



طراحی و ساخت نمونه آزمایشگاهی زباله‌سوز پلاسمایی برای امحاء زباله‌های جامد شهری

قهار خالقیان، نرگس بیگ محمدی^{*}، نادر مرشدیان، مجتبی نوحه‌خوان، بهزاد رضایی فرد
پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۵۱۱۱۳-۱۴۳۹۹، تهران- ایران

*Email: nbm17p@gmail.com

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۷/۲۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۴

چکیده

تکنولوژی زباله‌سوز پلاسمایی یکی از روش‌های قطعی امحاء کم‌خطر می‌باشد. در این مقاله طراحی و ساخت سامانه زباله‌سوز پلاسمایی با استفاده از فرایند گازی‌سازی توسط مشعل پلاسما دنبال شده است. به منظور امحاء زباله‌های جامد شهری پیاده‌سازی شعله قوس پلاسمایی DC انجام گردید. طراحی و ساخت الکترودهای مشعل و نحوه قرارگیری آن به گونه‌ای است که وقتی زباله بر روی شعله پلاسما از طریق دهانه بالایی وارد می‌شود، در معرض دائمی آن قرار می‌گیرد. به این ترتیب علاوه بر اختلاط بهتر واکنش‌دهنده‌ها با پلاسما، عملکرد پایدار و کنترل بهتر، فرسایش کم‌تر است. در این سیستم به دلیل دمای پردازش بسیار بالا، حذف پسماندهای سمی و آلوده امکان‌پذیر می‌باشد. به منظور مشخصه‌یابی، تحلیل و شناسایی گونه‌ها و رادیکال‌های پلاسمایی مشعل و همچنین تعیین دمای برانگیختگی الکترون از طیف‌سنج نشروری استفاده گردید. در طیف نشری، گونه‌های اتمی مانند O، N_۲، N، NO و رادیکال OH تشخیص داده شد. با استفاده از شرایط تعادل ترمودینامیکی و روش بولتزمن دما نیز برابر ۵/۳۸ الکترون ولت تخمین زده شد. ترکیبات گاز متصاعدشده خروجی توسط روش کروماتوگرافی گازی شامل گازهای O_۲، N_۲، CO_۲، CO و N_۲O گزارش گردید.

کلیدواژه‌ها: زباله‌سوز پلاسمایی، گازی‌سازی، الکترودهای مشعل پلاسما، طیف‌سنج نشروری، کروماتوگرافی

Design and construction of a laboratory plasma gasification system for municipal solid waste

Gh. Khaleghian, N. Beigmohammadi*, N. Morshedian, M. Nohekhan, B. Rezaeefard

Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O. Box: 14399-51113, Tehran - Iran

Research Article

Received 16.10.2022, Accepted 24.1.2023

Abstract

Plasma gasification system technology is one of the definitive low-risk disposal methods. The article discusses the design and construction of a plasma gasification system using a plasma torch. In order to dispose of municipal solid waste, a DC plasma arc flame was implemented. The design and construction of the torch electrodes and their arrangement are such that when waste enters the plasma flame through the upper opening, it is permanently exposed to it. In this way, in addition to better mixing of reactants with plasma, stable performance, better control, and erosion will be reduced. In this system, due to the very high processing temperature, it is possible to remove toxic and contaminated waste. To characterize, analyze and identify torch plasma species and radicals, as well as to determine the electron excitation temperature, an optical emission spectrometer was used. Atomic species such as O, N_۲, N, NO, and OH radicals were detected in the emission spectrum. Using the conditions of thermodynamic equilibrium and the Boltzmann method, the temperature was estimated at 5.38 eV. The gas composition was reported with the gas chromatography method including O_۲, N_۲, CO_۲, CO, and N_۲O gases.

Keywords: Plasma gasification, Gasification, Plasma torch electrodes, Optical emission spectrometer, Chromatography



۱. مقدمه

پسماند جزئی جدانشدنی از فعالیت‌های انسانی است. با رشد جمعیت و توسعه صنعتی و افزایش زباله، مشکل ذخیره آن‌ها آشکار می‌گردد. در این جریان، سهم پلاستیک‌هایی که در محیط طبیعی تجزیه نمی‌شوند، افزایش می‌یابد. به همین دلیل پلاستیک‌ها در معرض بازیافت یا استفاده مجدد قرار می‌گیرند. دفع زباله یکی از مشکلات قرن حاضر است. هرچند اجزاء زباله ارزشمند تلقی می‌شود و زباله طلای کثیف نام گرفته است ولی جهت رفع این مشکل، جوامع به راهکارهای مختلفی روی آورده‌اند. روش‌های مختلفی برای دفن و سوزاندن زباله ارائه شده است. در کشورهای صنعتی از دهه ۱۹۳۰ میلادی، دفن زباله‌ها و پوشاندن آن‌ها با خاک شروع شده است. به دلیل نیاز شدید به انرژی و توجه به پاکیزگی محیط زیست، از دهه ۱۹۷۰ میلادی به بعد تلاش‌هایی برای استفاده از پسماندهای جامد به‌عنوان یک منبع انرژی صورت گرفته است. با این حال، به دلیل اثرات زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی، دفن زباله و سوزاندن برای مدیریت پسماند دیگر مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. تکنیک‌های ترموشیمیایی، مانند گازی‌سازی، به عنوان استراتژی‌هایی برای تبدیل زباله به انرژی به کار گرفته می‌شوند و این یک رویکرد امیدوارکننده را ارائه می‌دهد. آن‌ها می‌توانند نه تنها برای حل مشکلات مدیریت پسماند، بلکه برای تولید انرژی نیز مورد استفاده قرار گیرند و نقش مهمی در رسیدگی به نیازهای انرژی جهانی آینده داشته باشند [۱].

فن‌آوری قوس پلاسمایی یکی از جدیدترین و پیشرفته‌ترین روش‌ها برای حذف پسماند و در پی آن تولید انرژی است. عملیات حرارتی در این فن‌آوری با احتراق همراه نیست و پسماند در محیط با اکسیژن پایین و نزدیک به شرایط خلأ، در دمای بسیار بالاتر از فرایندهای مرسوم سوزانده می‌شود [۲]. این روش برای همه نوع پسماند کاربرد دارد و آلاینده‌های کم‌تری وارد هوا می‌کند، که این مورد را می‌توان از مزایای مهم آن به‌شمار آورد. در چند سال گذشته تحقیق در مورد استفاده از پلاسمای حرارتی برای امحاء زباله‌های شهری، از جمله زباله‌های بیمارستانی و صنعتی، هم‌چنین موارد حاوی ترکیبات آلی مضر، انجام شده است. در فن‌آوری گازی‌سازی پلاسمای دمای بسیار بالا و کمبود اکسیژن منجر به تجزیه کامل مواد به مولکول‌های ساده‌تر شده و ترکیبات آلی به گاز سنتز تبدیل می‌گردند. گاز سنتز غالباً از هیدروژن و مونواکسیدکربن تشکیل شده است [۳]. گازی‌سازی زیست توده در حال حاضر یک فن‌آوری به اثبات رسیده است. از سال ۱۹۸۸، گازی‌سازی و سایر فرایندهای

انرژی جایگزین به دلیل تأمین نسبتاً فراوان سوخت‌های فسیلی کم‌هزینه، در ایالات متحده به آرامی در حال توسعه بودند. با این حال، با شرایط سیاسی می‌تواند به سرعت و به طرز چشمگیری تغییر نماید [۴].

گازی‌سازهای مختلف به روش‌های متفاوت دسته‌بندی می‌شوند. با این حال، بیش‌ترین طبقه‌بندی پذیرفته شده بر اساس ساختار فیزیکی آن‌ها می‌باشد، یعنی گازساز بستر ثابت (طرح بالا و پایین)، گازساز بستر سیال (حباب‌دار و در گردش) و گازساز جریان داخلی. برای نوع خاصی از گازساز، عامل گزدهی می‌تواند هوا، اکسیژن، بخار یا مخلوطی از هردو باشد. استفاده از بخار به عنوان عامل گازی‌سازی توجه زیادی را به خود جلب کرده است، زیرا این مزیت را داراست که گاز تولیدکننده دارای مقدار زیادی هیدروژن است و در نتیجه از ارزش حرارتی بالایی برخوردار می‌باشد. لازم به توضیح است برای گزدهی بخار نیاز به تأمین گرمای خارجی است. این می‌تواند با نصب یک مبدل حرارتی در داخل گازساز یا با گردش مواد بستر که به عنوان یک حامل گرما عمل می‌کند، حاصل گردد. در این فرایند، اکثر زباله‌های آلی در داخل یک راکتور بدون اکسیژن و در اثر گرما توسط منبع حرارتی خارجی به مایع، گاز و جامد تبدیل می‌شود [۵]. گازی‌سازی پیرو یک عملیات حرارتی است که معمولاً مراحل خشک‌کردن، تجزیه در اثر حرارت، گازی‌سازی و اکسیداسیون (جزیی) را در بر می‌گیرد. هیچ مرز مشخصی بین این مراحل مختلف وجود ندارد، آن‌ها اغلب با هم هم‌پوشانی دارند. استفاده از اصطلاح گازی‌سازی-پیرو برای این است که فقط مرحله گازی‌سازی در نظر گرفته نمی‌شود، مرحله تجزیه در اثر حرارت را نیز شامل می‌گردد و تشخیص تجزیه و گازی‌سازی دشوار است. تجزیه معمولاً تحت فشار و درجه حرارت بالا حاصل می‌گردد. یکی از معایب آن هزینه زیاد تولید گازهای حرارتی و نگهداری انرژی پسماندهای داخلی است [۶] و محصول اصلی مونوکسیدکربن است که دارای ارزش حرارتی بالایی است. هنگامی که زیست توده در صورت عدم وجود هوا تا دمای 350°C گرم می‌شود (تجزیه)، ذغال، گازها (CO ، CO_2 ، H_2 ، H_2O ، CH_4) و بخارات قیرگون (با یک ترکیب اتمی تقریبی $\text{CH}_{1.2}\text{O}_{0.15}$) تشکیل می‌گردند. بخارات مذکور گازهایی هستند که در صورت خنک‌شدن، به شکل دود از قطرات ریز تشکیل شده‌اند. از اجزای اصلی فرایندهای مختلف پلاسمای حرارتی صنعتی، مشعل‌های پلاسمای قوس الکتریکی هستند که شامل امحاء زباله، پاشش پلاسمای برش و جوشکاری فلزات، ذوب مواد و تولید گاز می‌باشد [۷]. آن‌ها دستگاه‌های نسبتاً ساده‌ای



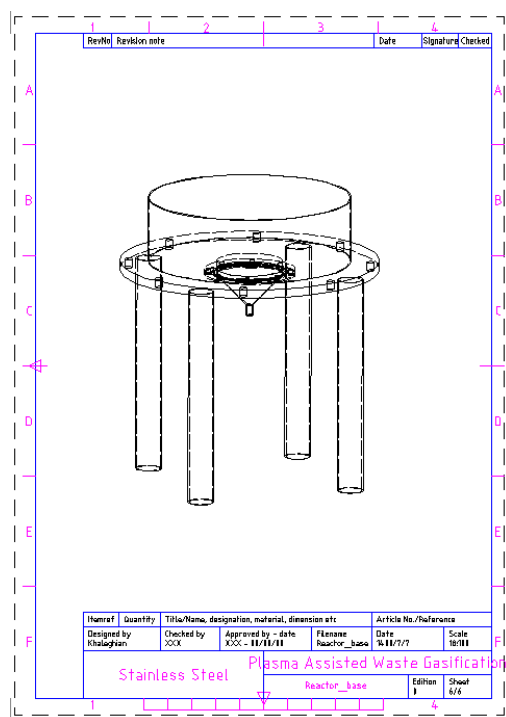
و خوردگی الکتروکمیتری برخوردار خواهد بود. به طور کلی از آنجا که دمای پردازش در این روش بسیار بالاست، قابلیت حذف پسماندهای سمی و آلوده را دارد. علاوه بر این، گاز سنتز تولید شده از این روش قابلیت تولید الکتریسته را خواهد داشت. علی‌رغم حجم بالای سرمایه موردنیاز در گزارش‌های گازی‌سازی پلاسمایی، این روش بسیار پرسود بوده و سرمایه اولیه به سرعت برمی‌گردد. هم‌چنین ساخت زباله‌سوزهای پلاسمایی به عنوان یک روش پاک و سبز برای امحای زباله‌های خطرناک و ویژه نیز به کار می‌رود. هم‌اکنون کشورهای مختلفی به ویژه ژاپن، آمریکا و استرالیا بیش‌ترین تمرکز را بر روی بهینه‌سازی روش گازی‌سازی پلاسمایی دارند و در تلاش برای توسعه صرفه اقتصادی این روش هستند [۴]. در داخل کشور نیز ساخت سامانه‌های امحاء پسماندهای بیمارستانی، صنعتی، دارویی و ... به روش پلاسمای حرارتی در دانشگاه‌های علوم تحقیقات و شهید بهشتی به صورت تحقیقاتی و آزمایشگاهی انجام شده است. چند شرکت دانش بنیان نیز مدعی هستند از توانمندی بالایی در زمینه مدیریت پسماند و سوزاندن زباله با تکنولوژی پلاسمای برخوردار می‌باشند. با این وجود، تاکنون هیچ سایت زباله‌سوزی با فن‌آوری پلاسمای در کشور به منظور تولید انرژی الکتریکی و کاربردهای مختلف، حتی به صورت آزمایشی هم پیاده‌سازی نشده است. تفاوت میان این سامانه‌ها با این مقاله شامل نوع مشعل پلاسمای، نحوه قرارگیری آن، طراحی و ساخت منحصربفرد الکتروکمیتری و نازل برای تبدیل مشعل انتقالی به غیرانتقالی می‌باشد. در ادامه، این مقاله شامل بخش‌های طراحی، ساخت و آزمایش سامانه زباله‌سوز پلاسمایی خواهد بود. هم‌چنین مشخصه‌یابی پلاسمای هوای مشعل توسط طیف‌سنج نشر نوری و آنالیز گاز آلاینده خروجی به وسیله کروماتوگرافی گازی ارائه گردیده است.

۲. طراحی اجزای سامانه زباله سوز

طراحی تجهیزات نظیر محفظه رآکتور، پورت‌های نگه‌دارنده مشعل DC، فلنج، کلکتور خروجی، سیستم آب‌بندی اطمینان جلوگیری از خروج مواد مذاب، سیستم خروجی گاز و الکترودهای مشعل شامل نازل و آند توسط نرم‌افزار Mechanical desktop انجام گردیده است. طراحی برای دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و بالاتر آماده شده است. مشعل پلاسمای نوع غیرانتقالی و گازکاری هوا می‌باشد. به عنوان نمونه، طراحی قسمت‌های محفظه، پورت‌های نگه‌دارنده و فلنج در شکل‌های ۱ تا ۳ نشان داده شده است.

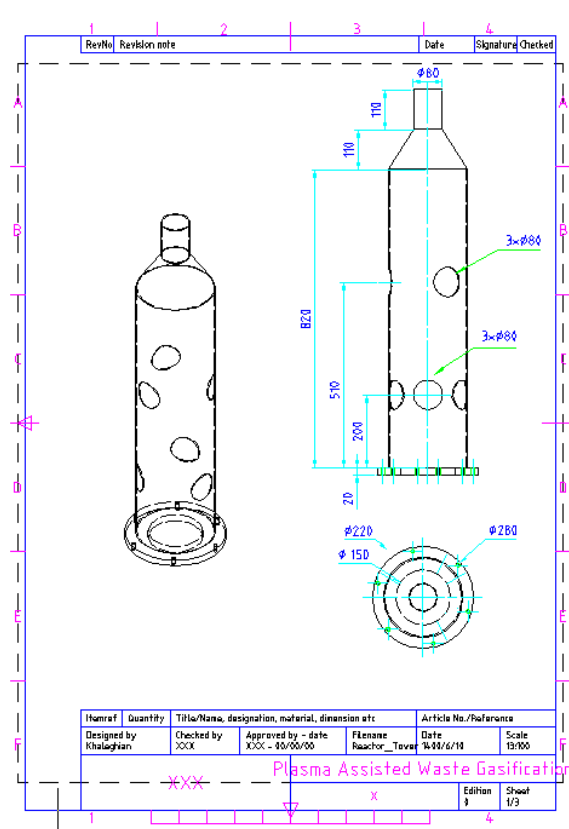
هستند که عملکرد آن‌ها متضمن پدیده‌های پیچیده حرارتی، شیمیایی، الکتریکی و دینامیک سیالات است. مشعل پلاسمایی می‌تواند دمایی بسیار بالا تولید کند. کاربرد اصلی این مشعل‌های پلاسمایی برای امحاء زباله‌های خطرناک و تبدیل زباله به انرژی است. این سیستم تنها سیستمی می‌باشد که می‌تواند زباله‌های خطرناک را ۱۰۰ درصد امحاء و بی‌خطر نماید [۵]. برای تصفیه زباله، پلاسمای ترجیحاً توسط تخلیه الکتریکی DC تولید می‌شود. برای آن می‌توان از دو نوع دستگاه اشاره شده استفاده نمود: قوس غیرانتقالی و انتقالی. حالت قوس غیرانتقالی برای تصفیه زباله رایج‌تر است. الکتریسته با تخلیه الکتریکی از کاتد به آند در داخل یک مشعل آب خنک به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود و جت پلاسمای صادرشده از مشعل را گرم می‌کند. این جریان، پلاسمای را برای تصفیه زباله‌ها فراهم می‌نماید [۸]. مطالعات انجام شده در این زمینه، به دلیل چگالی انرژی فوق‌العاده، دمای بالا، شیب تند دما و کنترل ساده آن است. بنابراین، یک منبع پلاسمایی پایدار، تمیز، قدرتمند و با کنترل آسان برای سنتز مواد با کیفیت بسیار مهم می‌باشد. مشعل‌های قوس DC غیرانتقالی به دلیل قوس‌های پلاسمایی با دمای بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند [۹]. دو نگرانی رایج در مشعل‌های پلاسمای DC پایداری جت پلاسمای و فرسایش آند است [۱۰]. به طور کلی مشعل‌های قوس غیرانتقالی مدنظر در این مقاله که در ادامه به تفصیل توضیح داده خواهد شد، هسته اصلی کاربردهای متنوع، به‌ویژه اسپری پلاسمای هستند. هدف از انجام این گزارش طراحی و ساخت نمونه اولیه سامانه زباله‌سوز پلاسمایی، مطالعه و بررسی بیش‌تر بر روش گازی‌سازی پلاسمایی می‌باشد. در این روش سوخت بیش‌تری به گاز تبدیل شده و ذرات قیر کم‌تری نسبت به زیست توده خالص تولید می‌گردد. افزودن پلاستیک به زیست توده امکان اصلاح ترکیب گاز تولیدکننده و انطباق آن با کاربردهای بعدی را فراهم می‌نماید. بنابراین، انتخاب یک مخلوط مناسب به عنوان مواد اولیه، امکان دستیابی مناسب به توزیع محصول و ترکیب گاز محصول را فراهم می‌نماید که نزدیک‌تر به نیازهای استفاده نهایی نسبت به استفاده از زیست توده به‌تنهایی است. از نوآوری‌های این تحقیق طراحی و ساخت الکترودهای مشعل پلاسمای شامل نازل و آند می‌باشد. سه درگاه برای استقرار مشعل در انتهای پایین و با شیب ۶۰ درجه واقع گردیده و وقتی زباله بر روی شعله پلاسمای از طریق دهانه بالایی وارد می‌شود، در معرض دائمی آن قرار می‌گیرد. به این ترتیب علاوه بر اختلاط بهتر واکنش‌دهنده‌ها با پلاسمای، از عملکرد پایدارتر، کنترل بهتر



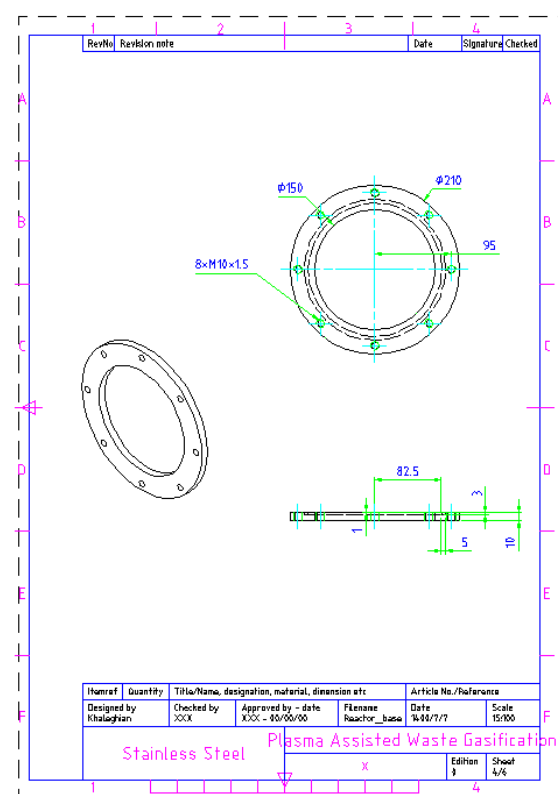


شکل ۳. فلنج پایینی محفظه.

به‌طور کلی یکی از بزرگ‌ترین مزایای گازی‌سازی پلاسما، توانایی آن در تبدیل کامل کربن به CO است. با این حال، این با میزان اختلاط و زمان ماندن سوخت در رآکتور محدود می‌گردد. در شرایط عملیاتی عادی، مقداری خاکستر و مواد جامد نسوخته هنوز در گاز خروجی وجود دارد. طراحی رآکتور به گونه‌ای است که اجازه می‌دهد تا گرد و غبار یا ذغال سوخته در پایین جمع شود. این قطعات جامد کربن را می‌توان از انتهای رآکتور خارج نمود. هنگامی که از پلاسما استفاده می‌شود، خود پلاسما به عنوان منبع انرژی اولیه عمل می‌کند، به‌طوری‌که بیش‌تر انرژی موردنیاز برای فرایند تبدیل به گاز از یک منبع خارجی تأمین می‌گردد. از سوی دیگر، در طی احتراق معمولی، انرژی از ارزش حرارتی ماده گرفته می‌شود و ارزش انرژی گاز سنتز حاصل را کاهش می‌دهد. بنابراین، تبدیل به گاز پلاسما فرایند بسیار کارآمدتری نسبت به گازی‌سازی یا سوزاندن معمولی است. تبدیل به گاز پلاسما تقریباً تمام سوخت را تجزیه می‌کند و در دماهای بالاتر نسبت به روش‌های معمولی گاز سنتز تمیزتری ایجاد می‌نماید. قطران و ذغال سوخته معمولاً تشکیل نمی‌شوند، اگرچه دوده در گاز سنتز به مقدار متعادل در طی تبدیل به گاز چوب وجود دارد. بنابراین، در صورتی‌که زمان ماند و درجه اختلاط کافی باشد، رسیدن به تعادل واکنش در گازساز پلاسما امکان‌پذیر است. استفاده از سیستم بازیافت می‌تواند هر دوی این مشکلات را حل کند. با در نظر گرفتن این موضوع، یک جداکننده سایکلون با کارایی بالا به عنوان سیستم حذف ذرات انتخاب گردید. به جز سهولت کارکرد، نگهداری این سایکلون ارزان است و بسته به انتخاب مواد، می‌تواند دماهای بالا را تحمل

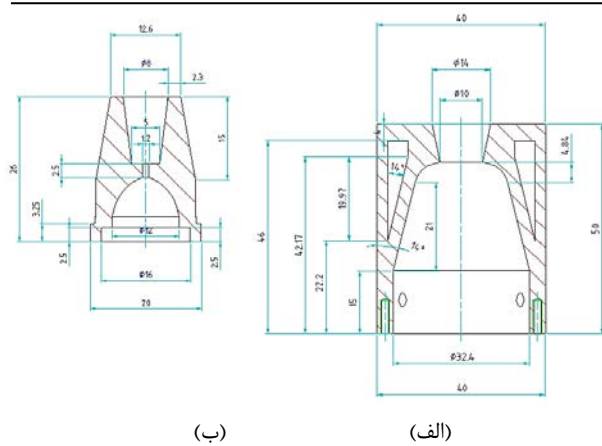


شکل ۱. ابعاد رآکتور و محل پورت.



شکل ۲. فلنج تبدیل.





شکل ۴. شماتیک آند (الف) و نازل (ب).

۳. طیف‌سنجی پلاسمای شعله مشعل

در این گزارش، برای تولید پلاسمای DC از منبع تغذیه مربوط به دستگاه برش پلاسمای شرکت طراحی مهندسی صبا الکتریک سپاهان (PL-INV-۱۲۲) با مشخصات ولتاژ ورودی: ۳۸۰ ولت، آمپراژ کارکرد: ۱۲۰ آمپر، سیستم اینورتر IGBT و بازده ۸۵٪ استفاده گردید. در آزمایش‌های به عمل آمده معمولاً ولوم روی دستگاه، از ۴۰ تا ۱۰۰ درصد حداکثر توان ورودی بالا برده شد. در این راستا توان تخلیه حدوداً برابر ۲ کیلووات، ولتاژ ۱۲۴ ولت و جریان ۱۶ آمپر در ولوم ۴۰ درصد تخمین زده شد. مشخصات پلاسمای مشعل مانند گونه‌ها و رادیکال‌های آزاد به کمک طیف‌سنج ۷۹۰۰ (محصول شرکت فن‌آوران فیزیک نور) با دقت ۰٫۷ نانومتر و در دو بازه طول موجی ۵۵۰-۲۰۰ تا ۱۰۰۰-۵۵۰ نانومتر انجام پذیرفت. طیف اندازه‌گیری شده توسط طیف‌سنج نشر نوری در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. طیف‌ها مربوط به پلاسمای هوا می‌باشد. در اجزای پلاسمای گونه‌هایی مانند N_2 ، N ، NO ، O و رادیکال هیدروکسیل، OH مشاهده گردید. شکل و عرض یک خط طیفی ساطع‌شده توسط پلاسمای، نتیجه‌ای از فرایندهایی است که در تخلیه اتفاق می‌افتد. مطابق شکل، نشر بیش‌تر در ناحیه نزدیک فرابنفش ۲۰۰-۳۵۰ نانومتر مربوط به (NO) اتفاق می‌افتد، گونه‌های نیتروژن به دلیل پخش هوای محیط داخل پلاسمای و اکسیژن به علت برخوردی ذره‌ای این گونه‌ها در پلاسمای هوا حضور دارند. گونه‌های N_2 ، N و O نیز به ترتیب در بازه طول موجی ۳۱۵ تا ۴۲۰ نانومتر، ۵۰۰ تا ۵۵۰ نانومتر و ۷۵۰ تا ۸۷۰ نانومتر دیده شدند. رادیکال هیدروکسیل، OH در بازه طول موجی ۳۱۵-۳۰۵ نانومتر به دلیل تجزیه‌ی مولکول‌های آب ناشی از پخش هوای محیط به درون پلاسمای دارای قله‌هایی با شدت کم است. به طور کلی تغییرات شدتی در خطوط نشری می‌تواند به دلیل تغییرات در توزیع انرژی الکترون باشد [۱۲-۱۴].

نماید که آن را برای این کاربرد ایده‌آل می‌نماید. در سایکلون، گاز از طریق یک ورودی مماسی کوچک به داخل لوله رانده می‌شود، که منجر شده گاز با سرعت‌های بسیار بالا شروع به چرخیدن کند. این امر باعث شده گردابی از گاز مملو از ذرات به طرف قسمت استوانه‌ای و به سمت پایین فشار وارد نماید. گرد و غبار به صورت گریز از مرکز به بیرون گرداب منتقل شده، به داخل مخروط می‌ریزد و از طریق روزنه پایینی خارج می‌گردد. به دلیل قطر کمتر قسمت پایینی مخروط، نیروهای افقی به سمت داخل گاز به شدت افزایش می‌یابد و آن را به سمت داخل و بالا می‌برد. گاز تمیز اکنون گرداب کوچک‌تری از چرخش معکوس را در داخل مرکز گرداب بیرونی تشکیل می‌دهد و از یک خروجی بالایی خارج می‌شود. سایکلون‌ها به عنوان پاک‌کننده‌های اولیه استفاده می‌گردند، زیرا در حذف ذرات بزرگ‌تر (۱۰۰ میکرومتر) کارآمد هستند [۱۱].

یکی از مهم‌ترین نکات در طراحی الکتروود مشعل ساخت آن با کم‌ترین میزان خوردگی حین استفاده است. فرسایش آند در مشعل‌های اسپری پلاسمای منجر به خراب شدن و از بین رفتن کیفیت پوشش خواهد شد. عمر قابل استفاده یک آند مشعل، به شدت به رفتار دینامیکی سیال پلاسمای در داخل مشعل بستگی دارد که به نوبه خود به طراحی هندسی آند و پارامترهای عملیاتی، وابسته است. نتایج نشان می‌دهد که گرداب‌های چرخشی داخل مشعل، به اتصال آند نیرو وارد می‌کند، که برای انژکتورهای گازهای مختلف، متفاوت است. به حداقل رساندن چنین نواحی چرخشی با طراحی مناسب منجر به افزایش عمر آند خواهد گردید. این رویکرد به درک بهتر رفتار قوس، در مشعل‌های پلاسمای تجاری و کنترل فرسایش آند کمک می‌کند [۵]. اکثر مشعل‌های قوس DC دارای سه جزء اصلی هستند: آند، کاتد و تزریق گاز. آند، الکتروود مثبت مشعل پلاسمای است. شارگرمایی دریافت شده در آن بسیار زیاد است. مواد آند باید رسانایی گرمایی و هدایت الکتریکی خوبی داشته باشد. به همین منظور از مس به عنوان ماده آند استفاده می‌گردد. قطر خارجی، قطر داخلی کوچک و بزرگ آن به ترتیب ۴۰، ۱۰ و ۱۴ میلی‌متر بوده و در کل طول آند برابر ۵۰ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به این‌که شار حرارتی بالا از قوس می‌تواند به راحتی به آند آسیب برساند، آند دوجداره و آب گرد بوده و از آب سرد برای خنک‌کردن استفاده می‌گردد. الکتروود میانی از جنس مس، نازل نام دارد که بین کاتد و آند قرار گرفته است. قوس پایلوت بین کاتد و نازل با استفاده از ولتاژ و فرکانس بالا مشتعل می‌شود. هنگامی که قوس برقرار شد، نازل به الکتروود شناور تبدیل خواهد شد. سمت داخلی نازل به شکل همگرا در نظر گرفته است. در خروجی نیز طرحی واگرا دارد. تصویر و شماتیک آند و نازل در شکل ۴ آورده شده است.



کمیت‌های اسپکتروسکوپی مرتبط با طول موج قله‌های طیفی مانند E_k , A_{ki} , g_k به ترتیب انرژی تحریکی، احتمال انتقال نشر تابش خودبه‌خودی از سطح بالاتر k تا سطح پایین‌تر i و وزن آماری سطح بالاتر نشری k می‌باشند (جدول ۱).

شکل ۷ نمودار بولتزمن را برای موقعیتی در فاصله ۱۰ میلی‌متری از نقطه خروجی نازل نشان می‌دهد. برای این نمودار پنج خط طیفی مربوط به نیتروژن مطابق جدول ۱ انتخاب شد. دمای برانگیختگی الکترون از نمودار $\frac{I_{ki}\lambda_{ki}}{A_{ki}g_k}$ به عنوان تابعی از دما محاسبه می‌شود. از این‌رو، با استفاده از معادله ۱، شیب خط، یعنی دما را نتیجه می‌دهد.

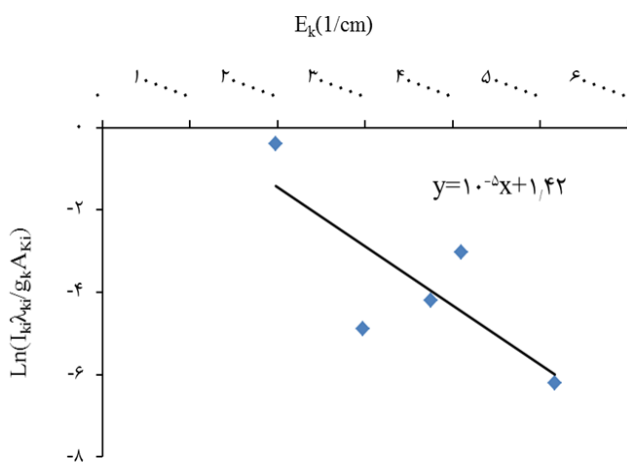
طبق شکل ۷ و معادله ۲ دمای برانگیختگی الکترونی برابر ۵۳۸ الکترون ولت تخمین زده شد. در معادله مذکور m شیب خط است [۱۷].

$$T_{ex} = -\frac{0.625}{m} \quad (2)$$

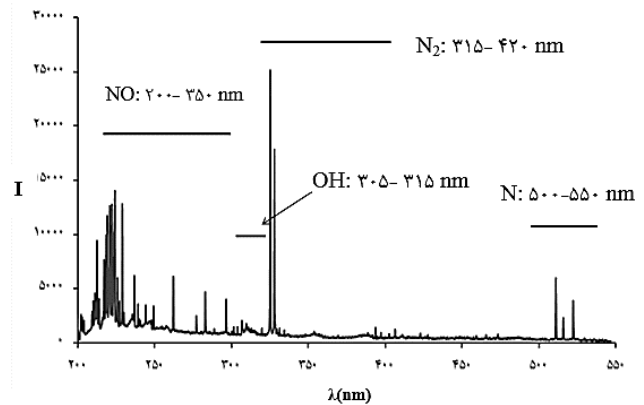
به این ترتیب، فرایند گازی‌سازی ترکیبات حاصل از زیاله به‌صورت کامل انجام خواهد شد.

جدول ۱. داده‌های اسپکتروسکوپی خطوط نشری نیتروژن جهت تخمین دمای برانگیختگی الکترون

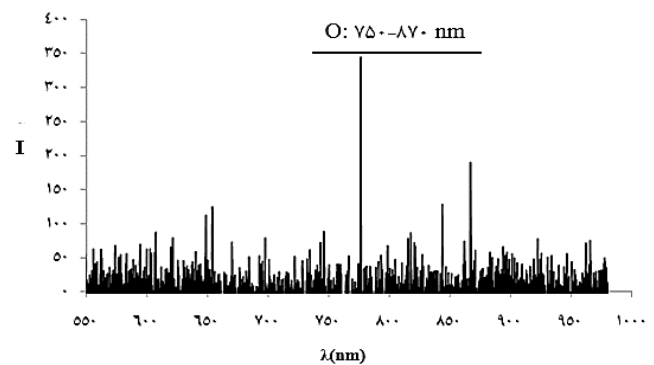
$\lambda(\text{nm})$	$I_{ki}(\text{a.u.})$	$E_k(\text{eV})$	$g_k A_{ki}(\text{s}^{-1})$	$\ln(I_{ki}\lambda_{ki}/g_k A_{ki})$
۳۱۲.۴۴	۱۲۳۹.۱۲	۳۷۴۷.۴۶	2.82×10^7	-۴.۲۸
۳۱۲.۷۱	۱۳۲۵.۱۱	۵۱۶۵.۶۰	2.09×10^8	-۶.۲۲
۳۱۹.۶۸	۱۳۱۲.۸۸	۱۹۷۸.۵۸	6.27×10^5	-۰.۴۰
۳۳۱.۲	۱۳۳۰.۴۶	۴۰۹۴.۸۶	9.08×10^6	-۳.۰۲
۳۳۴.۲۲	۱۱۴۴.۳۴	۲۹۷۱.۵۱	5.12×10^7	-۴.۸۹



شکل ۷. تخمین دمای برانگیختگی الکترون توسط نمودار بولتزمن.



شکل ۵. طیف‌سنجی پلاسمای هوای مشعل در ناحیه طول موجی ۲۰۰-۵۵۰ نانومتر توسط طیف‌سنج نشر نوری.



شکل ۶. طیف‌سنجی پلاسمای هوای مشعل در ناحیه طول موجی ۵۵۰-۱۰۰۰ نانومتر توسط طیف‌سنج نشر نوری.

۱.۳ محاسبه دمای برانگیختگی الکترون

به دلیل به‌کارگیری مشعل پلازما در ساختار دستگاه گازی‌ساز، مشخصه دما برای مشعل، از اهمیت بالایی برخوردار است. پلازما وقتی در شرایط تعادل گرمایی موضعی باشد، دمای گونه‌های سنگین و سبک تقریباً با هم برابر است و جمعیت نسبی ترازهای یونی و اتمی از توزیع بولتزمن پیروی می‌کند [۱۵]. این روش برای مشعل‌های پلاسمای DC که در آن ستون پلازما دارای مشخصات دمای گاوسی با گرادیان بالا است، قابل استفاده است. با استفاده از روش بولتزمن اتمی، دمای تحریک به دست آمده، مقدار میانگین مکانی دما در امتداد خط دید به دست می‌آید [۱۶]. شدت خط طیفی وابسته به دمای الکترون و متناسب با چگالی جمعیت حالت برانگیخته است. بنابراین، دما را می‌توان با استفاده از نمودار بولتزمن حاصل از طیف‌ها از برون‌یابی معادله (۱) تعیین نمود. I شدت خطوط طیفی، λ طول موج، T دما و k ثابت بولتزمن است:

$$\ln\left(\frac{I_{ki}\lambda_{ki}}{A_{ki}g_k}\right) = \ln\left(\frac{hcN_o}{4\pi}\right) - \frac{E_k}{kT} \quad (1)$$





شکل ۹. ساخت آند (الف) و نازل (ب).

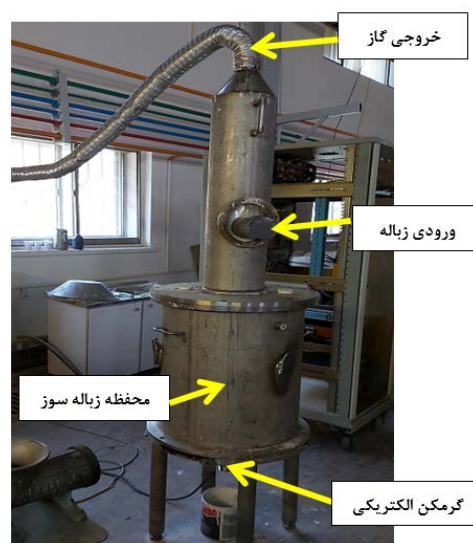
بدنه داخلی رآکتور با یک عایق جرم ریختنی (Rascst A18) پوشانده شده است. جنس مانع حرارتی از آلومینا می‌باشد (شکل ۱۰). نحوه قرارگیری المنت حرارتی در انتهای محفظه زباله‌سوز، در شکل ۱۱ به تصویر کشیده شده است. در پایان جریان گاز حامل از کمپرسور هوای موجود مورد آزمایش قرار گرفت و با روشن شدن مشعل، ستون پلاسمای حاصله، به شکل پایداری ایجاد گردید. در یک تست با افزایش نرخ جریان، عملکرد مشعل پیاده شده آزمایش شد و در طی این آزمایش به قطعات ساخته شده آسیبی وارد نگشت.

در سیستم مذکور به صورت آزمایشی مقداری کاغذ، چوب و پلاستیک در محفظه ریخته شد. حین روشن بودن المنت حرارتی، مشعل روشن پلاسمای هوا در محفظه مستقر گردید. نتیجه اولیه از نظر امحاء و سوزاندن مورد مشاهد و بررسی قرار گرفت. دمای داخل محفظه به ۹۳۸ درجه سانتی‌گراد رسید. شکل ۱۲ نمایی از میزان دما (سمت راست) و درون محفظه روشن (سمت چپ) را نشان می‌دهد.

برای تست گاز متصاعد شده خروجی سیستم زباله‌سوز از روش کروماتوگرافی گازی استفاده گردید. کروماتوگرافی گازی یکی از متداول‌ترین روش‌های کروماتوگرافی است که برای آنالیز نمونه‌هایی که قابلیت تبخیر شدن بدون تخریب ساختار را دارند، کاربرد دارد. در این راستا نمونه گازی، توسط کروماتوگرام HP-5MS به ابعاد ۳۰ متر طول، قطر ۰/۲۵ میلی‌متر، ضخامت ۰/۲۵ میکرون و دقت ۰/۰۵ درصد مورد آنالیز قرار گرفته است. در مواد تشکیل‌دهنده گاز موردنظر گازهای N_2 و O_2 و مقدار ناچیزی گازهای CO، CO_2 و N_2O دیده شد. در شکل ۱۳ نتایج کروماتوگرافی مربوط به شناسایی گازهای مذکور آورده شده است.

۴. ساخت و راه‌اندازی سامانه زباله‌سوز

در رآکتور پلاسمایی که برای زیست توده و گازی‌سازی زباله‌های آلی استفاده می‌شود، منبع پلاσμα، مشعل پلاسمای قوسی است، که بر اساس تخلیه قوس در میدان الکتریکی مستقیم DC یا جریان متناوب AC، اغلب در فرکانس شبکه، بین الکترودها تولید می‌گردد. در مشعل‌های قوسی عوامل تولیدکننده پلاσμα گازهایی مانند آرگون، نیتروژن، CO_2 ، بخار آب یا مخلوط آن‌ها می‌باشد. از دیگر فاکتورهای قابل توجه می‌توان به محفظه گازساز، روش قرار دادن مشعل‌ها، محل تغذیه مواد و جایگاه جمع‌آوری گاز اشاره نمود. اساسی‌ترین عنصر تأسیسات آزمایشی، بلوک گازی‌سازی پلاسمایی است. این اتاقک از یک محفظه احتراق با مقره‌هایی برای مشعل ساخته شده است. به دلیل دمای بالا و تراکم انرژی در کانال پلاσμα (در ناحیه الکترودها دما معمولاً به چند هزار کلوین و در هسته کانال پلاσμα چند ده هزار می‌رسد) الکترودهای موجود در مشعل‌ها باید خنک شوند. رآکتور ساخته شده در شکل ۸، مواد بر روی شعله پلاσμα از طریق دهانه بالایی تغذیه می‌شوند. اما از آنجایی که مشعل در انتهای پایین و در عین حال شیب ۶۰ درجه روبه پایین دارد، لذا زباله در معرض دائمی شعله قرار می‌گیرد. این مجموعه مجهز به گرم‌کن الکتریکی است. فضای مفید محفظه در ناحیه مشعل ۶۰ لیتر و این حجم، محصور در سیمان نسوزی از آلومینا است. ضخامت جداره و بدنه به ترتیب ۷۰ و ۴۵ میلی‌متر می‌باشد. قطر داخلی ۴۰۰ میلی‌متر و دهانه ورودی برابر ۱۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. قسمت فوقانی یک مجرا برای ورود زباله و مجرای دیگر، خروجی گاز است. بخش‌های مرتبط با مشعل شامل آند و نازل و محفظه رآکتور زباله‌سوز به ترتیب در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۸. ساخت سیستم زباله‌سوز پلاسمایی.



۵. نتیجه‌گیری

هدف از انجام این مقاله، طراحی و ساخت نمونه اولیه سامانه زباله‌سوز پلاسمایی می‌باشد. در این سامانه، پیاده‌سازی شعله قوس پلاسمای DC با طراحی و ساخت منحصربفرد الکتروود آند و نازل برای تبدیل مشعل انتقالی به غیرانتقالی و همچنین قرارگیری در مقره‌هایی شبیدار صورت پذیرفته است. در نتیجه علاوه بر این‌که زباله در معرض دائمی شعله قرار می‌گیرد، طول عمر آند نیز به دلیل حداقل فرسایش، افزایش خواهد یافت. در مشخصه‌یابی پلاسمای هوای شعله، توسط روش طیف‌سنجی نشر نوری گونه‌هایی مانند N_2 ، NO ، O و رادیکال هیدروکسیل، OH مشاهده گردید. در آنالیز کروماتوگرافی گازی، گاز آلاینده خروجی شامل گازهای CO_2 ، N_2 ، O_2 ، CO و N_2O گزارش شد. دمای برانگیختگی الکترونی نیز با استفاده از روش بولتزمن برابر $5/38$ الکترون ولت تخمین زده شد. در اثر دمای پردازش بسیار بالا، قابلیت حذف پسماندهای سمی نیز وجود خواهد داشت. در این شرایط همه جرم و حجم پسماند تا حد بسیار زیادی کاهش می‌یابد. این سامانه، نیازمند حداقل پیش‌تصفیه می‌باشد. همچنین توانایی به حداقل رساندن و یا عدم نیاز به تعیین محلی برای دفن زباله دارد، به این ترتیب می‌تواند برای پردازش پسماند در محل دفن زباله‌های موجود و از بین بردن محل دفن زباله قدیمی مورد استفاده قرار گیرد. از تجزیه و تحلیل مطالب ذکر شده، می‌توان نتیجه گرفت که فرایند گازی‌سازی با پلاسما به دلیل ویژگی‌های اشاره شده، جذاب‌ترین فرایند برای مقابله با چالش زباله‌های شهری می‌باشد.

تشکر و قدردانی

این مقاله بر اساس نتایج گزارش تحت عنوان "طراحی و ساخت نمونه آزمایشگاهی زباله‌سوز پلاسمایی برای امحاء زباله‌های جامد شهری"، مصوب پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای با کد PRI-F2-99-003 نوشته شده است.



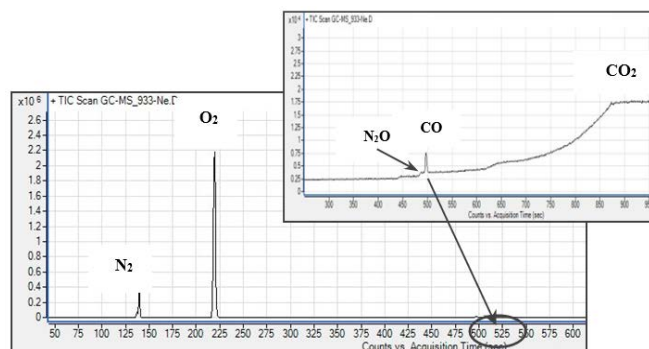
شکل ۱۰. بدنه داخلی رآکتور با عایق آلومینا.



شکل ۱۱. نحوه قرارگیری المنت حرارتی در قسمت انتهای محفظه.



شکل ۱۲. دمای داخل محفظه (الف) و نمایی از درون محفظه روشن (ب).



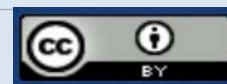
شکل ۱۳. آنالیز گاز متصاعد شده خروجی سیستم زباله‌سوز پلاسمایی توسط کروماتوگرافی گازی.



- Oliveira M, Ramos A, Ismail T.M, Monteiro E, Rouboa A. A Review on Plasma Gasification of Solid Residues: Recent Advances and Developments. *Energies*. 2022;15(4):1475.
- Roth J.R. Applications to Non-thermal Plasma Processing, Industrial Plasma Engineering. 2. (IOP Institute of Physics Publishing, Bristol. (2001).
- Moustakas K, Fatta D, Malamis S, Haralambous K, Loizidou M. Demonstration plasma gasification/vitrification system for effective hazardous waste treatment. *Journal of Hazardous Materials*. 2005;123(1):120-126.
- Gary C. Municipal solid waste to energy conversion processes: economic, technical, and renewable comparisons. *John Wiley & Sons*. (2010).
- Pang S, Fuel Flexible Energy Generation. *Elsevier*. 2016;241-269.
- Block C, Ephraim A, Weiss-Hortala E, Minh D.P, Nzihou A, Vandecasteele C. Co-pyrogasification of Plastics and Biomass. *Waste and Biomass Valorization*. Springer. 2019;10(3):483-509.
- Trelles J.P, Chazelas C, Vardelle A, Heberlein J.V.R. Arc Plasma Torch Modeling. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2009;18(5-6).
- Ducharme C. M.Sc. thesis: Technical and economic analysis of Plasma-assisted Waste-to-Energy processes. *Columbia University*. (2010).
- Sun Q, Liu Y, Zhu Y, Han Y. Experimental investigation into the anode erosion phenomenon in a DC non-transferred arc plasma torch. (2020).
- Zhukovskii R, Chazelas C, Vardelle A, Rat V. Control of the Arc Motion in DC Plasma Spray Torch with a Cascaded Anode. *J. Therm. Spray Tech.* (2019).
- Hattingh M, Van der Walt I. J, Waanders F.B. Comparison of Cyclone Design Methods for Removal of Fine Particles from Plasma Generated Syngas. *Int. J. Mech. Mechatron. Eng.* 2017;11(1).
- Islam Khan M.S, Lee E.J, Kim Y.J. Roles of individual radicals generated by a submerged dielectric barrier discharge plasma reactor during Escherichia coli O157:H7 inactivation. *AIP Advances*. 2014;5:107111.
- Wang Y, Cheng C, Gao P, Li S, Shen J, Lan Y, Yu Y, Chu P.K. Cold atmospheric-pressure air plasma treatment of C₆ glioma cells: effects of reactive oxygen species in the medium produced by the plasma on cell death. *Plasma Sci. Technol.* 2017;19.
- Hong Y.C, Chun S.M, Cho C.H, Shin D.H, Choi D.H. High-Power Pure Steam Plasma Torch and Its Temperature Measurements. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2015;43(2).
- Lee Y.K, Hwang K.T, Lee M.H, Chung C.W. Spectroscopic Measurement of the Electron Temperature and the Metastable Densities by Using a Simple Collisional-Radiative. *J. Korean Phys Soc.* 2008;52(6):1792-1799.
- Joshi N.K, Sahasrabudhe S.N, Sreekumar K.P, Venkatramani N. Variation of axial temperature in thermal plasma jets. *Meas. Sci. Technol.* 1997;8:1146-1150.
- Isoldi M, Ozono E, Mansano R. Excitation Temperature Measurements on a New Atmospheric Microwave Plasma Torch. *J. Nanosci Nanotech Applic.* 2018;2(1).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

خالقیان، قهار، بیگ محمدی، نرگس، مرشدیان، نادر، نوحه‌خوان، مجتبی، رضایی‌فرد، بهزاد. (۱۴۰۳)، طراحی و ساخت نمونه آزمایشگاهی زباله‌سوز پلاسمایی برای امحاء زباله‌های جامد شهری. *مجله علوم و فنون هسته‌ای*، ۱۰۷(۱)، ۷۹-۸۷. DOI: 10.24200/nst.2023.1237.1805

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1538.html

