجاد احتراق بدون شعله با استفاده از سوخت مایع جهت رسیدن به مقیاس های صنعتی بررسی شود و طرح های پیشنهادی و مزایا و محدودیت های آنها روشن شود. سوخت های مایعی که در صنعت استفاده می شوند معمولا بازدهی خوب ولی تولید آلاینده بالایی دارند از طرفی احتراق بدون شعله هم تولید آلاینده را کاهش می دهد و هم بازده را افزاش می دهد بنابراین این ایده که این نوع احتراق را برای سوخت مایع بکار ببریم بسیار ایده کاربردی خواهد بود. در ادامه نتایجی که بدست آمده است بصورت خلاصه ذکر می شود.

روغن های سنگین و همچنین زغال سنگ با اینکه کاملاً بدون شعله نمی سوزند، ولی همچنان با انتشار شار حرارتی یکنواخت از حالت احتراق معمولی بهتر عمل می‌کنند. برای راه اندازی مشعل های با سوخت مایع اسپری شده، بدلیل دشوار بودن شروع اشتعال با سوخت مایع ابتدا با یک سوخت گازی (LPG یا متان) سیستم راه اندازی می شود سپس به تدریج سوخت گازی از مدار خارج شده و سوخت مایع وارد مدار می شود(سیستم دوگانه) نوع دیگری از محفظه های احتراق هستند که به دو قسمت تقسیم می شوند (احتراق دو مرحله ای) که ارتباط بین دو محفظه با یک سوراخ ۳۰ الی ۶۰ میلی متری برقرار می شود. پس از راه اندازی احتراق در محفظه اول، محصولات احتراق آن به محفظه دوم رفته و به سبب قطر گذار کوچک و همچنین حالت همگرا بودن قسمت بالایی هر دو محفظه، گردش مجدد محصولات احتراق و همچنین رقیق شدن واکنش دهنده ها به شدت افزایش می‌یابد و این شرایط احتراق بدون شعله را فراهم می کند. پیکربندی های دیگری نیز طراحی شده اند تحت عنوان جریان چرخشی که مزیت این پیکربندی ها اختلاط بیشتر و بهتر سوخت با هوا و تبخیر بهتر سوخت می باشد اما دو مشکل عمده دارند اول آنکه چگالی قطرات زیاد شده و حرکت آنان کندتر می شود و اگر سرعت جریان افزایش یابد، مشکلات لیفت آف و عدم پایداری شعله بوجود می آید و مشکل دوم آنست که با افزایش بار حرارتی، رقت واکنش دهنده ها کاهش می یابد. مشکل اول را با حمل سوخت توسط گاز دی اکسید کربن حل کردند و مشکل دوم نیز با اصلاح هندسه شعله به دو حالت پخ دار یا نیمکره ای حل شد.

فهرست علائم

K_V	نرخ گردش مجدد گاز دودکش،
R_{dil}	نسبت رقت واکنش‌دهنده،
SMD	قطر متوسط ساتر، μm
T_{avg}	دمای میانگین کوره، $^{\circ}C$

مراجع

1- V. Mahendra Reddy and S. Kumar, 2013, “Development of high intensity low emission combustor for achieving flameless combustion of liquid fuels,” *Propuls. Power Res.*, vol. 2, no. 2, pp. 139–147.

2- A. Cavaliere and M. De Joannon, 1989, “Mild combustion,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 30, no. 4. pp. 329–366, 2004, doi: 10.1016/j.pecs.2004.02.003.

3- R. E. Charles and G. S. Samuelsen,1989 , “An experimental data base for the computational fluid dynamics of combustors,” *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 111, no. 1, pp. 11–14.

4- M. Sommerfeld and H.-H. Qiu, 1998, “Experimental studies of spray evaporation in turbulent flow,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 19, no. 1, pp. 10–22.

5- R. Weber, J. P. Smart, and W. Vd Kamp, 2005, “On the (MILD) combustion of gaseous, liquid, and solid fuels in high temperature preheated air,” *Proc. Combust. Inst.*, vol. 30 II, no. 2, pp. 2623–2629.

6- M. Derudi and R. Rota, 2011, “Experimental study of the mild combustion of liquid hydrocarbons,” *Proc. Combust. Inst.*, vol. 33, no. 2, pp. 3325–3332.

7- V. M. Reddy, A. Katoch, W. L. Roberts, and S. Kumar, 2015, “Experimental and numerical analysis for high intensity swirl based ultra-low emission flameless combustor operating with liquid fuels,” *Proc. Combust. Inst.*, vol. 35, no. 3, pp. 3581–3589.

8- J. Ye, P. R. Medwell, E. Varea, S. Kruse, B. B. Dally, and H. G. Pitsch, 2015, “An experimental study on MILD combustion of prevaporised liquid fuels,” *Appl. Energy*, vol. 151, no. August, pp. 93–101.

9- A. E. E. Khalil and A. K. Gupta, 2018, “Fostering distributed combustion in a swirl burner using prevaporized liquid fuels,” *Appl. Energy*, vol. 211, no. July 2017, pp. 513–522.

10- A. Kasani, M. A. Wahid, M. A. Mazlan, A. Saat, and M. Yasin, 2019, “Development of liquid fueled flameless combustor,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2062, no. January.

11- A. Mardani, A. Azimi, and H. Karimi Motaalegh Mahalegi, 2021, “An Experimental Study on Kerosene Spray Combustion Under Conventional and Hot-Diluted

Conditions," *Combust. Sci. Technol.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–40.