



حذف مونوکسید کربن به روش پلاسمای سرد

مریم برهانی جبلی^۱، فریده گلباشی^۲، عطا ملک قربان زاده^۳، رسول یاراحمدی^۴

تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۲/۱۶

تاریخ ویرایش: ۹۴/۰۹/۱۰

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۵/۲۹

چکیده

زمینه و هدف: امروزه پلاسمای سرد به عنوان یک فناوری نوظهور موفق و امیدبخش در زمینه کنترل آلودگی هوا با راندمان انژری بالا مورد توجه قرار گرفته است. آلودگی های اتمسفری در شکل های مختلف بر سلامت انسان و محیط زیست در سطح منطقه ای و جهانی اثرگذار است. مونوکسید کربن نیز به عنوان یکی از آلاینده های شاخص مؤثر بر سلامت انسان و محیط زیست معرفی شده است. نگرانی های فزاینده چگونگی اثرات آلودگی هوا بر سلامت انسان از سویی و ملاحظات و سخت گیری بیشتر استانداردهای کیفیت هوا از سوی دیگر سبب شده تا در سال های اخیر، تکنیک های کنترل آلودگی هوا به ویژه تکنیک های پلاسمای سرد به منظور کنترل انواع آلاینده های گازی مورد توجه و مطالعه بیشتری قرار گیرد. به همین منظور فرایند حذف این آلاینده چهت شناخت پارامتر های مؤثر در دو سیستم هوای خشک و گاز آرگون مدد این مطالعه قرار گرفته است.

روش بررسی: از این رو در این آزمایش های بررسی اثرات ناشی از متغیرهای دما، غلظت گاز مونوکسید کربن (CO)، ولتاژ و زمان ماند آلاینده CO به صورت همزمان در دو سیستم، راکتور پلاسمای منفی (گاز رفیق کننده هوای خشک) و سیستم راکتور پلاسمای مثبت (گاز رفیق کننده آرگون) با استفاده از روش ASTM D ۵۸۳۵D مورد سنجش و مطالعه قرار گرفته است.

یافته ها: نتایج حاصل نشان می دهد متغیر دما و زمان ماند بر حذف آلاینده مونوکسید کربن به ترتیب در سیستم هوای خشک و گاز آرگون، در محدوده آزمایشی چندان اثر قابل توجهی ندارد. در صورتی که مهم ترین عامل اثرگذار بر میزان حذف گاز مونوکسید کربن در دو سیستم هوای خشک و گاز آرگون متغیر ولتاژ مصرفی راکتور پلاسما در محدوده ۸ کیلوولت با $0.05 < p < 0.07$ در هر دو سیستم و میانگین اثر ۳۷ در سیستم هوای خشک و میانگین اثر ۱۲/۲ در سیستم گاز آرگون می باشد.

نتیجه گیری: نتایج حاصل از حذف گاز مونوکسید کربن در دو سیستم نشان می دهد سیستم هوای خشک به علت حضور یون های فعال اکسیژن بسیار مؤثرتر از سیستم گاز آرگون عمل می کند.

کلیدواژه ها: حذف مونوکسید کربن، پلاسمای سرد، پلاسمای مثبت، پلاسمای منفی.

مقدمه

از محیط زیست آمریکا (Environmental Protection Agency) (EPA)، مونوکسید کربن به همراه ازن، دی اکسید گوگرد، اکسیدهای نیتروژن، ذرات معلق با قطر ۱۰ میکرومتر، و سرب؛ به عنوان آلاینده ای "شاخص" مؤثر بر سلامت انسان و محیط زیست معرفی شده اند. نگرانی فزاینده چگونگی اثرات آلودگی هوا بر سلامت انسان از سویی و ملاحظات و سخت گیری بیشتر استانداردهای کیفیت هوا از سوی دیگر سبب شده تا در سال های اخیر، تکنیک های کنترل آلودگی هوا به ویژه تکنیک های پلاسمای سرد به منظور کنترل انواع آلاینده های گازهای مورد توجه و مطالعه بیشتری قرار گیرد (۱۰-۱).

سرعت مرگ و میر ناشی از آلودگی محیطی بیش از سرعت صنعتی شدن است. به گونه ای که امروزه آلودگی هوا محیط های بسته و باز ششمین علت مرگ و میر در جهان شناخته شده است. امروزه مسئله آلودگی هوا و به ویژه سهم انتشارات و سایت نقليه در این آلودگی توجه بالايی را به خود اختصاص داده است. از سوی دیگر رشد توقف ناپذير ناوگان حمل و نقل جهانی آلودگی ناشی از اين وسایط را افزایش داده و بیشتر مورد توجه قرار می دهد. در آخرین اصلاحیه National Ambient Air Quality (NAAQS) منتشر شده توسط انجمن حفاظت (Standards) (NAAQS) این مقصود است.

- ۱- کارشناس ارشد بهداشت حرفه ای، دانشگاه علوم پزشکی ایران.
- ۲- استاد گروه بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران.
- ۳- دانشیار گروه فیزیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران.
- ۴- (نویسنده مسئول) دانشیار گروه بهداشت حرفه ای، عضو مرکز تحقیقات بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران.

پلاسما-شیمیایی به صورت جداگانه مورد مطالعه قرار گرفته اند. در حالی دی اکسید کربن، مونوکسید کربن هیدروژن و آب همگی به شکل ترکیبی از جریان خروجی منابع مولد آلودگی های اکسید کربنی در کنار یکدیگر وجود دارند(۲۰-۲۳). بررسی منابع منتشر شده نشان می دهد تعداد محدودی از مطالعات در زمینه چگونگی کاهش و تبدیل آلاینده مونوکسید کربن در حضور پلاسمای سرد انجام شده است، وجود نتایج مختلف گزارش شده از سوی محققان مبنی بر حذف آلاینده مونوکسید کربن در محیط پلاسما و عدم وجود آلاینده مونوکسید کربن در حذف آلاینده راندمان حذف قابل توجه و مناسب در حذف آلاینده مونوکسید کربن سبب شد به منظور شناخت مبانی و کلیات فنی و اجرایی، واکنش های تبدیل و حذف آلاینده مونوکسید کربن در شرایط پلاسما مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد تا زیربنای محاکم، اصولی و قابل اعتماد برای ادامه مسیر های بعدی باشد. از این رو هدف این تحقیق حذف آلاینده CO با استفاده از روش پلاسمای سرد به طور تجربی و آزمایشگاهی انتخاب شده است.

روش کار

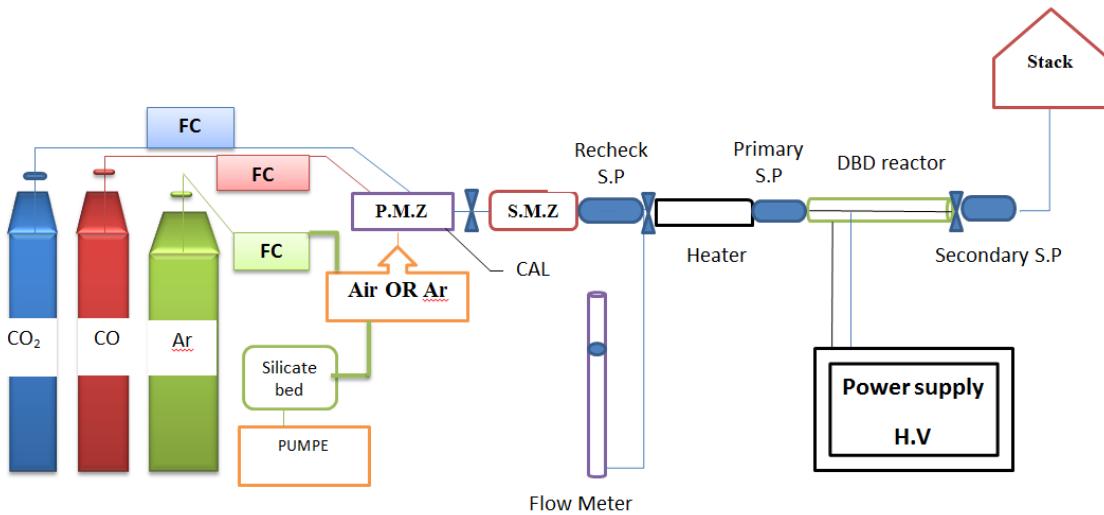
استوانه ای به طول ۱۶۲ میلیمتر طول، ۱۳۲ میلیمتر قطر و ۱/۱ میلیمتر ضخامت از جنس پیرکس به منظور طراحی و ساخت راکتور مورد استفاده قرار گرفت. الکترود داخلی در نقش کانت از جنس سیم تنگستن با قطر خارجی ۱/۳۸ میلیمتر و ۱۸۰ میلیمتر طول با درجه خلوص ۹۸/۵٪ بکاربرده شد. لایه ای از فویل مسی نیز در نقش آند سیلندر راکتور را احاطه نموده است(۲۴).

سیستم تغذیه این آزمایش با استفاده از کپسول های مونوکسید کربن و دی اکسید کربن با درصد خلوص ۹۹/۹۹٪ صورت گرفته است. تنظیم جریان خروجی از کپسول با ثابت نگه داشتن دما و با استفاده از فلومتر انجام شد. استفاده از بستر های سیلیکاژلی مناسب به منظور کنترل رطوبت جریان ورودی در مسیر مورد استفاده قرار گرفت. به منظور اختلاط کامل جریان ورودی مناسب با نسبت های مورد نظر در هر مرحله،

مونوکسید کربن یک گاز بدون بو، بدون رنگ و بدون طعم و سمی است. این گاز مهم ترین آلاینده ناشی از احتراق سوخت های فسیلی و بایومس بوده و در فرایند اکسیداسیون فتوشیمیایی هیدروکربن ها به عنوان آلاینده ثانویه تولید می شود. میزان تمایل هموگلوبین در بدن انسان به واکنش با مونوکسید کربن ۲۵۰ بار بیشتر از میزان تمایل آن به واکنش با اکسیژن گزارش شده است. این مطالعات ارتباط مستقیمی را میان مواجهه با مونوکسید کربن و بیماری های قلبی و تنفسی در افراد نشان می دهند. غلظت زمینه ای مونوکسید کربن در اتمسفر در گزارش دو سازمان، سازمان جهانی بهداشت و انجمن حفاظت از محیط زیست آمریکا بین محدوده ۰/۰۵-۰/۱۲ ppm برآورد شده است. این در حالی است که انتشارات جهانی این گاز بر اساس ارزیابی های این دو سازمان در حدود $10^9 \times 2/4$ تن در سال گزارش شده است(۲، ۵-۱۱، ۹-۱۴).

گازی که به طور نسبی یا کامل یونیزه شده و حاوی الکترون ها، یون ها و اتم ها و مولکول های آزاد می باشد پلاسما نامیده می شود. در محیط پلاسمای غیرحرارتی، درجه حرارت الکترون ها معمولاً بالا و در حدود چند ده هزار درجه کلوین است، در حالی که درجه حرارت اتم ها و مولکول های خنثی می تواند نزدیک به دمای اتاق باشد. به همین دلیل، واکنش های شیمیایی با ایجاد رادیکال های فعال و توسط این الکترون های پرانرژی شروع می شود. این روش به دلیل سادگی در فرایند تصفیه، پایین بودن هزینه های طراحی، ساخت و نگهداری، عدم نیاز به متعلقات پیچیده مکانیکی و شیمیایی در راکتور پلاسما و از طرفی نو بودن فن آوری به یکی از تکنیک های امیدبخش کنترل آلودگی هوا با راندمان بالا تبدیل شده است(۱۵-۱۹).

بررسی مطالعات انجام شده باهدف حذف مونوکسید کربن با استفاده از روش پلاسما و پلاسمای تلفیقی نشان می دهد، اکسیداسیون مونوکسید کربن و دی اکسید کربن به صورت جداگانه و در جریان های غنی از هیدروژن، متان و یا اکسیژن در راکتور های



شکل ۱ - شماتیک چیدمان آزمایش

سنسورهای حرارتی تعییه شده در دهانه ورودی راکتور پلاسمای کنترل می‌گردد. دمای ورودی راکتور پلاسمای توسط سنسورهایی با دقت 0.1°C اندازه‌گیری و کنترل می‌گردد. محدوده دمایی در این آزمایش‌های $250 - 100$ درجه سانتیگراد انتخاب شد و تمامی آزمایش‌های در این محدوده دمایی انجام گردید(۲۶).

از آنجایی که جریان هوای حاوی آلاینده‌ها با مشخصات فیزیکی و شیمیایی مشخص وارد محیط پلاسمای شود، عمل یونیزاسیون و تحریک مولکول‌ها، اتم‌ها و ذرات تحت تاثیرمیدان و انرژی الکتریکی انجام می‌گردد. منبع تغذیه راکتور پلاسمای یک مولد 13 kV ولتی با حداکثر شدت 20 miliampere حد تشخیص 0.1 miliampere است. میزان ولتاژ مورد استفاده در این آزمایش در محدوده $13 - 1\text{ KV}$ متغیر بود.

در این مطالعه به منظور شناخت نقش عامل مؤثر بر راندمان تبدیل آلاینده گازی مونوکسید کربن برهم کنش چهار عامل اصلی دما، ولتاژ، زمان ماند و غلظت ورودی جریان حاوی آلاینده به راکتور به طور همزمان مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. هدف از این روش به دست آوردن اطلاعات و نتایج منطقی و دقیق به منظور شناخت عوامل مؤثر بر راندمان حذف این آلاینده با جریان حاوی ترکیباتی واقعی در دو سیستم

از دو محفظه اختلاط قبل از ورود جریان به راکتور استفاده شده است. شماتیک ساده‌ای از چیدمان آزمایش در شکل ۱ قرار داده شده است.

جریان ورودی به سیستم با دو نوع گاز رقیق‌کننده هوای خشک و گاز آرگون مورد آزمایش قرار گرفت تا در نهایت نتایج حاصل مورد سنجش و مقایسه قرار گیرد. رطوبت نسبی جریان در محدوده 7% توسط بسترهای سیلیکاژل کنترل گردید. نسبت گاز ppm $\text{CO}/\text{CO}_2 = 1/1000$ در محدوده غلظت $150 - 20$ غلظت سازی شد. میزان حجم هوای ورودی پس از کنترل غلظت توسط روتاتورهای کالیبره شده شرکت AIRFLOW تنظیم و سپس به واحد حرارتی هدایت می‌شد(۲۵، ۲۳).

پس از عمل اختلاط در دو قسمت اختلاط اولیه ۱ و اختلاط ثانویه ۲ جریان حاوی آلاینده CO با حفظ میزان نسبت ورودی گاز CO/CO_2 به داخل کوره حرارتی جهت تعادل حرارتی با زمان ماند مشخص تا 250°C گرم و سپس روی راکتور تزریق می‌گردد. نرخ حرارتی کوره توسط سیستم ترموموکوپل ۳

1. Primary Mixing Zone (P.M.Z).
2. Primary Mixing Zone (P.M.Z).
3. Thermocouple (TC-1)

جدول ۱ . نتایج آماری آنالیز چهار پایه

سیستم گاز آرگون				سیستم هوای خشک				متغیر	پایه
P value	انحراف معیار	میانگین اثر	p-value	انحراف معیار	میانگین اثر	Df			
۰/۰۲۴	۲۵/۱	۲/۶۹		۲۹/۲	۳۲/۳	۳	۱۰۰	دما (°C)	
	۲۱/۳	۲/۲۶	۰/۱۶۶	۲۶/۴	۳۲/۹		۱۳۰		
	۱۵/۹	۶/۱۷		۲۴/۸	۳۱/۱		۱۶۰		
	۱۳/۶	۱۰/۷۳		۲۵/۶	۲۴/۷		۲۰۰		
۰/۰۰۰۱	۹/۷	-۷/۲۹		۱۶/۲	۲۸/۹	۳	۳	ولتاژ (KV)	
	۲۲/۷	۱۰/۴	۰/۰۰۰۱	۲۶/۲	۳۷/۹		۵		
	۱۷/۹	۱۳/۲		۳۰/۲	۳۰/۲		۸		
	۱۹/۷	۵/۴۸		۲۹/۹	۲۳/۸		۱۰		
۰/۰۰۱	۱۷/۵	۹/۶۵	۰/۰۰۰۱	۲۵/۶	۱۹/۴	۳	۲۰	غلظت CO (ppm)	
	۱۵/۶	۹/۵		۲۵/۸	۳۴/۴		۶۰		
	۱۷/۵	۳/۷		۲۳/۱	۲۹		۱۰۰		
	۲۵/۲	-۱		۲۸/۴	۲۸/۲		۱۴۰		
۰/۰۳	۲۴/۵	۴/۱۷		۲۷/۵	۳۵/۶	۳	۰/۲	زمان ماند (S)	
	۱۷/۹	۷/۴	۰/۰۰۰۱	۲۳/۳	۴۰		۰/۲۵		
	۱۶/۶	۶/۴		۲۳/۸	۲۷/۵		۰/۳		
	۱۹/۱	۳/۸		۲۶/۶	۱۷/۸		۰/۵		

طرح آزمایش چهار پایه به صورت یکسان انجام شد. لازم به ذکر است که در مرحله تعیین محدوده فاکتورهای تحقیق در دو پایه، چهار فاکتور با تکرار سه بار، قبل و بعد از راکتور پلاسما و در مجموع دو سیستم همایش گاز آرگون و گاز آرگون برابر ۱۹۲ تست اولیه انجام شده است. در این مرحله ضمن تأیید تأثیر هر چهار فاکتور بر تبدیل تصفیه CO، سطوح متغیرها نیز ضمن بازنگری مجدد تثبیت و جهت آزمایشهای نهایی در چهار پایه آماده شد (جدول ۱).

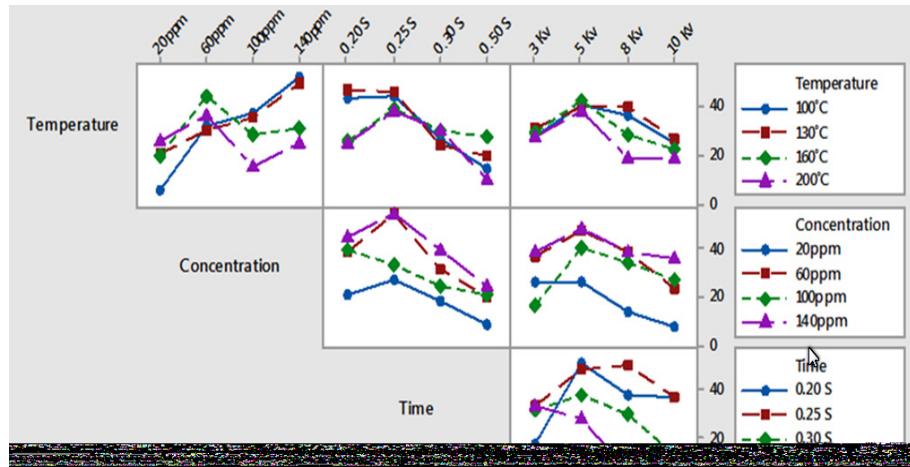
پس از انجام نمونه برداری ها راندمان حذف گاز مونوکسید کربن، اکسیدهای کربنی و انتخاب پذیری گاز اکسیژن و هیدروکربن ها به ترتیب با استفاده از معادله زیر محاسبه گردید(۳۱-۲۸) .

$$\eta_{CO} = \frac{CO_{in} - CO_{out}}{CO_{in}} \times 100 \quad (\text{معادله ۱})$$

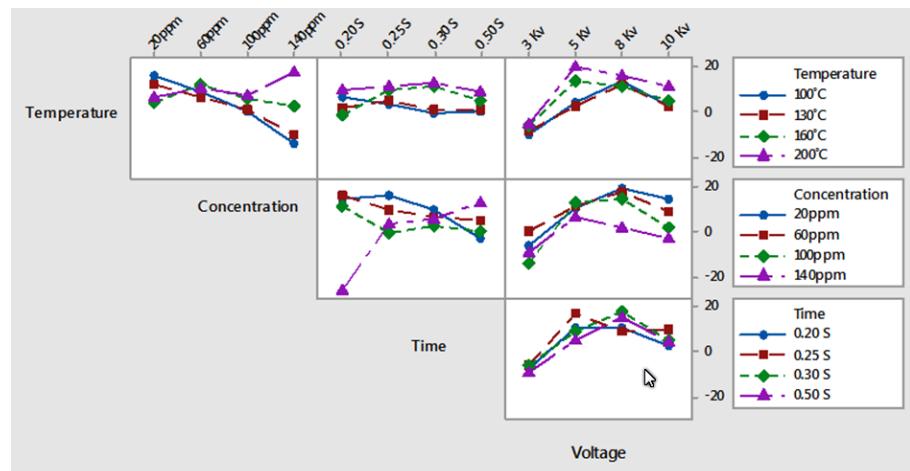
جایی که CO_{in} و CO_{out} به ترتیب میزان غلظت گاز مونوکسید کربن در ورودی و خروجی راکتور می باشد. در نهایت نتایج بدست آمده با استفاده از نرم افزارهای Minitab و با استفاده از آزمون های

گاز آرگون و هوای خشک با کمک یک طرح آزمایش کامل می باشد. لذا به منظور دستیابی به سطوح و محدوده مؤثر هر عامل طرح آزمایش در دو پایه انجام و سپس آنالیزهای General linear (GLM) انجام شد. بررسی نتایج این مطالعه با اندازه گیری میزان غلظت هر یک از گازهای مونوکسید کربن، دی اکسید کربن، اکسیژن و هیدروکربن ها در نقاط قبل و بعد از راکتور باهدف ارزیابی میزان حذف آلاینده مونوکسید کربن توسط دستگاه آنالیزکننده گاز ASTM D 5835 انجام شد(۲۷).

محدوده فاکتورهای مؤثر بر فرایند تبدیل گاز CO، به ویژه در تعیین سطح متغیرهای دما، ولتاژ، زمان ماند و غلظت ورودی گاز CO در برهمکنش مؤثر و اکشن های تبدیل و تصفیه آلودگی مهم هستند و لذا به منظور تعیین محدوده مؤثر آزمایش های ابتدا باهدف تعیین رنج (Range finding) در دو سطح انجام و پس از آن آنالیزهای لازم در محدوده اختصاصی هر متغیر انتخاب و هدف تحقیق در دو سیستم بر اساس



شکل ۲. اثرات متقابل متغیرهای مورد مطالعه در سیستم هوای خشک



شکل ۳. اثرات متقابل متغیرها در سیستم گاز آرگون

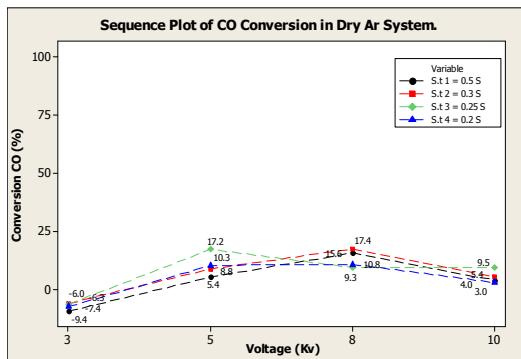
همچنین تأثیر متغیر زمان ماند بر راندمان تبدیل مونوکسید کربن در دو سیستم هوای خشک و گاز آرگون در شکل های ۶ و ۷ نشان داده شده است. تأثیر متغیر دما بر راندمان حذف گاز مونوکسید کربن در دو سیستم هوای خشک و گاز آرگون در شکل های ۸ الی ۱۱ نشان داده شده است.

مدلهای آزمون فاکتوریل و آنالیز واریانس مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند. در ادامه به تفسیر و بحث نتایج بدست آمده پرداخته شده است.

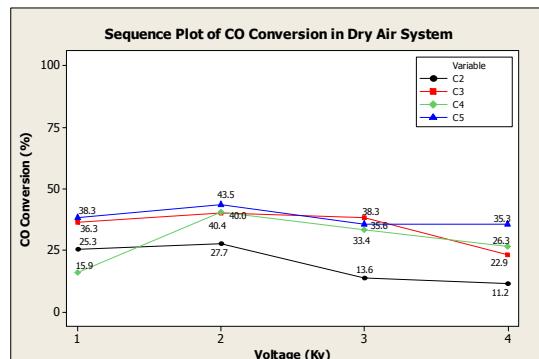
یافته‌ها

اثرات متقابل متغیرها بر راندمان حذف مونوکسید کربن در دو سیستم توسط آنالیزهای آماری GLM تعیین گردید؛ که در شکل ۲ و ۳ ارائه شده است. تأثیر متغیر غلظت مونوکسید کربن بر تبدیل مونوکسید کربن در دو سیستم گاز آرگون و هوای خشک در شکل های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

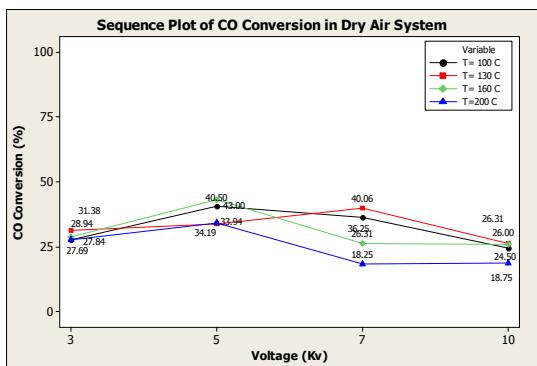
بحث و نتیجه‌گیری



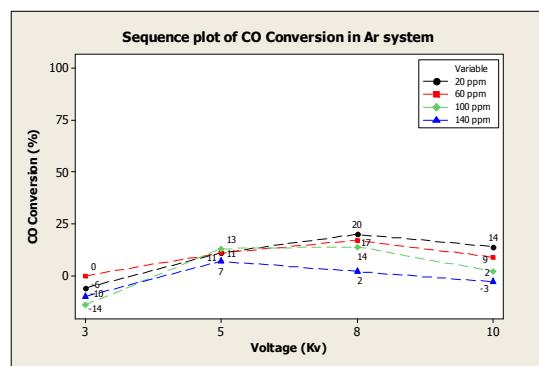
شکل ۷. تاثیر برهمکنش زمان ماند بر ولتاژ تخلیه در راکتور پلاسمای سرد بر راندمان حذف CO در سیستم گاز آرگون



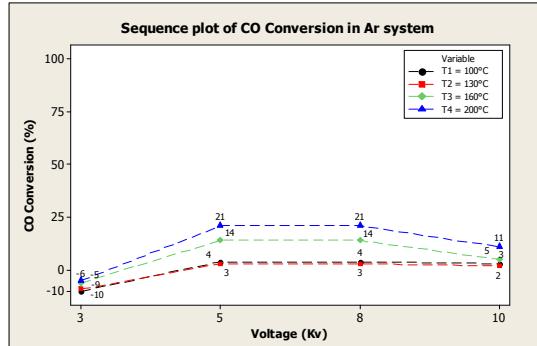
شکل ۴. تاثیر افزایش غلظت ورودی گاز CO بر حسب تابعی از ولتاژ بر راندمان حذف CO در سیستم هوای خشک



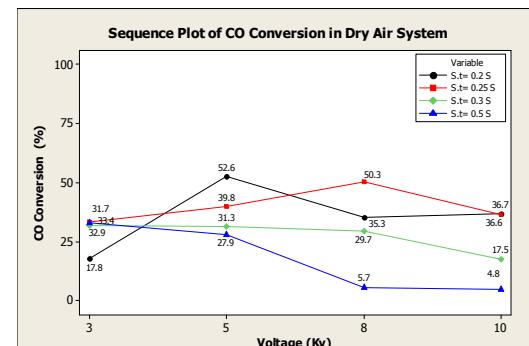
شکل ۸. تاثیر برهمکنش دما، ولتاژ مصرفی در راکتور پلاسما در سیستم هوای خشک بر راندمان تصفیه و تبدیل گاز CO



شکل ۵. تاثیر افزایش غلظت ورودی گاز CO بر حسب تابعی از ولتاژ بر راندمان حذف CO در سیستم گاز آرگون



شکل ۹. تاثیر برهمکنش دما و ولتاژ مصرفی در راکتور پلاسما در سیستم گاز آرگون بر راندمان تصفیه و تبدیل گاز CO



شکل ۶. تاثیر برهمکنش زمان ماند بر ولتاژ تخلیه در راکتور پلاسمای سرد بر راندمان حذف CO در سیستم هوای خشک

۱ مشخص شد مهم‌ترین عامل اثرگذار بر میزان حذف گاز مونوکسید کربن در دو سیستم هوای خشک و گاز آرگون متغیر ولتاژ مصرفی راکتور پلاسما در محدوده ۸ کیلوولت و <0.05 p در هر دو سیستم و میانگین اثر

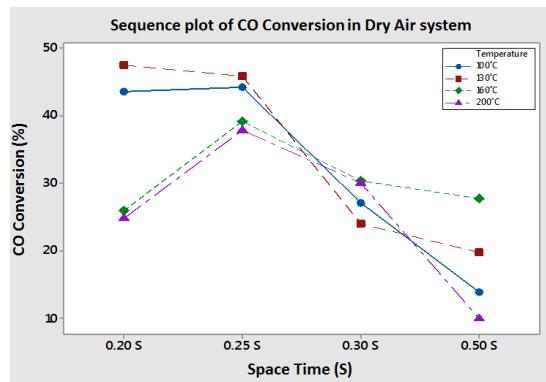
آنالیز نتایج آزمایش‌های حذف مونوکسید کربن در دو سیستم هوای خشک و گاز آرگون در چهارپایه، با کمک نرم‌افزار Minitab و با آزمون‌های GLM تعیین شد (جدول ۱). با توجه به داده‌های ارائه شده در جدول



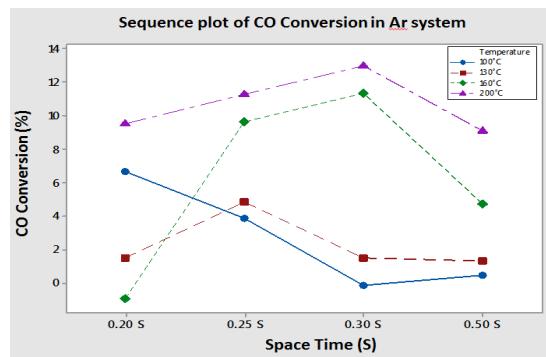
بیشتر مثبت گزارش داده‌اند. ازین‌رو می‌توان عدم افزایش راندمان حذف مونوکسید کربن در حضور گاز آرگون را ناشی از عدم حضور گازهای اکسیدکننده‌ای همچون اکسیژن دانست (۲۰، ۲۳، ۳۲). بر عکس، در سیستم هوای خشک، به دلیل تولید اتم‌ها و مولکول‌های اکسیژن تحریک شده، بخصوص حضور اکسیژن یکتا (singlet)، نرخ واکنش‌های شیمیایی بسیار سریع تر خواهد بود. چنین اثری در حضور اتم‌های آرگون امکان‌پذیر نیست (۳۰). آزمایش‌های انجام شده انتخاب پذیری هیدروکربن‌های تولیدشده را بسیار ناچیز نشان می‌دهد، به علت عدم حضور مولکول‌ها و ذرات آب در فرایند پلاسما ذرات مونوکسید کربن وادر به واکنش با ذرات برانگیخته اکسیژن می‌گردد که این امر خود عاملی در تولید بیشتر گاز دی‌اکسید کربن می‌باشد. بررسی مطالعات انجام شده و نتایج حاصل از مطالعه Zheng و همکارانش تأیید کننده نتایج حاصل از مطالعه حاضر می‌باشد (۲۳).

اثر متغیر زمان ماند بر راندمان حذف گاز مونوکسید کربن در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد اثر کاهش زمان ماند در سیال رقیق‌کننده گاز آرگون قابل چشم پوشی است راندمان ۲۵٪ حذف گاز مونوکسید کربن متأثر از کاهش زمان ماند سیال به ۵۴٪ در سیستم هوای خشک می‌رسد. سبب افزایش قابل توجه ای در راندمان حذف مونوکسید کربن می‌گردد (شکل ۶ و ۷).

میانگین اثرات سطوح مختلف زمان ماند آلاینده در حذف گاز CO در سیستم هوای خشک نشان می‌دهد کاهش مدت زمان حضور گاز CO در راکتور بر میزان حذف آن مؤثر می‌باشد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد همواره در بررسی حذف مونوکسید کربن در سیستم پلاسما یا پلاسما-کاتالیستی میزان هواگذر جریان سیستم (عامل مؤثر بر زمان ماند آلاینده درون راکتور) همواره ثابت فرض شده است. مطالعه Manasilp و همکارانش در سال ۲۰۰۲ به عنوان تنها مطالعه‌ای که به بررسی اثر هواگذر جریان بر راندمان حذف گاز CO با استفاده از روش پلاسما و کاتالیست



شکل ۱۰. تأثیر برهمکنش دما، و زمان ماند در راکتور پلاسما در سیستم هوای خشک بر راندمان تصفیه و تبدیل گاز CO



شکل ۱۱. تأثیر برهمکنش دما، و زمان ماند در راکتور پلاسما در سیستم گاز آرگون بر راندمان تصفیه و تبدیل گاز CO

آماری ۳۷ در سیستم هوای خشک و با میانگین اثر آماری ۱۳/۲ در سیستم گاز آرگون می‌باشد. اثر غلظت ورودی واکنش دهنده‌ها بر عملکرد راکتور DBD، در دو سیستم با جریان گاز رقیق‌کننده هوای خشک و آرگون با غلظت ورودی گاز مونوکسید کربن (CO و دی‌اکسید کربن CO₂) در حذف گاز مونوکسید کربن نشان می‌دهد؛ در رقیق‌سازی با هوای خشک افزایش غلظت مونوکسید کربن اثر مثبتی را بر راندمان حذف گاز مونوکسید کربن و انتخاب پذیری گاز اکسیژن دارد (شکل ۴ و ۵). در تحقیقات مشابه توسط Manasilp وابستگی بالای راندمان حذف مونوکسید کربن به حضور گاز اکسیژن و همچنین Lundie و همکاران نیز اثر غلظت اکسیژن بیشتر را در تولید دی‌اکسید کربن

سرعت دادن به الکترون‌ها مصرف می‌شود و برای گرم کردن کل جریان گاز استفاده نمی‌گردد و درنتیجه دما در محدوده نزدیک به دمای اتاق باقی می‌ماند. بنابراین انتظار این است که یک محیط واکنشی فعال در دمای پایین ایجاد شود و مصرف انرژی به حداقل برسد(۳۳).

درواقع کارایی و مؤثر بودن این روش را در مصرف انرژی پایین و جلوگیری از تشکیل محصولات فرعی غیر دلخواه در طی تجزیه و تبدیل آلاینده‌ها می‌دانند(۳۴).

نتایج حاصل از حذف گاز مونوکسید کربن در راکتور پلاسمای مثبت و منفی نشان می‌دهد حذف مونوکسید کربن در راکتور منفی راندمان بالاتری را نسبت به راکتور پلاسمای مثبت به ارتفاع می‌آورد که این تفاوت بسیار قابل توجه است. بررسی مطالعات و نتایج حاصل نشان می‌دهد که حضور ذرات یونی و تحریک شده اکسیژن تولید شده در محیط پلاسما نقش بسیار قابل توجهی را در اکسیداسیون گاز مونوکسید کربن داشته و عدم حضور این ذرات در سیستم پلاسمای آرگون منجر به راندمان پایین‌تر حذف گاز مونوکسید کربن می‌گردد.

از طرفی، در پلاسمای منفی که سیم (آن) راکتور به موج ولتاژ عمدتاً منفی متصل می‌شود، اثر بارفضایی که در اثر تحرک پذیری بالای الکترون‌ها به وجود می‌آید کمتر است و درنتیجه میدان الکتریکی در درون پلاسما تضعیف نمی‌شود؛ اما اثر بارفضایی و تضعیف میدان در پلاسمای با موج مثبت شدیدتر و درنتیجه پلاسما ضعیفتر بوده که متناظر با آن نرخ واکنش‌های شیمیایی نیز کاهش می‌یابند.

منابع

1. Leray A., Khacef A., Makarov M., Cormier J.M. Diesel Oxidation Catalyst Combined to Non-Thermal Plasma: Effect on Activation Catalyst Temperature and by-products formation. 2011.
2. EPA. National Ambient Air Quality Standards (NAAQS). National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) | Air and Radiation |

Pt/alumina زمان ماند آلاینده، کاهش راندمان را در پی دارد؛ که این امر می‌تواند ناشی از تفاوت بالای که در محدوده انتخابی متغیر و حضور مؤثر کاتالیست در حذف گاز CO ناشی می‌شود، باشد. تأثیر زمان ماند آلاینده مونوکسید کربن در سیستم گاز آرگون نشان می‌دهد برخلاف سیستم هوای خشک و در مقایسه با سه فاکتور دیگر مورد مطالعه زمان ماند (تحت تأثیر حجم تخلیه) با $p-value < 0.05$ در حذف گاز CO نقش قابل توجهی را به عهده ندارد(۲۰). اما دستیابی به نقطه تعادل در واکنش‌های دوطرفه گاز مونوکسید کربن و دی‌اکسید کربن نیازمند انجام مطالعات بیشتر است تا بتوان چگونگی روند تغییرات هر متغیر را بر راندمان حذف گاز مونوکسید کربن شناخت.

تغییرات دمایی مورد مطالعه بر راندمان حذف گاز مونوکسید کربن در دو سیستم گاز آرگون و هوای خشک در شکل‌های ۱۱ - ۸ نشان می‌دهد، افزایش دما در دو سیستم آرگون و هوای خشک نتایج متفاوتی را ارائه می‌کند. استفاده از سیستم هوای خشک و افزایش دمای جریان درون سیستم، تغییرات و شبیه کاهشی کوچکی را در راندمان حذف گاز مونوکسید کربن نشان می‌دهد. درحالی که دیگر مطالعات انجام شده در حذف گاز مونوکسید کربن با استفاده از فرایندهای تلفیقی (کاتالیست - پلاسما)، باهدف تعیین نقش دما در آزمایش‌های خود نقش مؤثر و بسیار قابل توجهی را نشان داده‌اند که از جمله این مطالعات می‌توان به مطالعه Mok و همکارش Kang اشاره کرد؛ که می‌تواند ناشی از وابستگی و ارتباط مستقیم دما در انجام هرچه بهتر واکنش‌های کاتالیستی از گاز مونوکسید کربن باهدف متناسب این گاز باشد؛ اما در مطالعات و مستندات منتشرشده یکی از مزیت‌های روش‌های پلاسما عدم نیاز به دمای محیطی بالا برای برخوردهای غیر الاستیکی منتهی به واکنش‌های شیمیایی است. درواقع مهم‌ترین مزیت روش پلاسمای سرد این است که در آن انرژی برای



Akiyama H. Non-Thermal Plasma Technic for Air Pollution Control, Chapter 9. INTECH Open Access Publisher;2012.

17. Tendero C., Tixier Ch., Tristant P., Desmaison J., Leprince P. Atmospheric pressure plasmas: A review. *Spectrochimica Acta Part B* 2006;61(4):2 - 30.

18. Podlinski J, Kocik M, Dekowski J, Mizeraczyk J. Velocity field measurements by PIV in a non-thermal plasma wire-to-plate reactor. In Proc. XIVth Symp. Appl. Plasma Process (pp. 13-18).

19. Yarahmadi R, Mortazavi SB, Omidkhah MR, Asilyan H, Moridi P. Examination of the Optimized Conditions for the Conversion of NOX Pollution in DBD Plasma Reactor. *Iran J Chem Chem Eng.* 2010; 29(1):23-32.

20. Manaslp A., E. G. Selective CO oxidation over Pt/alumina catalysts for fuel cell applications. *Applied Catalysis B. Environmental.* 2002; 37(2):17–25.

21. Mok. Y. S. KH-C, Lee. H.-J., Koh. D. J., and ShinD. N. Effect of Nonthermal Plasma on the Methanation of Carbon Monoxide over Nickel Catalyst. *Plasma Chem Plasma Process.* 2010;30:437–47.

22. Mok YS, Kang HC, Koh DJ, Shin DN, Baik JH. Nonthermal plasma-enhanced catalytic methanation of CO over Ru/TiO₂/Al₂O₃. *J Korean Physical Soc.* 2010;57(3):451-7.

23. Zheng G., Jiang J., Wu. Y., Zhang R., Hou. H. The Mutual Conversion of CO₂ and CO in Dielectric Barrier Discharge (DBD). *Plasma Chemistry and Plasma Processing.* 2003;23(1):43-49.

24. Jwa E., Lee S.B., Lee H.W., Mok Y.S. Plasma-assisted catalytic methanation of CO and CO₂ over Ni–zeolite catalysts. *Fuel Processing Technology* 108 2013;108:89 - 93.

25. Sarayi A.T., Mansouri N. Determining of emission factors in automobile 405, the fifth Conference of Environmental Engineering, Tehran, Tehran University, Faculty of Environment, 1390.

26. Gonzales R. H., Engineer M. Diesel Exhaust Emission System Temperature Test. National Technology & Development Program. 2008.

27. Fornes TD, Hunter DL, Paul DR. Nylon-6 nanocomposites from alkylammonium-modified clay: the role of alkyl tails on exfoliation. *Macromolecules.* 2004 Mar 9;37(5):1793-8.

28. Chang. C. L. Elimination of Carbon

US EPA , <http://wwwepagov/air/criteriahtml>, Last updated on 13/7/2014.

3. Kašpar J., Fornasiero P., Hickey N. Automotive catalytic converters: current status and some perspectives. *Catalysis Today.* 2003;77:419-49.

4. Hickey N., Boscarato I., J. K. Air Pollution from Mobile Sources: Formation and Effects and Abatement Strategies. G Cao and R Orru' (eds), Current Environmental Issues and Challenges, Springer Science+Business Media Dordrecht 2014. 2014.

5. FederalRegister. Environmental protection Agency, Air quality Designation and Classifications, Final Rule. 1991; 56(215).

6. EPA. An Introduction to Indoor Air Quality (IAQ), Carbon Monoxide (CO). Carbon Monoxide (CO) | Indoor Air | US Environmental Protection Agency (EPA), <http://wwwepagov/iaq/co/html>, Accessed:14/11/2013.

7. WHO. Carbon monoxide. WHO Regional Office for Europe Copenhagen Denmark, Air Quality Guidelines - Second Ed. Chapter 55. 2000.

8. Goudarzia Gh., Mohammadib M. J., Angalic K. A., Neisia A. K., Babaie A. A., Mohammadid B., et al. Estimation of Health Effects Attributed to NO₂ Exposure Using AirQ Model. *Arch Hyg Sci.* 2012;1(2):59-66.

9. Jacobson M. Z. Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. *Energy Environ Sci.* 2009; 2:148-73.

10. Pstnote (partiamentary Office of Science and Technology), Air Quality in the UK, Number 188, November 2002.

11. EPA. Air Quality Criteria for Carbon Monoxide. 600/P-99/001F.2000. Acceccesd 20/07/ 2014.

12. EPA. Carbon Monoxide Emissions. EPA - ROE - A-Z Indicators List - Carbon Monoxide Emissions. Acceccesd 24/7/2014.

13. Burtis C. A., Ashwood E. R., Bruns D. E. Tietz Texbook of Clinical Chemistry and Molecular Diagnostics., Fifth Ed. chapter 35, Clinical Toxicology, Carbon Monoxide. NY. Saunders Elsevier. 2012.

14. Industrial Accident Prevention Association (IAPA), Carbon Monoxide in the workplace. WHO; Fact Sheet No. 3132008.

15. Yarahmadi R., Mortazavi. SB., et al. Review of effective Factors in the treatment of nitrogen oxides in a cold plasma reactor, *Environ Sci and Tech J.* 2008;11:26-39. (Persian)

16. Matsumoto T., Wang D., Namihira T.,

Monoxide in the Gas Streams by Dielectric Barrier Discharge Systems with Mn Catalyst. *Plasma Chem Plasma Process.* 2005; 25(4):123-9.

29. Hwang. B. B. YYK, Na. B. K. Conversion of CH₄ and CO₂ to Syngas and Higher Hydrocarbons Using Dielectric Barrier Discharge. *Korean J Chem Eng.* 2003;20(4):631 - 4.

30. Mahammadunnisa Sk., Manoj Kumar Reddy P., Linga Reddy E., Subrahmanyam. C. Catalytic DBD plasma reactor for CO oxidation by in situ N₂O decomposition. *Catal Today* 2013;211(2): 53-7.

31. Subrahmanyam Ch., Renken A., Kiwi-Minsker L. Novel Catalytic Dielectric Barrier Discharge Reactor for Gas-Phase Abatement of Isopropanol. *Plasma Chem Plasma Process.* 2007; 27:13 - 22.

32. Eliasson B, Hirth M, Kogelschatz U. Ozone synthesis from oxygen in dielectric barrier discharges. *Journal of Physics D: Applied Physics.* 1987 Nov 14;20(11):1421.

33. Magureanua M. PD, Mandachea N. B., Pârvulescu V. I., Pârvulescu V., and Cojocarub B. In situ study of ozone and hybrid plasma Ag-Al catalysts for the oxidation of toluene: Evidence of the nature of the active sites. *Appl Catal B: Environmental.* 2011;104:84-90.

34. Subrahmanyam Ch., Renken A., Kiwi-Minsker L. Novel catalytic non-thermal plasma reactor for the abatement of VOCs. *Chem Eng J.* 2007;134:78-83.

Elimination of carbon monoxide using non-thermal plasma technique

Maryam Borhani Jebeli¹, Farideh Golbabaei², Atamalek Ghorbanzadeh³, Rasoul Yarahmadi⁴

Received: 2015/08/20

Revised: 2015/12/01

Accepted: 2016/03/06

Abstract

Background and aims: Non-thermal plasma is considered as a successful new technology with high efficiency in the air pollution control. Various types of atmospheric pollutants adversely influence on the human health and the environment regionally and globally. Carbon monoxide has been introduced as a critical pollutant which can cause the environmental and health effects. The growing concerns about effects of air pollution on human health, and also more stringent strategies of choosing the air quality standards, have motivated the development of air pollution control techniques, particularly the non-thermal plasmas techniques. Therefore, the aim of this study is the removal of the carbon monoxide (CO) contaminants in the dry air and argon atmospheres in order to determine of the effective parameters.

Methods: The current study has determined the effects of temperature, the CO concentration, the voltage and the residence time on the CO elimination efficiency by ASTM D 5835 method in the system of negative plasma reactor (diluted by dry air) and the system of positive plasma reactor (diluted by argon gas), simultaneously.

Results: The results indicated that the temperature and the residence time did not have a significant effect on the CO removal in the both dry air and argon gas systems. However, the most important variable in the both systems was the voltage in the vicinity of 8 kilovolts with the $p < 0.05$ and the mean effect of 37 and 13.2 in the dry air and argon gas systems, respectively.

Conclusion: The results of CO elimination in the dry air and argon atmosphere indicate that the dry air system, due to present of the oxygen active ions, has better performance compared to the argon gas system.

Keywords: Elimination, Carbon monoxide, Non-thermal plasma, Positive plasma, Negative plasma

-
1. MSc of Occupational Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.
 2. Professor, Department of Occupational Health, Faculty of Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.
 3. Associate Professor in Physics, Department of Physics, University of Tehran, Tehran, Iran.
 4. (**Corresponding author**) Associate Professor, Department of Occupational Health, Member of Occupational Health Research Center, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran. yarahmadi.r@iums.ac.ir