

مطالعه تجربی احتراق گاز زیستی در یک محفظه احتراق میکروتوربینی در نسبت‌های مختلف گاز طبیعی / کربن دی‌اکسید

میلاذ باستانی^۱، صادق تابع جماعت^{۲*}، محمود مانی^۳، حسین عیشینی^۴

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا، دانشگاه امیرکبیر، تهران، Milad.bastani@aut.ac.ir

۲- استاد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، Sadegh@aut.ac.ir

۳- استاد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، Mani@aut.ac.ir

۴- دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، H_ashini@aut.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۶، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۲/۱۲/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱)

چکیده: در این پژوهش، در تکمیل مطالعات گذشته که متمرکز بر ساختار شعله و مقدار آلاینده‌گی بوده‌اند، احتراق گاز زیستی، متشکل از متان و کربن دی‌اکسید، در یک محفظه احتراق میکروتوربینی به صورت تجربی مطالعه شده و تأثیر وجود کربن دی‌اکسید و تغییر نسبت آن در مخلوط سوخت بر پارامترهای عملکردی محفظه و آلاینده‌گی تولیدی آن بررسی می‌شود. مطالعه در دو توان حرارتی مختلف و در نسبت هم‌ارزی ثابت برای ۲ گاز زیستی انجام شده است و با احتراق گاز طبیعی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که نسبت کربن دی‌اکسید در سوخت تأثیر زیادی بر ساختار شعله احتراق آشفته و پارامترهای عملکردی دارد. افزایش نسبت کربن دی‌اکسید در سوخت، سرعت احتراق را کاهش داده و باعث تأخیر در احتراق و افت دمای شعله می‌شود. بنابر نتایج بدست آمده، اگرچه افزودن CO₂ باعث کاهش مقدار آلاینده‌گی NOx خروجی از محفظه شده است، ولی مقدار CO تولیدی محفظه افزایش یافته و دمای خروجی و متعاقباً، بازده محفظه افت کرده است. نتایج این مطالعه گواه این نکته است که استفاده از چنین سوخت‌هایی در سیستم‌های احتراقی با مشعل‌های پیچشی ممکن است ولی باید روش‌هایی برای کاهش انتشار CO استفاده شود.

کلیدواژگان: گاز زیستی، محفظه احتراق میکروتوربینی، نسبت کربن دی‌اکسید/ گاز طبیعی، آلاینده‌گی، عملکرد احتراقی

مقدمه

با توجه به رشد پیوسته‌ی تقاضای انرژی و محدودیت منابع فسیلی، گاز زیستی^۱ به‌عنوان یک سوخت تجدیدپذیر، به‌عنوان یکی از جایگزین‌های تأمین انرژی مدنظر است [۱]. گاز زیستی، محصول جانبی حاصل از تجزیه مواد آلی است و عمدتاً از CH₄ و مقادیر زیادی CO₂ تشکیل شده است. در گاز محل دفن زباله، نسبت غلظت معمول CH₄ به CO₂ در گاز زیستی از ۶۵/۳۵٪ تا ۳۵/۵۵٪ متغیر است [۲، ۳].

توافق‌نامه‌هایی مانند پروتکل کیوتو، استانداردهای سخت‌گیرانه‌ای را برای کاهش انتشار گاز CO₂ و دیگر گازهای گلخانه‌ای وضع می‌کنند. یک روش کاهش این آلاینده‌ها، سوزاندن سوخت‌های حاصل از زیست‌توده است [۴]. سیستم‌های تولید توان پراکنده براساس میکروتوربین‌های گازی، یک روش مؤثر برای استفاده از سوخت‌های زیستی هستند [۵]. در سال‌های اخیر، با سیاست‌های حمایتی و مشوق‌های مالی دولتی، استفاده از سیستم‌های تولید توان پراکنده به‌سرعت رو به

¹ Biogas

گسترش است [۶]. تا به حال، مطالعات مختلفی اثر استفاده از سوخت زیستی را بر پارامترهای عملکردی سیستم‌های تولید توان پراکنده مانند بازده الکتریکی، تنوع‌پذیری سوختی و عملکرد اقتصادی بررسی کرده‌اند [۸،۷].

سوخت گاز زیستی علی‌رغم مزایایی که دارد، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار نمی‌گیرد، زیرا ترکیب سوخت می‌تواند تحت تأثیر مواد اولیه و فرآیند تخمیر متفاوت بوده و در نتیجه، منجر به عملکرد احتراق نامشخص و آسیب به سخت‌افزار احتراق شود [۹]. بنابراین برای فراهم کردن امکان استفاده از این سوخت‌ها، درک تأثیر رقیق‌سازی با CO₂ بر سینتیک احتراق سوخت ضروری است.

به‌طور مشخص اضافه شدن کربن دی‌اکسید به سوخت گاز طبیعی بر فرآیندهای شیمیایی و فیزیکی احتراق مخلوط سوخت تأثیر می‌گذارد. وجود این‌گونه اضافی در گاز زیستی می‌تواند اثرات چشمگیری بر ویژگی‌های احتراق سوخت داشته باشد و شعله را حداقل به چهار طریق تحت تأثیر قرار دهد: (۱) از طریق تغییر در گرمای ویژه مخلوط و کاهش دمای شعله آدیاباتیک (اثرات حرارتی)، (۲) کاهش غلظت گونه‌های فعال (اثرات انتقال یا رقیق‌سازی)، (۳) اثرات سینتیک شیمیایی (مشارکت رقیق‌کننده در واکنش‌ها) و (۴) کاهش انتقال حرارت تشعشعی از محصولات داغ و اتلاف حرارت تابشی [۱۰]. افزودن کربن دی‌اکسید به متان می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی دمای شعله [۱۱][۱۲]، سرعت شعله [۱۳]، غلظت دوده [۱۲]، ارتفاع شعله [۱۱][۱۲]، ارتفاع بلندشدگی شعله [۱۱]، زمان جرقه‌زنی [۱۲] و سرعت شعله آرام [۱۴] را تغییر دهد. به‌طور کلی، این تغییرات بر پایداری شعله، انتشار آلاینده‌ها و راندمان احتراق تأثیر دارد [۱۵].

تعداد کمی از این مسائل به‌وضوح قابل درک است و مطالعه اثر رقیق‌سازی شعله‌های متان با CO₂، برای اطمینان از احتراق کارآمد و ایمن سوخت‌های جایگزین مانند گاز زیستی ضروری است. پیامدهای افزودن CO₂ به سوخت‌های هیدروکربنی در مشعل‌های تحقیقاتی مختلفی در هر دو حالت پیش‌آمیخته و غیرپیش‌آمیخته مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۶]. به‌طور کلی، در احتراق گاز زیستی دمای شعله، انتقال حرارت تابشی، غلظت NO_x و پایداری کاهش می‌یابند. مطالعات نشان داده است که وجود CO₂ در مخلوط سوخت بر سینتیک شیمیایی رخ داده در احتراق گاز زیستی، بی‌اثر نیست. وجود CO₂ در مخلوط سوخت، احتراق را به تأخیر انداخته و سرعت شعله را کاهش می‌دهد [۱۶]. بررسی‌ها در مورد تأثیر افزودن CO₂ بر آزادسازی حرارت شعله‌ی آرام گاز زیستی/هیدروژن مخلوط شده توسط وی و همکاران [۱۷]، نشان داد که افزودن CO₂ بر نرخ آزادسازی حرارت یا واکنش‌پذیری شعله از طریق اثرات رقیق‌سازی، حرارتی و شیمیایی آن تأثیر می‌گذارد. انتظار می‌رود که سرعت شعله مخلوط سوخت با تغییر خواص انتقالی و حرارتی مخلوط، تحت تأثیر قرار بگیرد.

ساداناندان و همکاران [۱۸]، اثر رقیق‌سازی با CO₂ بر ویژگی‌های شعله و انتشار آلاینده‌های احتراق پیش‌آمیخته‌ی متان/ هوا در یک محیط محدود شده، با حضور جسم مانع و میدان جریان تحت تأثیر پیچش را با استفاده از روش‌های تشخیصی نوری و لیزری بررسی کرده‌اند. آن‌ها نشان داده‌اند که در شرایط رقیق‌سازی سوخت با کربن دی‌اکسید، مشخصات ناحیه آزادسازی گرما تحت تأثیر رقیق‌سازی قرار می‌گیرد. به‌طور کلی، ناحیه آزادسازی حرارت در شعله‌ی سوخت‌های با کربن دی‌اکسید، در مقایسه با شعله‌ی سوخت بدون کربن دی‌اکسید پراکنده‌تر است. همچنین، در مقایسه با شعله‌ی سوخت‌های بدون رقیق‌سازی، شعله‌ی سوخت‌های رقیق‌شده، شدت کمتری دارد که این تغییرات می‌تواند به دلیل ظرفیت حرارتی مولی بالاتر CO₂ باشد که منجر به کاهش سرعت شعله و افت دمای آن می‌شود [۱۶][۱۸].

علاوه بر این، رقیق‌سازی با CO₂ باعث می‌شود که پایداری شعله ضعیف شود، زیرا رقیق شدن گازهای نسوخته بر واکنش‌دهی شعله تأثیر می‌گذارد. رقیق‌کننده‌های موجود در گاز همچنین می‌توانند باعث ایجاد شعله‌ی بلند شده شوند (شعله از نقطه لنگرگاه بالای انژکتور فاصله می‌گیرد). در مورد شعله‌ی جت آشفته‌ی غیرپیش‌آمیخته^۱، افزایش رقیق‌سازی با CO₂ منجر به کاهش سرعت شعله و در نتیجه، افزایش ارتفاع بلندشدن شعله می‌شود [۱۹].

¹ Turbulent diffusion jet flame

همچنین، نتایج مطالعات حاکی از آن است که رقیق‌سازی با CO_2 منجر به کاهش انتشار NO_x می‌شود [۱۸]. ساب و همکاران [۱۵] در مطالعات عددی خود نشان دادند که گاز زیستی باعث کاهش انتشار NO_x تا حدود ۳۳٪ و کاهش انتشار CO_2 تا حدود ۱۰٪ می‌شود. رقیق‌سازی با CO_2 به سه طریق، منجر به کاهش انتشار NO_x و دوده می‌شود: خود اثر رقیق‌سازی و از دسترس خارج کردن گونه‌های فعال، اثرات حرارتی و کاهش دمای شعله و همچنین، دخالت در واکنش‌های شیمیایی [۱۸]. گونه CO_2 به‌عنوان یک عامل مؤثر بر سینتیک واکنش و در نتیجه، تشکیل و تخریب NO_x در نظر گرفته می‌شود. کاهش NO_x حرارتی با کاهش دمای شعله حاصل می‌شود.

بررسی جنبه‌های شیمیایی و فیزیکی افزودن CO_2 به CH_4 در شعله‌های پخشی جریان متقابل^۱ توسط وانگ و همکاران [۲۰]، کاهش دمای شعله و افزایش تولید CO را به دلیل کاهش اکسیداسیون CO به CO_2 نشان می‌دهد. گونه CO_2 با O_2 برای هیدروژن اتمی رقابت کرده و منجر به تشکیل CO می‌شود. واکنش CO_2 با رادیکال‌های هیدروکربنی نیز ممکن است یک عامل کمک کننده در تشکیل CO باشد [۲]. یکی دیگر از عوامل مهم برای انتشار CO ، دمای شعله آدیاباتیک است. اشاره شده است که اتلاف حرارت تشعشعی با افزایش غلظت CO_2 ، زیاد شده و باعث کاهش بیشتر دمای شعله آدیاباتیک و افزایش غلظت CO می‌شود [۱۰]. غلظت‌های بالای CO_2 ، باعث افزایش انتشار CO و تضعیف شعله شده و بر نقطه خاموشی رقیق^۲ تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، مشاهده شد که روش تزریق سوخت و نسبت تکانه نیز بر انتشار CO اندازه‌گیری شده، تأثیر دارد [۲].

نتایج مطالعات گذشته به‌وضوح نشان می‌دهد که امکان استفاده از سوخت گاز زیستی در سیستم‌های احتراقی با مشعل پیچشی وجود دارد [۲۱]. علی‌رغم نیاز و اشتیاق روزافزون برای استفاده از سوخت‌های جایگزینی مانند گاز زیستی برای تولید توان، دانش فعلی برای طراحی محفظه احتراق بهینه با قابلیت انعطاف‌پذیری سوختی و امکان استفاده از گاز زیستی با نسبت اجزای مختلف کافی نیست. مطالعاتی که تا به حال انجام شده‌اند، غالباً متمرکز بر ساختار شعله و آلاینده‌های تولید شده در محفظه بوده و سایر پارامترهای عملکردی محفظه مغفول مانده‌اند. این موضوع نیاز به انجام مطالعاتی جامع در زمینه تأثیر مصرف گاز زیستی با نسبت اجزای مختلف بر عملکرد احتراقی محفظه را نشان می‌دهد تا از این راه بتوان دید مناسب‌تری بر چالش‌ها و موانع پیش رو داشت. از این‌رو، این مطالعه در پی آن است تا دامنه تحقیقات در مورد تأثیر مصرف مخلوط سوخت کربن دی‌اکسید/ گاز طبیعی را علاوه بر ساختار شعله و آلاینده‌های تولیدی، به سایر پارامترهای عملکردی محفظه احتراق مانند راندمان و متوسط دمای خروجی گسترش دهد و دلایل این تغییرات را توضیح دهد. بعلاوه اینکه، بیشتر مطالعات تاکنون معطوف به مشعل‌ها یا مدل‌های ساده بوده و بنابراین، بررسی عملکرد یک محفظه احتراق میکروتوربین واقعی، با تمام ویژگی‌های هندسی لازم به نظر می‌رسد.

بنابراین چنانچه گفته شد، در این مطالعه عملکرد احتراقی یک محفظه احتراق میکروتوربینی از نوع قوطی و احتراق غیرپیش‌آمیخته برای گاز طبیعی و دو گاز زیستی با نسبت اجزای کربن دی‌اکسید به متان، به ترتیب ۶۵/۳۵ و ۵۵/۴۵ درصد در دو توان حرارتی مختلف و نسبت هم‌ارزی ثابت انجام و تجزیه و تحلیل می‌شود. ارزیابی عملکرد محفظه نیز با مقایسه ساختار شعله در محفظه با استخراج توزیع دما توسط ترموکوپل در ناحیه ثانویه محفظه احتراق و در خروجی آن و همچنین، آلاینده تولیدی محفظه شامل CO و NO_x و بعلاوه، پارامترهای عملکردی، بازده و متوسط دمای خروجی محفظه احتراق، در نقاط آزمون مختلف انجام می‌شود تا نشان داده شود که چگونه افزودن CO_2 می‌تواند بر عملکرد احتراقی و ویژگی‌های حرارتی محفظه تأثیر بگذارد.

^۱ Counterflow diffusion Flame

^۲ Lean Blowout

روش آزمایشگاهی

در این مطالعه، از بستر آزمون محفظه احتراق دانشگاه امیرکبیر استفاده شده است که در مطالعات مختلفی از آن استفاده شده است [۲۲]. این بستر آزمون خود از زیرسیستم‌های مختلفی، شامل ۱. سیستم ورودی هوا، ۲. سیستم تأمین سوخت، ۳. مقطع آزمون، ۴. سیستم خروجی گاز محصولات احتراق و دودکش، ۵. سیستم جرقه‌زن و ۶. سیستم کنترل و داده‌برداری تشکیل شده است. ارتباط بین زیرسیستم‌های مختلف و برخی از اجزای آن‌ها در زیر تشریح شده است.

ساختار بستر آزمون محفظه احتراق در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، هوا توسط دمنده‌ی سانتریفیوژی در شرایط اتمسفریک تأمین شده و با یک رواتر با حداکثر ظرفیت ۳۰۰ مترمکعب بر ساعت و دقت ۰.۲٪، دبی آن اندازه‌گیری می‌شود و به مقطع آزمون می‌رسد. هوای ورودی به مقطع آزمون در این مطالعه، در فشار ۱ بار مطلق و ۴۰ درجه سانتی‌گراد بوده است.

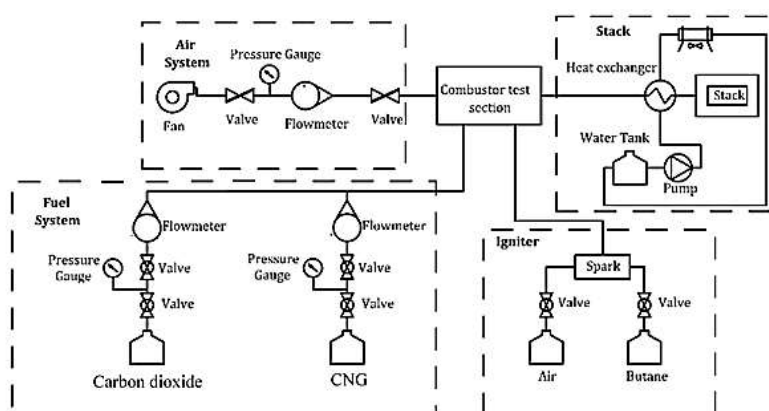


Figure 1- AUT combustor test rig piping and instrumentation diagram

شکل ۱- نمودار ابزار دقیق و لوله‌کشی بستر آزمون محفظه احتراق امیرکبیر

سوخت مورد استفاده در این آزمایش، شامل کربن دی‌اکسید و گاز طبیعی از کپسول‌ها تأمین شده است. دبی سوخت و هوا نیز با استفاده از شیرهای دستی تنظیم می‌شود. مخلوط سوخت از اختلاط نسبت مشخصی از دو نوع سوخت، کربن دی‌اکسید و گاز طبیعی، حاصل می‌شود و دبی سوخت کربن دی‌اکسید و گاز طبیعی پیش از اختلاط، توسط رواترهایی با دقت به ترتیب ۰/۶ و ۰/۵ لیتر بر دقیقه اندازه‌گیری می‌شود. همچنین، این رواترها به ترتیب برای گاز کربن دی‌اکسید و گاز طبیعی کالیبره شده‌اند. برای اندازه‌گیری فشار و دمای سوخت و هوا نیز از گیج فشار بردن و ترمومترهای مکانیکی استفاده شده است.

در مقطع آزمون، محفظه احتراق قرار گرفته است. قطر داخلی مقطع آزمون، ۱۶۴ میلی‌متر است. ترموکوپل‌های اندازه‌گیری دما و جرقه‌زن در این قسمت تعبیه شده است. جرقه‌زن مورد استفاده از نوع پیش‌مخلوط بوتان/ هوا بوده و در ناحیه اولیه محفظه احتراق قرار می‌گیرد و با مشتعل شدن محفظه، حذف می‌شود. ۲ دریچه نیز برای دیدن داخل محفظه بر روی مقطع آزمون وجود دارد. قسمت انتهایی مقطع آزمون نیز وظیفه هدایت گازهای حاصل از احتراق را به سیستم دودکش برعهده دارد.

محفظه احتراق استفاده شده در این مطالعه، محفظه‌ای از نوع قوطی است که برای میکروتوربین‌های گازی ساخته شده است. این محفظه احتراق مدل پیشرفته‌ای از محفظه احتراق موتور Spey است [۲۳]. مشخصات محفظه و طرح کلی آن در شکل ۲a نشان داده شده است. محفظه احتراق، یک استوانه با قطر خارجی ۷۴ میلی‌متر و طول ۲۱۰ میلی‌متر است. خروجی

محفظه احتراق نیز، مستطیلی شکل با ابعاد 21×96 میلی‌متر مربع و افقی است. دیواره‌های محفظه احتراق نیز از فولاد ضد زنگ 310 ساخته شده و دارای ضخامت 3 میلی‌متر است. این محفظه مانند مدل اصلی، هدایت کننده جریان¹ ندارد. محفظه احتراق دارای 2 ردیف سوراخ هوا است. قطر تمام سوراخ‌ها 10 میلی‌متر و ردیف اول دارای 6 و ردیف دوم دارای 12 سوراخ است. شکل $2a$ محل این سوراخ‌ها را نشان می‌دهد. چرخاننده این محفظه، دارای 20 تیغه با زاویه 45 درجه است. عدد پیچش حاصل با شرایط فیزیکی توصیف شده مطابق با رابطه داده شده در مرجع [24]، برابر 0.185 محاسبه می‌شود. چرخاننده استفاده شده در این محفظه دارای عدد پیچش بالایی است و بنابراین، می‌تواند پایداری خوبی برای محفظه فراهم کند.

انژکتور مورد استفاده در این مطالعه، یک انژکتور پیچشی است که سوخت را با حرکت پیچشی به محفظه تزریق می‌کند (شکل $2b$). محور سوراخ‌های انژکتور با یکدیگر و با محور انژکتور زاویه 19 درجه داشته که باعث می‌شود جت سوخت در سه جهت شعاعی، مماسی و محوری حرکت داشته و بنابراین، منجر به اختلاط بهتر سوخت و هوا می‌شود.

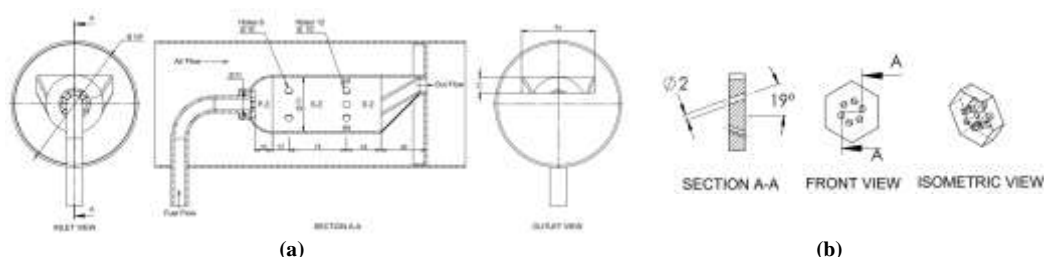


Figure 2- Geometry of test stand (a) combustion chamber and (b) fuel injector (adapted from [25] with permission)
 شکل ۲- (الف) هندسه محفظه احتراق و (ب) انژکتور استفاده شده در بستر آزمون (عکس برگرفته از [25] با کسب اجازه از مولفین)

برای اندازه‌گیری دما در این مطالعه، از ترموکوپل‌های نوع K استفاده شده است که می‌توانند تا دمای 1350 درجه سانتی‌گراد را با دقت 2 درجه اندازه‌گیری کنند. قبل از آزمایش، ترموکوپل‌ها برای محدوده دمای عملیاتی محفظه احتراق کالیبره شدند. برای ثبت اطلاعات ترموکوپل‌ها از داده‌بردار استفاده شده است که می‌تواند داده‌های 24 ترموکوپل را به‌طور هم‌زمان ضبط کند. نقاط سیاه رنگ شکل $3a$ ، محل قرارگیری ترموکوپل‌ها برای اندازه‌گیری توزیع دما در ناحیه‌ی ثانویه‌ی محفظه را نشان می‌دهد. همچنین، نقاط سیاه رنگ نشان داده شده در شکل $3b$ ، مکان هندسی نقاط اندازه‌گیری دما در ارتفاع میانی خروجی محفظه احتراق است. برای اندازه‌گیری دما در هر کدام از نقاط آزمون تجربی، پس از زمان ثابت 60 ثانیه، ترموکوپل‌ها در فواصل ثابت 5 میلی‌متری به داخل محفظه احتراق برده می‌شوند. در هر مرحله، جمع‌آوری داده‌ها به مدت 90 ثانیه (با نرخ یک نمونه در ثانیه) انجام شده و میانگین این مقادیر ضبط شده به‌عنوان دمای آن نقطه محاسبه می‌شود. برای به دست آوردن توزیع دمای خروجی نیز ترموکوپل با فواصل 5 میلی‌متری حرکت می‌کند. به دلیل برخی مشکلات عملی، امکان اندازه‌گیری دما در کل محفظه احتراق وجود ندارد. به‌عنوان مثال، قرار دادن یک ترموکوپل در ناحیه اولیه محفظه، الگوی جریان و نواحی گردشی را در این ناحیه که نقش مهمی در تثبیت شعله دارد، تغییر داده و منجر به انحراف نتایج می‌شود. همچنین، از آنالیزور گاز Testo 350 XL برای اندازه‌گیری آلاینده‌های تولیدی محفظه احتراق شامل NO ، NO_2 و CO در خروجی محفظه استفاده شده است که می‌تواند نسبت مولی این گونه‌ها را با دقت 0.1 PPM اندازه‌گیری کند.

¹ snout

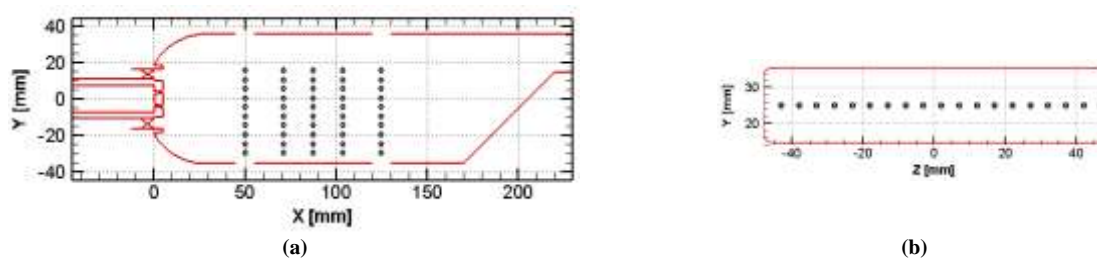


Figure 3- Temperature measurement points by thermocouples (a) inside the combustion chamber and (b) at the combustor outlet (adapted from [25] with permission)

شکل ۳- نقاط اندازه‌گیری دما با ترموکوپل در (الف) داخل محفظه احتراق (ب) خروجی محفظه (عکس برگرفته از مرجع [۲۵] با کسب اجازه از مؤلفین)

شرایط نقاط آزمون تجربی

در مطالعه حاضر، یک محفظه احتراق میکروتوربین گازی از نوع قوطی در شرایط اتمسفریک مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. سوخت مصرفی، مخلوط گاز کربن دی‌اکسید و گاز طبیعی در نسبت‌های مشخص است. این آزمایش برای ۶ نقطه کاری انجام شده است که هر نقطه آزمون متناسب با یک توان حرارتی و نسبت اختلاط مشخص اجزای مخلوط سوخت است. شرایط هرکدام از نقاط آزمون در جدول ۱ آمده است. برای قابل مقایسه بودن اثر تغییر نسبت اجزای سوخت یا توان حرارتی، سعی شده است تا آزمون‌ها در نسبت هم‌ارزی برابر انجام شود.

جدول ۱- مشخصات نقاط آزمون تجربی

Table 1- Experimental test points specifications

Operating Point	Air Flow Rate (Nm ³ /hr)	Natural Gas Fuel Flow Rate (NL/min.)	Carbon Dioxide Fuel Flow Rate (NL/min.)	Overall Equivalence ratio	Thermal Power (kw)
I	65	16 (100%)	0 (0%)	0.17	9.7
II	60	16 (65%)	9 (35%)	0.17	9.7
III	60	16 (55%)	15 (45%)	0.17	9.7
IV	45	12 (100%)	0 (0%)	0.17	7.3
V	45	12 (65%)	7 (35%)	0.17	7.3
VI	45	12 (55%)	11 (45%)	0.17	7.3

نتایج

به‌طور کلی نتایج این مطالعه در سه دسته، ۱. توزیع دما، ۲. انتشار آلاینده‌ها و ۳. پارامترهای عملکردی محفظه در نقاط آزمون مختلف، که هر نقطه آزمون متناسب با یک توان حرارتی و نسبت اختلاط مشخص اجزای مخلوط سوخت است، قابل تقسیم‌بندی است.

در ادامه، در بخش اول، توزیع دما در ناحیه ثانویه محفظه احتراق که با استفاده از ترموکوپل‌ها اندازه‌گیری شده‌اند، ارائه می‌شود. در بخش دوم، مقادیر آلاینده‌های مهم تولیدی محفظه احتراق، CO و NO_x در نقاط آزمون مختلف، تجزیه و تحلیل می‌شوند. در بخش سوم نیز پارامترهای عملکردی محفظه احتراق شامل راندمان و متوسط دمای خروجی محفظه برای نقاط آزمون مختلف مقایسه شده است.

توزیع دما

شکل ۴، توزیع دمای اندازه‌گیری شده با ترموکوپل‌ها در ناحیه ثانویه محفظه احتراق و به‌طور متناسب، شکل شعله‌ی گاز طبیعی و گاز زیستی را برای نقاط آزمون تجربی جدول ۱ در این آزمایش تجربی نشان می‌دهد. باید این نکته ذکر شود که در تمام نقاط آزمون، شعله پایداری در محفظه ایجاد شد.

از نتایج پیداست که در شرایط استفاده از گاز طبیعی، در ناحیه ثانویه محفظه، شعله غالباً در نزدیکی لاینر ایجاد می‌شود و دما در قسمت مرکزی کمتر از لاینر است که می‌توان آن را به شکل جریان پیچشی ایجاد شده ناشی از وجود چرخاننده در مسیر هوای ورودی به محفظه مرتبط دانست. همچنین، در انتهای این ناحیه نیز شعله به سمت مرکز محفظه حرکت کرده که ناشی از ورود هوا از سوراخ‌های رقیق‌سازی است [۲۶].

مشخص است که افزودن CO_2 به گاز طبیعی، اندازه و شکل ناحیه آزادسازی حرارت را تغییر داده است و شعله در ناحیه ثانویه تضعیف و دچار افت دما شده است. شعله‌ی تشکیل شده بر روی لاینر در ناحیه ثانویه در شرایط استفاده از گاز طبیعی، با افزودن کربن دی‌اکسید به مخلوط سوخت، تضعیف می‌شود و چنانچه مشخص است، دمای ابتدایی ناحیه ثانویه که متأثر از شکل‌گیری و شدت احتراق در ناحیه اولیه محفظه است، با رقیق‌سازی سوخت کاهش می‌یابد و حاکی از کاهش شدت و نرخ واکنش‌ها (آزادسازی حرارت) در ناحیه اولیه محفظه احتراق است. مطالعات مختلفی به این نکته اشاره کرده‌اند که شعله‌های مخلوط سوخت رقیق شده با کربن دی‌اکسید نیز در مقایسه با شعله‌های سوخت بدون کربن دی‌اکسید شدت کمتری دارند [۱۶][۱۸]. همچنین، دیده می‌شود که شعله در بخش انتهایی ناحیه ثانویه محفظه بزرگ‌تر شده که حاکی از به تأخیر افتادن احتراق تا انتهای ناحیه ثانویه است. چنان‌که در مطالعات گذشته نیز بدان اشاره شده است و نشان داده شده است که پس از افزودن CO_2 ، ناحیه واکنشی شعله طولانی‌تر و همچنین گسترده‌تر شده و موقعیت ناحیه واکنشی هسته شعله تغییر می‌کند [۲۱]. به‌علاوه اینکه، با افزودن کربن دی‌اکسید به مخلوط سوخت، توزیع دمای یکنواخت‌تری حاصل شده است و کانتور دما در هر مقطع از محفظه، نسبت به شرایط مصرف گاز طبیعی، تغییرات با شدت کمتری را نشان می‌دهد.

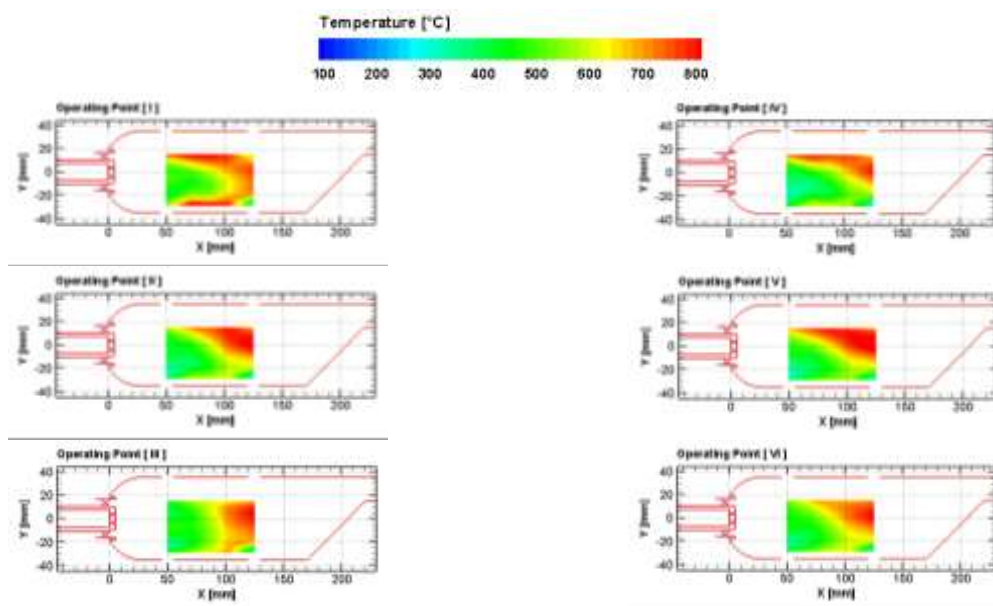


Figure 4- Temperature distribution of combustor secondary zone at operating points of Table 1

شکل ۴- توزیع دمای ناحیه‌ی ثانویه‌ی محفظه در شرایط آزمون جدول ۱

برای مقایسه‌ی بهتر چگونگی توزیع دما در محفظه احتراق در نقاط آزمون، پروفیل دمای اندازه‌گیری شده در مقاطع مختلف با نسبت کربن دی‌اکسید متفاوت در مخلوط سوخت، در شکل ۵ آورده شده است.

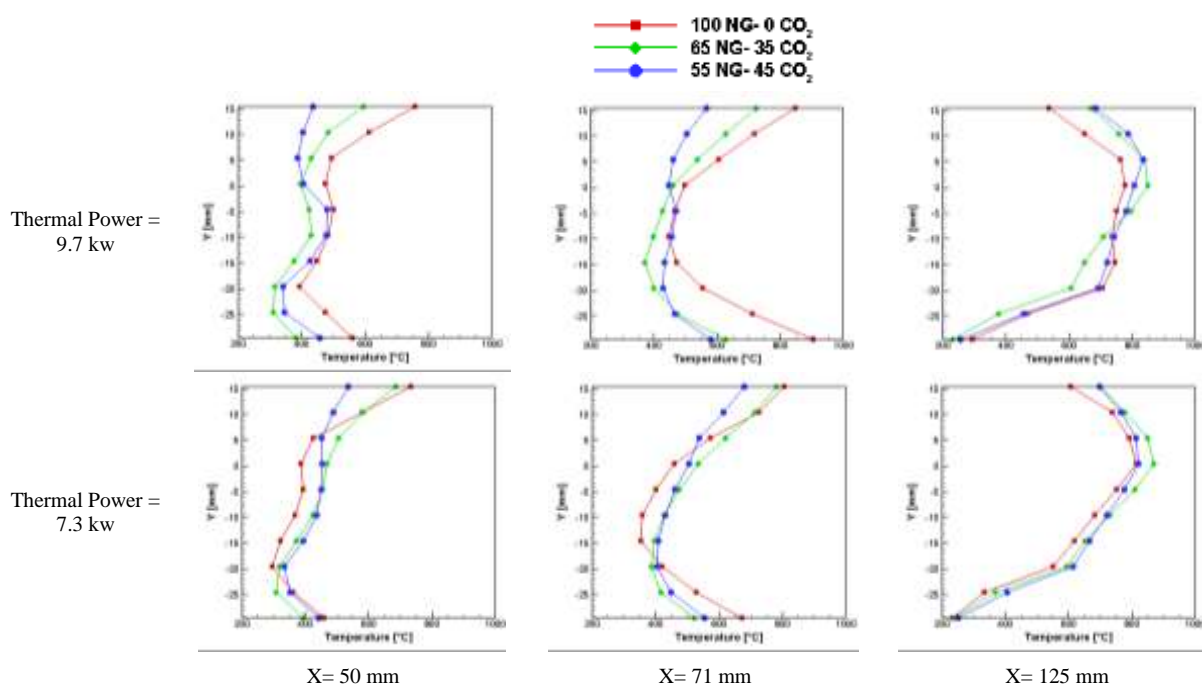


Figure 5- Temperature profile at different sections of the combustor secondary zone in different experimental test conditions

شکل ۵- پروفیل دمای مقاطع مختلف ناحیه ثانویه محفظه احتراق در شرایط مختلف آزمون تجربی

به طور مشخص پیداست که در ابتدای ناحیه ثانویه افزایش نسبت کربن دی اکسید، سبب افت دمای شعله شده است. بیشترین افت دما نیز در محل بیشینه دمای احتراق گاز طبیعی، یعنی در نزدیکی دیواره لاینر در مقطع $x=71$ mm دیده می شود که افت دمایی در حدود 300 درجه است. این کاهش دما در تمام طول ناحیه ثانویه و در نزدیکی لاینر قابل مشاهده است.

با مصرف تنها گاز طبیعی به عنوان سوخت، بیشتر احتراق در نزدیکی لاینر در ابتدای ناحیه ثانویه انجام می شود و بیشینه دمایی در حدود 900 درجه سانتی گراد، نشان دهنده نرخ بالای واکنش ها و شدت زیاد آزادسازی حرارت در آن جا است. در انتهای ناحیه ثانویه، شعله به سمت مرکز محفظه حرکت کرده و کاهش بیشینه دمای آن به حدود 750 درجه سانتی گراد، نشان از کاهش شدت و ضعیف تر شدن شعله است. این در حالی است که در احتراق مخلوط گاز طبیعی و کربن دی اکسید، با پیشروی در طول ناحیه ثانویه، بر دمای شعله افزوده می شود. به صورتی که در ابتدای ناحیه ثانویه ($x=50$ mm) بیشینه دمای ضبط شده برای گاز زیستی ($55\% \text{ NG} + 45\% \text{ CO}_2$)، در حدود 450 درجه سانتی گراد است، ولی در انتهای ناحیه ثانویه ($x=125$ mm) بیشینه دمایی آن به حدود 800 درجه سانتی گراد می رسد. اختلاف روند تغییرات دمایی برای سوخت گاز طبیعی در مقایسه با گاز زیستی، نشان دهنده تأخیر احتراق در صورت استفاده از گاز زیستی است که بیان کننده کاهش نرخ واکنش با افزودن کربن دی اکسید به گاز طبیعی است. افزودن رقیق کننده، غلظت سوخت و دمای شعله را کاهش داده و در نتیجه سرعت واکنش را کم می کند [۲۱].

این موضوع خود سبب تغییر شکل ناحیه آزادسازی حرارت و افزایش طول شعله می شود. تغییر شکل شعله سوخت رقیق شده با CO_2 عمدتاً تحت تأثیر دو عامل است. اولین عامل تأثیرگذار سرعت واکنش است. سرعت شعله آرام، پارامتر مهمی در توضیح تغییرات ناحیه واکنشی است و بیشتر مطالعات سوخت رقیق شده با CO_2 ، تغییر شکل ناحیه آزادسازی حرارت و افزایش طول شعله را به کاهش سرعت واکنش نسبت می دهند [۱۱، ۱۲، ۲۷].

در مقایسه با گازهای بی‌اثر مانند N_2 ، CO_2 نه تنها سوخت را رقیق می‌کند، بلکه در واکنش تجزیه CH_4 و O_2 نیز شرکت کرده و مانع از پیشروی آن می‌شود [۲۸،۲۷]. به طوری که طول شعله سوخت رقیق شده با CO_2 بیشتر از شعله سوخت رقیق شده با N_2 است. مطالعات [۲۱]. نشان داده است که حضور CO_2 در سوخت بی‌اثر نبوده و این گونه، در واکنش‌های زیر شرکت می‌کند،



واکنش ۲ به‌عنوان واکنش اصلی اثر شیمیایی CO_2 شناخته شده است. نشان داده شده است که افزودن CO_2 به مخلوط سوخت، به‌طور مؤثری نسبت مولی رادیکال‌های H ، O و OH را از طریق واکنش‌های ۱-۳ کاهش می‌دهد. کاهش نسبت مولی رادیکال‌های H ، O و OH که در واکنش‌های زیر حضور دارند، مانع از شروع واکنش‌های زنجیره‌ای و واکنش‌های زنجیره‌ای انتشاری تجزیه CH_4 می‌شوند.



بنابراین، سرعت واکنش تجزیه‌ی CH_4 کاهش یافته و باعث می‌شود CH_4 بیشتری توسط جریان به پایین دست شعله حمل شود و ناحیه‌ی واکنشی شعله طولانی‌تر شود.

دومین عامل تأثیرگذار ممکن است نسبت تکانه هوا به سوخت باشد [۲۹]. افزایش دبی CO_2 باعث می‌شود که سرعت جریان سوخت افزایش یافته و زمان ماندگاری سوخت کوتاه شود. بخشی از سوخت قبل از واکنش کامل به پایین دست شعله حمل شده و باعث می‌شود، ناحیه واکنشی شعله تغییر کند. لیو و همکاران نیز در مطالعات خود [۳۰]، شعله‌های رقیق CO_2 و N_2 را مقایسه کرده و معتقد بودند که افزایش طول شعله به دلیل افزایش تکانه ایجاد می‌شود.

نکته دیگری که باید بدان توجه کرد، چنانچه در شکل ۵ و در موقعیت‌های $x=50$ تا $x=103$ میلی‌متری مشخص است، توزیع دما با افزایش نسبت کربن دی‌اکسید یکنواخت‌تر شده است. برای مثال، برای توان $9/7$ کیلووات و در موقعیت $x=71$ mm، اختلاف کمینه و بیشینه دما برای شعله گاز طبیعی، مخلوط سوخت نوع ۱ ($65\% NG + 35\% CO_2$) و نوع ۲ ($55\% NG + 45\% CO_2$) به ترتیب برابر ۴۵۰، ۲۵۰ و ۱۵۰ درجه است که مشاهده می‌شود با افزایش نسبت کربن دی‌اکسید، اختلاف دمای بیشینه و کمینه کاهش یافته است. این یکنواختی خود حاکی از گستردگی بیشتر شعله است که دو عامل، کاهش نرخ واکنش و افزایش تکانه سوخت و اختلاط شدیدتر سوخت و هوا را مسبب آن دانست که با کاهش بیشینه دما همراه است. بنابراین نتایج حاکی از آن است که برای یک نسبت هم‌ارزی ثابت، رقیق‌سازی سوخت به‌وسیله‌ی CO_2 تا حد زیادی بر شعله تأثیر می‌گذارد.

آلاینده‌ها

در این بخش، مقدار آلاینده‌های اندازه‌گیری شده در این مطالعه، شامل آلاینده‌ی CO و همچنین، آلاینده‌ی NO_x که مجموع مقدار دو گونه‌ی NO و NO_2 است، برای شرایط آزمون مختلف ارائه و مورد بحث قرار می‌گیرد.

آلاینده‌ی NO_x

در شعله‌های آرام و در سطح مولکولی در شعله‌های آشفته، تشکیل NO_x را می‌توان به چهار فرآیند شیمیایی متمایز نسبت داد، تشکیل NO_x حرارتی، تشکیل سریع NO_x ، تشکیل NO_x ناشی از سوخت و N_2O میانی. در محفظه احتراق توربین گازی،

دو مکانیسم، نقش اصلی را در ایجاد NOx ایفا می‌کنند. NOx حرارتی، که اکسیداسیون نیتروژن موجود در هوای احتراق است. تشکیل NOx حرارتی توسط مجموعه‌ای از واکنش‌های شیمیایی بسیار وابسته به دما که به‌عنوان مکانیسم توسعه‌یافته زلدوویچ^۱ شناخته می‌شود، تعیین می‌شود. واکنش‌های اصلی حاکم بر تشکیل NOx حرارتی از نیتروژن مولکولی به شرح زیر است [۳۱].



نشان داده شده است که واکنش سوم نیز به تشکیل NOx حرارتی، به‌ویژه در شرایط نزدیک به استوکیومتری و همچنین، در مخلوط‌های غنی از سوخت کمک می‌کند.



وجود مکانیسم دیگری که منجر به تشکیل NOx می‌شود، برای اولین بار توسط فنیمور^۲ [۳۲] شناسایی شده و NOx سریع نامیده شد. شواهد خوبی وجود دارد که نشان می‌دهد مکانیزم NOx سریع می‌تواند به مقدار قابل‌توجهی در برخی از محیط‌های احتراقی مانند شرایط دما پایین، شرایط غنی از سوخت و جایی که زمان اقامت کوتاه است، تشکیل شود. مشعل‌های سطحی، سیستم‌های احتراق مرحله‌ای و توربین‌های گازی می‌توانند چنین شرایطی را ایجاد کنند.

ایجاد NOx ناشی از مکانیزم NOx سریع، در طی یک سری از واکنش‌های بسیار سریع با مقیاس‌های زمانی مشابه واکنش‌های احتراق اصلی رخ می‌دهد. واکنش‌های تجزیه‌ی نیتروژن توسط رادیکال‌های CH و CH₂ آغاز شده و منجر به تشکیل رادیکال‌های HCN، NCN، H و NH می‌شود که سپس طی فرآیند اکسیداسیون، به NO تبدیل می‌شود. همچنین، مکانیزم NO سریع وابستگی ضعیفی به دما دارد [۳۳،۳۴].

می‌توان گفت که در محفظه‌های احتراق توربین گازی، سهم مکانیزم NOx سریع به کل NOx حاصل از احتراق، اندک است. با این حال، از آنجایی که انتشار NOx با افزودن CO₂ به مقادیر بسیار پایین کاهش می‌یابد، می‌توان انتظار داشت که اهمیت نسبی مکانیزم NOx سریع افزایش یابد [۱۵].

مقدار آلاینده‌ی NOx تولیدی در هرکدام از نقاط آزمون جدول ۱ در شکل ۶ نشان داده شده است. چنانچه از نمودار پیداست، افزودن کربن دی‌اکسید به گاز طبیعی، اثری مثبت بر انتشار این آلاینده در هر دو توان مورد مطالعه داشته است و افزایش نسبت کربن دی‌اکسید در مخلوط سوخت، منجر به کمتر شدن مقدار NOx شده است، به‌گونه‌ای که مقدار NOx

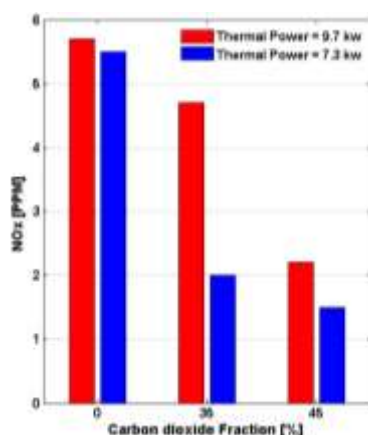


Figure 6- Combustor's NOx emission in different experimental test conditions
 شکل ۶- مقدار آلاینده‌ی NOx تولیدی محفظه احتراق در شرایط مختلف آزمون تجربی

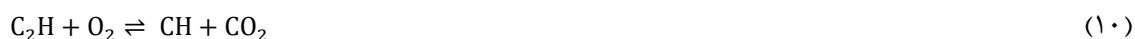
¹ Zeldovich

² Fenimore

تولیدی در دو توان ۹/۷ و ۷/۳ کیلووات به ترتیب از ۵/۷ و ۵/۵ PPM در حالت مصرف تنها گاز طبیعی به ۲/۲ و ۱/۵ PPM در حالت مصرف گاز زیستی نوع ۲ (55% NG + 45% CO₂) رسیده است که کاهش به ترتیب، ۶۱ و ۷۳ درصدی در مقدار NO_x تولیدی محفظه برای هرکدام از این دو نشان می‌دهد. مشخصاً علت پایین‌تر بودن مقدار آلاینده‌ی NO_x در توان پایین‌تر، کمتر بودن دمای محفظه در این توان و در نتیجه، نرخ فعالیت کمتر مکانیزم حرارتی تولید NO_x در توان پایین‌تر است.

با توجه به زمان اقامت کافی جریان در ناحیه ثانویه محفظه، انتظار می‌رود عمده NO_x تولیدی از مکانیزم حرارتی در این ناحیه از محفظه تشکیل شود و تغییر دما در این ناحیه، مستقیماً بر مقدار NO_x حرارتی تولیدی محفظه احتراق مؤثر باشد. باید توجه داشت که با رقیق‌سازی جریان سوخت با کربن دی‌اکسید، چگالی انرژی مخلوط سوخت کاهش می‌یابد. به‌علاوه، با توجه به ظرفیت حرارتی بالای CO₂ و تأثیر شیمیایی رقیق‌سازی مخلوط سوخت با CO₂، افزایش نسبت CO₂ در مخلوط سوخت، منجر به کاهش دمای شعله (چنانچه در شکل ۴، کانتور توزیع دما، افت دما در ناحیه ثانویه محفظه مشخص است و در بخش توزیع دما به آن پرداخته شد) و نرخ واکنش [۱۱] و در نتیجه، کاهش سطح NO_x (کاهش NO_x ناشی از مکانیزم NO_x حرارتی) می‌شود.

همچنین، چنانچه گفته شد، بخش عمده‌ی NO_x تولیدی از مکانیزم NO_x سریع در شعله‌های هیدروکربنی، ناشی از رادیکال CH است. گونه رادیکال CH از طریق دو واکنش اصلی زیر [۲۱] در شعله‌های هیدروکربنی تشکیل می‌شود:



CH عمدتاً در نزدیکی انژکتور سوخت توزیع می‌شود. به‌علاوه، غلظت CO₂ با رقیق‌تر شدن مخلوط سوخت، افزایش می‌یابد و بنابراین، CH تولید شده طی واکنش ۱۰ کاهش می‌یابد. اضافه بر این، چنانچه پیش‌تر گفته شد، رقیق کردن مخلوط سوخت با CO₂ منجر به کاهش نسبت مولی گونه اتمی اکسیژن شده و بدین‌وسیله، تشکیل CH در واکنش ۱۱ تضعیف می‌شود. در نتیجه، به دلیل کاهش CH به‌عنوان پیش‌ساز NO_x در مکانیزم NO_x سریع، می‌توان کاهش NO_x تولیدی ناشی از این مکانیزم را نیز انتظار داشت.

در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است که برای شعله‌های مخلوط سوخت CH₄ رقیق شده با CO₂ که دمایی یکسان با شعله سوخت خالص CH₄ دارند، کاهش کسر مولی NO_x ناشی از تأثیرات حرارتی و شیمیایی در یک حدود است [۱۸]. پس در مجموع، می‌توان کاهش NO_x با رقیق‌سازی سوخت با CO₂ را ناشی از کاهش تولید NO_x ناشی از هر دو مکانیزم حرارتی و سریع دانست.

آلاینده‌ی CO

گونه CO یک گونه میانی در احتراق قلمداد شده و حاصل احتراق ناقص هیدروکربنی شناخته می‌شود که تبدیل آن به گونه پایدار CO₂ کامل نشده است. گونه CO در نواحی با غلظت بالای سوخت، با شدت بیشتری تشکیل می‌شود. وجود چنین نواحی با غلظت بالای سوخت در احتراق غیرپیش‌آمیخته، اجتناب‌ناپذیر است.

شکل ۷ مقدار CO تولیدی محفظه در هریک شرایط آزمون تجربی جدول ۱ را نشان می‌دهد. در شکل ۷ پیداست که رقیق شدن سوخت با CO₂، منجر به افزایش غلظت CO در هر دو توان شده است و مقدار انتشار این آلاینده، با افزایش نسبت کربن دی‌اکسید در مخلوط سوخت گاز زیستی بیشتر نیز شده است. چنانچه در نمودار نیز مشخص است، مقدار آلاینده‌ی CO تولیدی محفظه برای توان‌های ۹/۷ و ۷/۳ کیلووات در حالت مصرف گاز طبیعی برابر ۴۶۶ و ۴۲۹ PPM است که با مصرف گاز زیستی نوع ۲ (55% NG + 45% CO₂)، تولید این آلاینده در محفظه برای دو توان به ترتیب به ۸۵۸ و ۶۳۴ افزایش می‌یابد

که افزایش آن به ترتیب برابر ۸۴ و ۴۸ درصد برای دو توان مورد مطالعه است و مصرف بیشتر گونه متان در توان بالاتر خود سبب تولید بیشتر این آلاینده در توان بالاتر شده است.

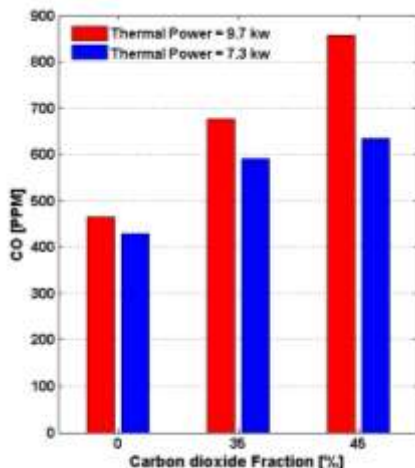


Figure 7- Combustor's CO emission in different experimental test conditions
 شکل ۷- مقدار آلاینده‌ی CO تولیدی محفظه احتراق در شرایط مختلف آزمون تجربی

این افزایش مقدار کربن مونوکسید با افزایش نسبت کربن دی‌اکسید در مخلوط سوخت را می‌توان به دو دلیل نسبت داد. اول اینکه وجود CO₂ در مخلوط سوخت رقیق شده، دمای شعله را کاهش می‌دهد. دمای شعله‌ی پایین‌تر، مصرف CO را در نتیجه کاهش نرخ واکنش اکسیداسیون CO، کم کرده و مقدار CO را افزایش می‌دهد [۱۱]. علاوه بر این، به دلیل واکنش بین رادیکال‌های CO₂ و H در واکنش ۲، افزایش حضور CO₂ در مخلوط سوخت منجر به افزایش نسبت CO می‌شود [۱۸]. همچنین، با توجه به افزایش مقدار CO در خروجی محفظه، به دلیل کاهش نرخ واکنش اکسیداسیون آن، می‌توان انتظار داشت که CO₂ خروجی، افزایش چندانی نداشته باشد. آن‌چنان‌که در مطالعه ساداناندان [۱۸] نشان داده شده است، مقدار CO₂ تولیدی شعله سوخت رقیق شده با CO₂، تقریباً برابر مقدار آن در شعله سوخت بدون رقیق‌سازی است که نشان می‌دهد سوزاندن گاز زیستی، باعث افزایش مقدار CO₂ خالص تولیدی نشده است. وجود CO₂ در سوخت رقیق شده، دمای شعله را کاهش داده و تولید CO را با کاهش نرخ اکسیداسیون آن به CO₂ افزایش می‌دهد. بنابراین، کاهش مقدار CO₂ خالص تولیدی ثبت شده در شعله‌های سوخت رقیق شده با CO₂، به‌طور غیرمستقیم به دلیل کاهش نرخ واکنش تبدیل CO به CO₂ است [۲۰]. همچنین، نتایج گویبریتیت و همکاران [۳۵]، در شعله پیش‌مخلوط نیز نشان داد که با افزایش مقدار رقیق‌سازی مخلوط سوخت با CO₂، مقدار OH، CH و CO₂ به‌صورت خطی کاهش یافت.

پارامترهای عملکردی

برای بررسی تأثیر رقیق‌سازی مخلوط سوخت (با افزودن CO₂ در نسبت‌های مختلف به آن) بر عملکرد محفظه، مقادیر دو پارامتر دمای خروجی و بازده احتراق محفظه در این بخش ارائه و مقایسه می‌شوند. در شکل ۸، تغییر دمای خروجی از محفظه احتراق در نقاط آزمون مختلف جدول ۱ برای نسبت‌های مختلف CO₂ در مخلوط سوخت و همچنین، دو توان حرارتی مختلف نشان داده شده است. مشخص است که با افزایش نسبت CO₂ در مخلوط سوخت در هر دو توان، علی‌رغم ثابت نگه‌داشتن نسبت هم‌ارزی، دمای گاز خروجی از محفظه احتراق افت نسبی دارد. مقایسه‌ی احتراق گاز طبیعی و گاز زیستی نوع ۲ (55% NG + 45% CO₂) نشان می‌دهد که افت متوسط دمای خروجی، برای

توان ۹/۷ کیلووات برابر ۱۲ درجه و برای توان ۷/۳ کیلووات، برابر ۱۶ درجه بوده که برای این دو توان به ترتیب معادل کاهش ۵/۱ و ۳/۷ درصدی متوسط دمای خروجی است. اگرچه با افزایش ۱۰ درصدی نسبت CO₂ در مخلوط سوخت گاز زیستی، افت دما در توان ۹/۷ کیلووات قابل توجه نیست ولی همین مقدار افزایش نسبت کربن دی‌اکسید در توان ۷/۳ کیلووات، افت دمایی قابل ملاحظه‌ای را سبب شده است که می‌توان آن را به نزدیک شدن محفظه به حالت خاموشی در این شرایط نسبت داد. با وجود ثابت نگه‌داشتن نسبت هم‌ارزی و توان حرارتی، انتظار می‌رود دمای خروجی از محفظه ثابت بماند ولی این کاهش دمای خروجی، حاکی از افت عملکرد احتراقی محفظه است و خود تابعی از افت دمای محفظه است که نشان از احتراق ناکامل سوخت زیستی با افزایش نسبت کربن دی‌اکسید است. اگرچه توان حرارتی با ثابت نگه‌داشتن مصرف گاز طبیعی، برای نقاط آزمون مختلف در دو مقدار ثابت مانده است ولی افزودن کربن دی‌اکسید به مخلوط سوخت، از یک طرف با اضافه کردن یک‌گونه اضافی با ظرفیت حرارتی بالا، میزان افزایش دما در محفظه و به تبع متوسط دمای خروجی از محفظه را کاهش می‌دهد [۲۱]. و از طرف دیگر، با شرکت در واکنش ۲ باعث افزایش احتراق ناکامل در محفظه می‌شود [۲۸، ۲۷].

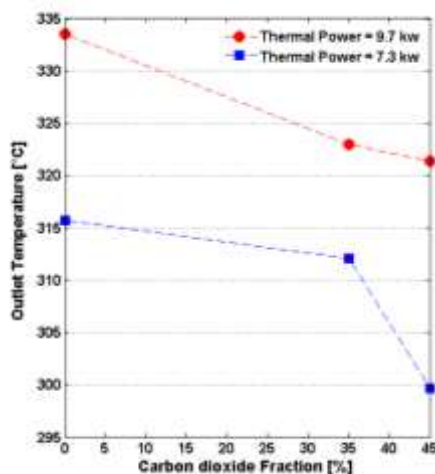


Figure 8- Combustor average outlet temperature in different experimental test conditions

شکل ۸- متوسط دمای خروجی محفظه احتراق در شرایط مختلف آزمون تجربی

توانایی محفظه در استخراج انرژی از سوخت را می‌توان در پارامتر بازده محفظه، مشاهده کرد. مقادیر این پارامتر برای نقاط آزمون تجربی مختلف جدول ۱ در شکل ۹ آورده شده است که براساس رابطه‌ی (۱۲) محاسبه شده‌اند [۳۶]. در این رابطه، C_p ظرفیت حرارتی هوا در فشار ثابت، T_{exit} دمای متوسط در خروجی محفظه، T_{inlet} دمای هوای ورودی به محفظه، \dot{m} دبی جرمی و LHV_{fuel} ارزش حرارتی پایین مخلوط سوخت مورد استفاده است.

$$\eta_{combustion} = \frac{c_p(T_{exit} - T_{inlet})\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}LHV_{fuel}} \quad (12)$$

از آنجا که گونه CO₂ از اجزای مخلوط سوخت، ارزش حرارتی ندارد، بنابراین در تمام نقاط آزمون تجربی برای ثابت نگه داشتن توان حرارتی، مقدار ثابتی از گاز طبیعی استفاده شده است و از این رو، برای هر توان حرارتی، مخرج رابطه‌ی (۱۲) ثابت مانده است. برای هر توان نیز در نسبت‌های مختلف CO₂، دبی هوا مقدار برابری دارد (جز نقطه آزمون ۱) و بنابراین، اختلاف دمای گازهای ورودی و خروجی تعیین کننده بازده محفظه خواهند بود و انتظار می‌رود که نموداری مشابه نمودار ۸ به دست بیاید. با توجه به نمودار ۹، مشخص است که در هر دو توان، با افزودن CO₂ و افزایش نسبت آن در مخلوط سوخت، بازده محفظه افت کرده و محفظه توانایی کمتری در استخراج انرژی موجود در سوخت از خود نشان داده است. این افت بازده برای

توان حرارتی ۹/۷ و ۷/۳ کیلووات، به ترتیب برابر ۹ و ۱۱ درصد است. از این رو، وجود CO₂ در مخلوط سوخت، تأثیر نامناسبی بر احتراق داشته است. چنانچه در بخش قبل نیز دیده شد، افزایش نسبت CO₂ در مخلوط سوخت منجر به افزایش مقدار CO خروجی محفظه شده و بنابراین، افت بازده احتراق در محفظه نیز مؤید این نکته است که رقیق‌سازی سوخت، باعث شده است تا احتراق ناقص‌تری حاصل شود [۲۸،۲۷].

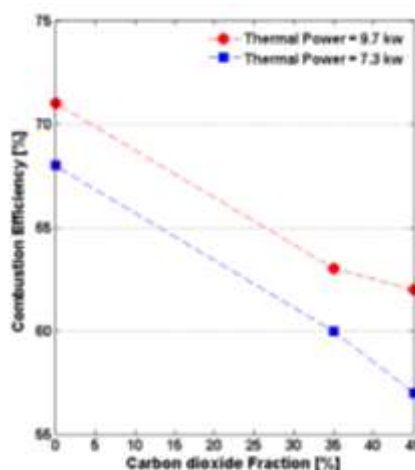


Figure 9- Combustion efficiency in different experimental test conditions

شکل ۹- بازده احتراق محفظه در شرایط مختلف آزمون تجربی

همان‌طور که در این مطالعه دیده شد، افزودن CO₂ به گاز طبیعی در مخلوط سوخت در احتراق محفظه توربین گاز بی‌اثر نبوده و تمامی پارامترها را دستخوش تغییر قرار داده است، ولی با در نظر گرفتن تمامی نتایج ارائه شده، می‌توان مشاهده کرد که گاز زیستی به‌عنوان سوخت جایگزین گاز طبیعی برای استفاده در محفظه احتراق میکروتوربینی و همچنین، توربین‌های گاز، پتانسیل بالایی دارد. اگرچه نرخ انتشار CO بالاتر گاز زیستی در مقایسه با گاز طبیعی، محدودیتی برای این نوع سوخت است، اما در صورت استفاده از روش‌های نوین جهت کاهش انتشار CO با توجه به عملکرد کلی گاز زیستی و بخصوص تأثیر مثبت آن در کاهش NO_x تولیدی محفظه، می‌توان آن را کاندید مناسبی به‌عنوان سوخت جایگزین در نظر گرفت. همچنین، به نظر می‌آید که با تغییرات هندسی محفظه بتوان نواحی احتراقی را به‌صورتی مدیریت نمود که راندمان احتراقی افزایش یابد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، احتراق سوخت دو نوع گاز زیستی با نسبت اجزای مختلف در مقایسه با احتراق گاز طبیعی در یک محفظه احتراق میکروتوربین گازی از نوع قوطی و با احتراق غیرپیش‌آمیخته در دو توان حرارتی مختلف به‌صورت تجربی، مطالعه و نتایج آن، تجزیه و تحلیل شد. جهت تکمیل مطالعات گذشته که بیشتر متمرکز بر ارزیابی رفتار احتراقی هندسه‌های ساده و آلاینده‌گی تولیدی سوخت گاز زیستی بوده‌اند، هدف اصلی این پژوهش ارزیابی تأثیر افزودن کربن دی‌اکسید در نسبت‌های مختلف به گاز طبیعی بر پارامترهای عملکردی محفظه احتراق، میزان آلاینده‌های تولیدی آن و عملکرد احتراقی محفظه یا به عبارتی، توزیع دما و شکل شعله بود. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه نیز به‌صورت خلاصه به شرح زیر است،

۱. با رقیق‌سازی سوخت با CO₂ مشاهده می‌شود که دمای شعله در ناحیه ثانویه محفظه، کاهش می‌یابد. همچنین، شعله‌ی حاصل از احتراق گاز زیستی یکنواخت‌تر و گسترده‌تر بوده و تا انتهای ناحیه ثانویه محفظه به تأخیر می‌افتد. بیشتر این تغییرات ناشی از کاهش سرعت واکنش در اثر افزودن CO₂ به گاز طبیعی است.

۲. مقدار آلاینده‌ی NO_x تولید شده در محفظه با مصرف گاز زیستی در مقایسه با احتراق گاز طبیعی، کاهش می‌یابد. افت دمای محفظه ناشی از حضور گونه رقیق کننده باعث کاهش NO_x تولیدی از طریق مکانیزم NO_x حرارتی شده و کم شدن نرخ تولید پیش‌ساز CH موردنیاز در مکانیزم تولید NO_x سریع نیز تولید آلاینده‌ی NO_x از این مکانیزم را کاهش می‌دهد.

۳. استفاده از گاز زیستی در محفظه احتراق به‌جای گاز طبیعی، سبب افزایش مقدار CO تولیدی محفظه می‌شود. دخالت کربن دی‌اکسید در واکنش اکسیداسیون کربن مونوکسید و افت دما را می‌توان عوامل مؤثر بر این موضوع دانست. امکان‌پذیر کردن استفاده از گاز زیستی در محفظه احتراق مستلزم به کار بردن روش‌هایی برای کاهش این آلاینده تولیدی محفظه است.

۴. در این مطالعه، مشاهده شد که متوسط دمای خروجی از محفظه احتراق با افزودن کربن دی‌اکسید به گاز طبیعی و افزایش نسبت آن در مخلوط سوخت کم می‌شود که می‌توان آن را به حضور گونه‌ی اضافی با ظرفیت حرارتی بالا نسبت داد که علاوه بر آن، با دخالت در واکنش‌ها نیز باعث عدم تکمیل زنجیره احتراق می‌شود.

۵. به تبعیت از کاهش دمای خروجی از محفظه، نتایج افت بازده احتراقی محفظه را نشان دادند که این امر نیز به دلیل افزایش احتراق ناقص در محفظه ناشی از دخالت گونه‌ی اضافی در زنجیره‌ی واکنش‌ها است و از موانع استفاده از این سوخت در محفظه احتراق موجود است.

به‌عنوان زمینه‌های ادامه این پژوهش در نظر است تا با شناسایی عوامل مؤثر بر عملکرد محفظه، میزان تأثیر پارامترهای مختلف بررسی شده و تلاش شود تا محفظه احتراق موجود به‌گونه‌ی اصلاح شود که آلاینده‌ی CO پایین‌تر و بازده احتراقی بالاتری داشته باشد.

منابع

- [1] O. norouzi, F. Di Maria, and M. El-Hoz, "A short review of comparative energy, economic and environmental assessment of different biogas-based power generation technologies," *Energy Procedia*, vol. 148, pp. 846–851, Aug 2018, doi: 10.1016/j.egypro.2018.08.111.
- [2] C. J. Mordant and W. C. Pierce, "Design and preliminary results of an atmospheric-pressure model gas turbine combustor utilizing varying CO₂ doping concentration in CH₄ to emulate biogas combustion," *Fuel*, vol. 124, pp. 258–268, May 2014. doi: 10.1016/j.fuel.2014.01.097.
- [3] F. M. Quintino, T. P. Trindade, and E. C. Fernandes, "Biogas combustion: Chemiluminescence fingerprint," *Fuel*, vol. 231, pp. 328–340, Nov 2018. doi: 10.1016/j.fuel.2018.05.086.
- [4] M. Miltner, A. Makaruk, and M. Harasek, "Review on available biogas upgrading technologies and innovations towards advanced solutions," *J. Clean. Prod.*, vol. 161, pp. 1329–1337, Sep 2017. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.06.045.
- [5] S. Jain, S. Roy, A. Aggarwal, D. Gupta, V. Kumar, and N. Kumar, "Study on the Parameters Influencing Efficiency of Micro-Gas Turbines: A Review," in *ASME 2015 Power Conference*, Jun 2015. doi: 10.1115/POWER2015-49417.
- [6] J. Han, L. Ouyang, Y. Xu, R. Zeng, S. Kang, and G. Zhang, "Current status of distributed energy system in China," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 288–297, Mar 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.10.147.
- [7] T. Sung, S. Kim, and K. C. Kim, "Thermoeconomic analysis of a biogas-fueled micro-gas turbine with a bottoming organic Rankine cycle for a sewage sludge and food waste treatment plant in the Republic of Korea," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 127, pp. 963–974, Dec 2017. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.08.106.
- [8] S. E. Hosseini, H. Barzegaravval, M. A. Wahid, A. Ganjehkaviri, and M. M. Sies, "Thermodynamic assessment of integrated biogas-based micro-power generation system," *Energy Convers. Manag.*, vol. 128, pp. 104–119, Nov 2016. doi: 10.1016/j.enconman.2016.09.064.
- [9] M. Fischer and X. Jiang, "An investigation of the chemical kinetics of biogas combustion," *Fuel*, vol. 150, pp. 711–720, Jun 2015. doi: 10.1016/j.fuel.2015.01.085.
- [10] K. Lee, H. Kim, P. Park, S. Yang, and Y. Ko, "CO₂ radiation heat loss effects on NO_x emissions and combustion instabilities in lean premixed flames," *Fuel*, vol. 106, pp. 682–689, Apr 2013. doi: 10.1016/j.fuel.2012.12.048.
- [11] J. I. Erete, K. J. Hughes, L. Ma, M. Fairweather, M. Pourkashanian, and A. Williams, "Effect of CO₂ dilution on the structure and emissions from turbulent, non-premixed methane-air jet flames," *J. Energy Inst.*, vol. 90, no. 2, pp. 191–200, Apr 2017. doi: 10.1016/j.joei.2016.02.004.
- [12] H. Mortazavi, Y. Wang, Z. Ma, and Y. Zhang, "The investigation of CO₂ effect on the characteristics of a methane diffusion flame," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 92, pp. 97–102, Apr 2018. doi: 10.1016/j.expthermfluidsci.2017.11.005.
- [13] D. Han, A. Satija, J. P. Gore, and R. P. Lucht, "Experimental study of CO₂ diluted, piloted, turbulent CH₄/air premixed flames using high-repetition-rate OH PLIF," *Combust. Flame*, vol. 193, pp. 145–156, 2018. doi: 10.1016/j.combustflame.2018.03.012.

- [14] X. Hu, F. Bai, C. Yu, and F. Yan, "Experimental Study of the Laminar Flame Speeds of the CH₄/H₂/CO/CO₂/N₂ Mixture and Kinetic Simulation in Oxygen-Enriched Air Condition," *ACS Omega*, vol. 5, no. 51, pp. 33372–33379, Dec 2020. doi: 10.1021/acsomega.0c05212.
- [15] A. Guessab, A. Aris, M. Cheikh, and T. Baki, "Combustion of Methane and Biogas Fuels in Gas Turbine Can-type Combustor Model," *J. Appl. Fluid Mech.*, vol. 9, no. 7, pp. 2229–2238, Jul 2016. doi: 10.18869/acadpub.jafm.68.236.24289.
- [16] W. Zeng, H. Ma, Y. Liang, and E. Hu, "Experimental and modeling study on effects of N₂ and CO₂ on ignition characteristics of methane/air mixture," *J. Adv. Res.*, vol. 6, no. 2, pp. 189–201, Mar 2015. doi: 10.1016/j.jare.2014.01.003.
- [17] Z. L. Wei, C. W. Leung, C. S. Cheung, and Z. H. Huang, "Effects of equivalence ratio, H₂ and CO₂ addition on the heat release characteristics of premixed laminar biogas-hydrogen flame," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 15, pp. 6567–6580, Apr 2016. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.01.170.
- [18] S. Aravind, R. K. Gohiya, R. S. Prakash, and R. Sadanandan, "Effects of CO₂ dilution on partially premixed CH₄-air flames in swirl and bluff body stabilized combustor," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 38, no. 4, pp. 5209–5217, 2021. doi: 10.1016/j.proci.2020.06.153.
- [19] Y. Nada, K. Matsumoto, and S. Noda, "Liftoff heights of turbulent non-premixed flames in co-flows diluted by CO₂/N₂," *Combust. Flame*, vol. 161, no. 11, pp. 2890–2903, Nov 2014. doi: 10.1016/j.combustflame.2014.05.007.
- [20] L. Wang, Z. Liu, S. Chen, C. Zheng, and J. Li, "Physical and Chemical Effects of CO₂ and H₂O Additives on Counterflow Diffusion Flame Burning Methane," *Energy & Fuels*, vol. 27, no. 12, pp. 7602–7611, Dec 2013. doi: 10.1021/ef401559r.
- [21] X. Tian, J. Yang, Y. Gong, Q. Guo, X. Wang, and G. Yu, "Experimental Study on OH*, CH*, and CO₂* Chemiluminescence Diagnosis of CH₄/O₂ Diffusion Flame with CO₂-Diluted Fuel," *ACS Omega*, vol. 7, no. 45, pp. 41137–41146, Nov 2022. doi: 10.1021/acsomega.2c04689.
- [22] M. Bastani, S. Tabejamaat, and H. Ashini, "Numerical and experimental study of combustion and emission characteristics of ammonia/methane fuel mixture in micro gas turbine combustor," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 49, pp. 1399–1415, Jan 2024. doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.09.319.
- [23] M. V. Heitor and J. H. Whitelaw, "Velocity, temperature, and species characteristics of the flow in a gas-turbine combustor," *Combust. Flame*, vol. 64, no. 1, pp. 1–32, Apr 1986. doi: 10.1016/0010-2180(86)90095-7.
- [24] A. H. Lefebvre and D. R. Ballal, *Gas turbine combustion: alternative fuels and emissions*. CRC press, 2010.
- [25] M. Bastani, S. Tabejamaat, and H. Ashini, "Experimental study of Ammonia-Methane mixture combustion in the micro gas turbine combustor," *Fuel Combust.*, vol. 15, no. 3, pp. 120–138, 2023.
- [26] M. Nozari, S. Tabejamaat, H. Sadeghizade, and M. Aghayari, "Experimental investigation of the effect of gaseous fuel injector geometry on the pollutant formation and thermal characteristics of a micro gas turbine combustor," *Energy*, vol. 235, 2021. doi: 10.1016/j.energy.2021.121372.
- [27] Y. Liu, Q. Xue, H. Zuo, X. She, and J. Wang, "Effects of CO₂ and N₂ dilution on the characteristics and NO_x emission of H₂/CH₄/CO/air partially premixed flame," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 35, pp. 15909–15921, Apr 2022. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.060.
- [28] Z. CAO and T. ZHU, "Effects of CO₂ Dilution on Methane Ignition in Moderate or Intense Low-oxygen Dilution (MILD) Combustion: A Numerical Study," *Chinese J. Chem. Eng.*, vol. 20, no. 4, pp. 701–709, Aug 2012. doi: 10.1016/S1004-9541(11)60238-3.
- [29] A. Degenève *et al.*, "Scaling relations for the length of coaxial oxy-flames with and without swirl," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 37, no. 4, pp. 4563–4570, 2019. doi: 10.1016/j.proci.2018.06.032.
- [30] Y. Liu, Q. Xue, H. Zuo, F. Yang, X. Peng, and J. Wang, "Effects of CO₂ and N₂ Dilution on the Combustion Characteristics of H₂/CO Mixture in a Turbulent, Partially Premixed Burner," *ACS Omega*, vol. 6, no. 24, pp. 15651–15662, Jun 2021. doi: 10.1021/acsomega.1c00534.
- [31] S. M. Palash, M. A. Kalam, H. H. Masjuki, B. M. Masum, I. M. Rizwanul Fattah, and M. Mofijur, "Impacts of biodiesel combustion on NO_x emissions and their reduction approaches," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 23, pp. 473–490, Jul 2013. doi: 10.1016/j.rser.2013.03.003.
- [32] C. P. Fenimore, "Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames," *Symp. Combust.*, vol. 13, no. 1, pp. 373–380, Jan. 1971, doi: 10.1016/S0082-0784(71)80040-1.
- [33] C. Schluckner, C. Gaber, M. Landfahner, M. Demuth, and C. Hochenauer, "Fast and accurate CFD-model for NO_x emission prediction during oxy-fuel combustion of natural gas using detailed chemical kinetics," *Fuel*, vol. 264, p. 116841, Mar 2020. doi: 10.1016/j.fuel.2019.116841.
- [34] C. E. Baukal Jr, *Oxygen-enhanced combustion*. CRC press, 2013.
- [35] T. F. Guiberti, D. Durox, and T. Schuller, "Flame chemiluminescence from CO₂- and N₂-diluted laminar CH₄/air premixed flames," *Combust. Flame*, vol. 181, pp. 110–122, Jul 2017. doi: 10.1016/j.combustflame.2017.01.032.
- [36] S. Sadatakhavi, S. Tabejamaat, M. EiddiAttarZade, B. Kankashvar, and M. Nozari, "Numerical and experimental study of the effects of fuel injection and equivalence ratio in a can micro-combustor at atmospheric condition," *Energy*, vol. 225, p. 120166, Jun 2021. doi: 10.1016/j.energy.2021.120166.

English Abstract

Experimental Study of Biogas Combustion in a Microturbine Combustion Chamber at Various CO₂/NG Ratios

Milad Bastani¹, Sadegh Tabejamaat^{2*}, Mahmoud Mani³, Hossein Ashini⁴

1- Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran, Milad.bastani@aut.ac.ir

2- Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran, Sadegh@aut.ac.ir

3- Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran, Mani@aut.ac.ir

4- Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran, H_ashini@aut.ac.ir

*Corresponding author

(Received: 2024/02/05, Received in revised form: 2024/03/18, Accepted: 2024/04/20)

In this research, complementing previous studies that have focused on flame structure and pollutant levels, the combustion of biogas, composed of methane and carbon dioxide, in a micro gas turbine combustor is experimentally investigated. The influence of the presence of carbon dioxide and variations in its ratio in the fuel mixture on the performance parameters of the combustor and its produced pollutants is examined. The study is conducted at two different thermal powers and constant equivalence ratio for two biogases and compared with natural gas combustion. The results indicate that the carbon dioxide ratio in the fuel significantly affects the turbulent combustion flame structure and performance parameters. Increasing the carbon dioxide ratio in the fuel reduces the combustion rate, causing combustion delay and flame temperature reduction. According to the obtained results, although the addition of carbon dioxide leads to a decrease in the amount of NO_x emissions, however, the produced CO in the combustor increases, resulting in an outlet temperature drop and consequently a decrease in the combustor efficiency. Based on these results, it is evident that the utilization of such fuels in combustion systems with swirl burners is feasible. However, measures need to be implemented to mitigate carbon monoxide emissions.

Keywords: Biogas, Microturbine combustion chamber, Carbon dioxide/natural gas ratio, pollution, Combustion performance