

Research Paper

The analysis of Governing Thermodynamics of Plasma Waste Incinerator, Temperature Measurement and Analysis of Burning Chamber and Calculation of Electrical Arc Temperature ¹

Nader Morshedian ^{*2} and Narges Beigmohammadi³

Received: 2023.07.08

Revised: 2023.09.11

Accepted: 2023.10.21

Abstract

Using the experimental results and data, the thermodynamic characteristics and thermal analysis of the electrical arc of torch electrodes and energy deposition in the waste-incinerator primary designed chamber were investigated. The temperature of arc in the intermediate electrode which is called the float nozzle was measured at 7000-8000 Kelvin based on the input power of 2 kW. The plasma plume temperature implied to be lower than the arc temperature according to the cold gas flow in the nozzle. The efficiency of energy transferring to the plasma plume is dependent on the geometrical electrode and nozzle design, and gas flow rate. After ten seconds, the chamber temperature was measured at 1193 Kelvin by thermocouple with the performance of electrical elements and plasma torch. The chamber temperature increasing in an adiabatic process was calculated at 1230 Kelvin after this time. According to the isothermal approach, the heat flow rate, and conduction loss calculation, the chamber temperature was obtained at about 900-1000 Kelvin. Using two approaches with inevitable approximations, the calculated temperature ranges for arc and plasma plume energy estimation have reasonable compatibility and this led to the road map of optimization and development for future torch planning and waste-incinerator chamber design.

Keywords: *Electrical Arc Temperature, Waste-Incinerator Chamber Thermodynamics, Conduction Loss, Plasma Plume.*

¹ <https://doi.org/10.22051/ijap.2023.43972.1337>

² Assistant Professor, Research School of Plasma and Nuclear Fusion, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran. (Corresponding Author) Email: nmorshed@aeoi.org.ir

³ M. Sc. Graduated, Research School of Plasma and Nuclear Fusion, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran. Email: nbm17p@gmail.com



تحلیل ترمودینامیک حاکم بر محفظه زباله سوز پلاسمایی، اندازه‌گیری و تحلیل دمای محفظه و محاسبه دمای قوس الکتریکی^۱

نادر مرشدیان^{۲*} و نرگس بیک محمدی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۹

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال چهاردهم، پیاپی ۳۶، بهار ۱۴۰۳

صص ۱۰۴ - ۱۱۸

چکیده:

در کار حاضر، مشخصات ترمودینامیکی و تحلیل دمایی از قوس الکتریکی در الکترودهای مشعل و انرژی انباشت شده در محفظه اولیه طراحی شده برای زباله‌سوز، برای یک مشعل حرارتی پلاسمایی، با استفاده از آزمایش‌های صورت گرفته و داده‌های بدست آمده، اندازه‌گیری و محاسبه شد. دمای قوس الکتریکی در الکترود میانی که نازل شناور نامیده می‌شود، بر پایه توان اندازه‌گیری شده ورودی حدود ۲ کیلووات، در محدوده ۷۰۰۰ تا ۸۰۰۰ درجه کلوین محاسبه شد. دمای شعله پلاسمایی خروجی از مشعل با توجه به شارش گاز سرد، انتظار می‌رود دمای کمتری از قوس داشته باشد. بهره‌انتقال انرژی به شعله پلاسمایی، به طراحی هندسی الکترودها و نازل و جریان گاز وابسته است. دمای محفظه نیز پس از زمان ده ثانیه با روشن بودن مشعل و المنت‌های حرارتی، حدود ۱۱۹۳ درجه کلوین با ترموکوپل اندازه‌گیری شد. افزایش دمای محفظه بر پایه فرآیند بی‌درروی گرمای انباشت شده پس از این زمان، حدود ۱۲۳۰ درجه کلوین محاسبه شد. با رهیافت فرآیند همدمای و تعادل گرمایی پس از زمان طولانی، آهنگ شار حرارتی و اتلاف ناشی از رسانش، دما محاسبه و حدود ۹۰۰ - ۱۰۰۰ درجه کلوین برآورد شد. در هر دو رهیافت با تقریب‌های لازم، محدوده دمایی محاسبه شده برای قوس و تخمین انرژی شعله پلاسمایی، سازگاری منطقی با اندازه‌گیری دارند و نقشه راه مناسبی را برای توسعه و بهینه‌سازی طراحی آینده مشعل و محفظه زباله‌سوز بدست می‌دهد.

واژگان کلیدی: دمای قوس الکتریکی، ترمودینامیک محفظه زباله‌سوز، اتلاف رسانشی، شعله پلاسمایی.

^۱ <https://doi.org/10.22051/ijap.2023.43972.1337>

^۲ استادیار، پژوهشکده پلاسمای و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران. (نویسنده مسئول). Email: nmorshed@aeoi.org.ir

^۳ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، پژوهشکده پلاسمای و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران. Email: nbm17p@gmail.com



۱. مقدمه

تولید زباله یکی از مشکلات و دغدغه‌های جوامع بشری چه در مقیاس شهری و چه در مقیاس روستایی است. این پدیده به صورت سنتی با دفع زباله در حاشیه شهرها یا روستاها صورت می‌گیرد و این خود با مشکلات و عوارض دیگری همچون تولید شیرآبه‌های خطرناک و سمی زباله برای محیط زیست، و نفوذ آن‌ها به خاک‌های کشاورزی یا منابع آب زیرزمینی همراه است.

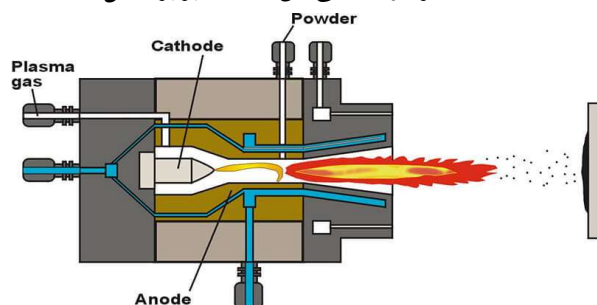
از این رو از بین بردن زباله، به ویژه با استفاده از فناوری‌های نوین، یکی از برنامه‌های مسئولین شهری و یکی از فعالیت‌های علمی پژوهشگران در این حوزه بوده است. در این راستا، فناوری پلاسما و در پی آن ساخت مشعل‌های پلاسمایی با درجه حرارت بالا برای تجزیه زباله به گاز مفید و سوزاندن آن با کمترین پسماند، مورد نظر است [۱]. کاربردهای گوناگونی از مشعل‌های پلاسمایی در صنعت و محیط‌زیست وجود دارد که در حقیقت جایگزین خوبی برای مشعل‌های حرارتی سنتی، ویژه سوزاندن زباله، بوده است [۲].

همچنین می‌توان با سازوکارهایی، گاز تولید شده ناشی از سوزاندن زباله در محیط پلاسما را به گازهای قابل اشتعال تبدیل کرد و دوباره برای تولید انرژی از آن استفاده نمود. این بدان معناست که اگر زباله جداسازی شده باشد و از فلز و شیشه و مواد مصنوع جامد دیگر جدا شده باشد و تنها زباله‌های تر و مواد آلی بر پایه کربوهیدرات و پلاستیکی باشند، در فرآیند سوزاندن پلاسمایی و سپس گازی‌سازی^۱، گاز بدست آمده دوباره برای تولید انرژی، قابل اشتعال و استفاده است [۳]. در این حالت اگر خاکستری یا پسماندی از آن مثل دوده به جا مانده باشد، نیز قابل تبدیل به مواد دیگر کاربردی خواهد بود.

مشعل‌های پلاسمایی از نظر تخلیه الکتریکی به چند گونه‌ی مشعل با تخلیه الکتریکی جریان مستقیم (DC) [۴-۶]، جریان متناوب (AC) یا تخلیه بوسیله امواج رادیویی (RF) [۷-۸] تقسیم می‌شوند. هر کدام از این گونه‌ها، فواید و معایبی نیز دارند ولی کاربرد آن‌ها به شرایط کاری بستگی دارد. مشعل‌های (DC) خود به دو گونه انتقالی و غیرانتقالی تقسیم‌بندی می‌شوند. در گونه انتقالی یک الکتروود (اغلب کاتد) درون ساختار خود سامانه و الکتروود آند در خارج از سامانه، مثلاً روی قطعه کاری یا هدف سوختنی، قرار می‌گیرد که شعله پلاسمای بین کاتد و آند به شکل قوس الکتریکی شکل می‌گیرد. در روش یا پیکربندی انتقالی توانایی گسترش بیشتر شعله روی قطعه کار نیز فراهم می‌شود. اگرچه، در نمونه غیرانتقالی هر دو الکتروود در پیکربندی واحد خود سامانه، جای می‌گیرند

^۱ Gasification

و قوس الکتریکی و در نهایت، پلازما از گازی که به شکل جت در فضای بین الکترودها جریان دارد، شکل گرفته و در اثر این جریان، گاز به شکل شعله پلاسمایی از نازل، با طول مشخص در فشار اتمسفر به بیرون هدایت می‌شود [۹]. پلاسمای حرارتی یک مشعل پلاسمایی با دمای بالا یعنی در محدوده ۱۰۰۰-۱۰۰۰۰ درجه سانتی‌گراد که ممکن است برای کاربردهای گوناگون متفاوت باشد، مورد نظر است. شماتیک یا طرحواره کلی این دستگاه برابر شکل (۱) است:



شکل ۱ طرحواره مشعل پلاسمایی.

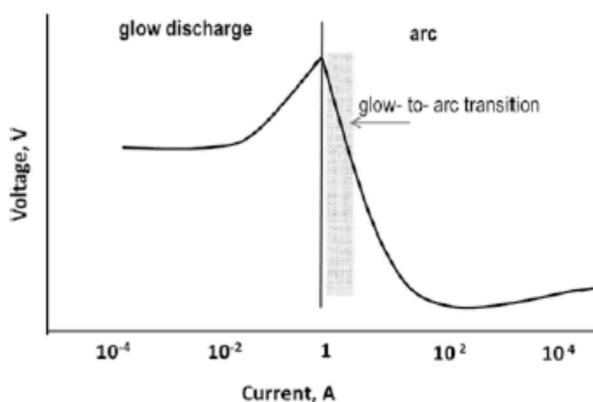
در این پژوهش، هدف اصلی تعیین دمای قوس الکتریکی مولد پلازما، بدست آمده از توان الکتریکی تخلیه شده بین دو الکترود آند و کاتد مشعل، اندازه‌گیری و محاسبه دمای محفظه زباله‌سوز و مقایسه آن دو در انتقال انرژی پلاسمایی است. در این راستا با روش ترمودینامیکی و قوانین سیالی دمای مربوطه تخمین زده می‌شود. با برآورد مناسب و تحلیل ترمودینامیکی دما، می‌توان به کارآیی یک مشعل زباله‌سوز پلاسمایی دست یافت و برای بهینه‌سازی و توسعه آن گام‌های علمی و مناسب برداشت.

۲. محاسبه دمای قوس الکتریکی در فضای بین دو الکترود

تخمین دمای قوس الکتریکی در فضای بین دو الکترود آند و کاتد مهم به شمار می‌آید. اگر این انرژی گرمایی قوس الکتریکی، که در بیرون از الکترودها با پاشش گاز یا جت گاز به عنوان شعله پلاسمایی مشعل خودنمایی می‌کند، به خوبی منتقل شود، دمای بزرگ مقیاس شعله نیز بایستی به دمای قوس نزدیک باشد [۱۰]. البته دمای شعله حتماً از دمای قوس کمتر خواهد بود. دلیل این امر آن است که جریان گاز سرد یا هوا در فضای بین الکترودها، دمای شعله پلاسمایی در بیرون از این فضا را ناگزیر کاهش می‌دهد.



به صورت کلی، در جریان‌های پایین، یک تخلیه افروخته شکل می‌گیرد و با افزایش جریان، تخلیه الکتریکی به تخلیه قوس (ARC) تبدیل می‌گردد. این انتقال با افت سریع^۱ پتانسیل حفاظ کاتد^۲، از چندین کیلوولت تا ۱۰ ولت همراه است. در حقیقت قوس الکتریکی در چگالی بالای جریان و کاهش کم پتانسیل کاتد، ادامه می‌یابد. با افزایش جریان، گسیل الکترونی از کاتد رشد می‌کند و برخورد آن‌ها با ذرات گاز، سبب افزایش دمای آن‌ها شده و در این حالت یک پلاسمای برخوردی و یونش حرارتی غالب است. مشخصه جریان - ولتاژ در یک تخلیه الکتریکی مستقیم (DC) بین دو الکتروود در شکل (۲) نشان داده شده است [۱۱].



شکل ۲ منحنی مشخصه جریان - ولتاژ در تخلیه الکتریکی مستقیم (DC).

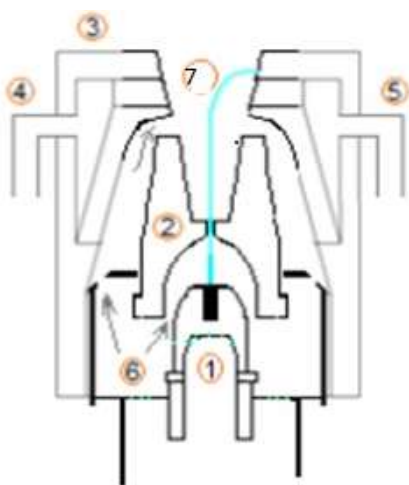
در حقیقت، یک پلاسمای اولیه در نتیجه یونیزاسیون میدانی و سپس آبخاری در فضای بین آند و الکتروود میانی (نازل شناور) شکل می‌گیرد. سپس با فاصله زمانی کوتاهی متناسب با رسانش پلاسمای ایجاد شده، ولتاژ و جریان اصلی بین آند و کاتد برقرار می‌گردد. در این حالت قوس الکتریکی با توان بالا بین آند و کاتد شکل می‌گیرد.

مشعل پلاسمایی ساخته شده در این کار تجربی از نوع جریان مستقیم و قوسی غیرانتقالی است. ولتاژ کاری در محدوده ۱۲۰ تا ۱۲۵ ولت و جریان الکتریکی نیز در گستره ۱۵ تا ۲۰ آمپر اندازه‌گیری شده است. شکل طرحواره الکتروودها، نازل و مسیر هوا یا گاز در مشعل غیرانتقالی در شکل (۳) نشان داده شده است.

¹ Steep drop

² Sheat potential

همچنین، شکل (۴) تصویر کاتد، نازل شناور و آند، هر سه از جنس مس ساخته شده را نشان می‌دهد و هر کدام بوسیله عایق‌های سرامیکی و یا پلیمری از هم جدا می‌شوند.



شکل ۳ طرحواره الکترودها متشکل از: (۱) کاتد، (۲) نازل شناور (الکتروود میانی)، (۳) آند، (۴) و (۵) ورودی و خروجی آب، (۶) ورودی گاز (هوا)، (۷) قوس الکتریکی (رنگ آبی).



شکل ۴ از راست، (الف) کاتد مسی با سر تنگستنی هواخنک برای پیش‌یونش (behjoosh.com)، (ب) الکتروود میانی (نازل شناور مسی) هواخنک، طراحی جدید و (ج) سمت چپ آند مسی با خنک‌سازی آبگرد، طراحی جدید.

در این آزمایش، یک پیش‌یونش بین الکتروود کاتد و نازل شناور در ولتاژ ۳۰ کیلوولت و جریان میلی‌آمپر پدید می‌آید، سپس این پیش‌یونش قطع شده و توان الکتریکی اصلی حدود ۲ کیلووات بین آند و کاتد تخلیه می‌شود. طول قوس ایجاد شده با توجه به مختصات الکتروودها و فاصله جانبی آند با کاتد، فضای استوانه‌ای به شعاع $r = 1 \text{ mm}$ و طول $l = 2 \text{ cm}$ است. با فرض تقارن استوانه‌ای قوس الکتریکی در فضای بین الکتروودها، و داشتن چگالی هوا به عنوان سیال تراکم‌ناپذیر،



می توان افزایش دمای آن را تا تشکیل قوس و یونش گاز، در واحد زمان تخمین زد. از قانون ترمودینامیک داریم:

$$Q = mc\Delta T \quad (1)$$

با توجه به رابطه (۱)، Q انرژی گرمایی بر حسب ژول، m جرم گاز درون استوانه قوس، $c = 1.012$ $Jg^{-1}K^{-1}$ ظرفیت گرمایی ویژه هوا و $\Delta T = T_f - T_i$ افزایش دمای گاز بر حسب کلوین خواهد بود. توان الکتریکی تخلیه شده بین دو الکتروود با اندازه گیری جریان و ولتاژ ورودی اندازه گیری و $P_e = 2$ kW محاسبه شده است. چگالی هوا $\rho_{air} = 1.2$ kg/m^3 است، بنابراین دمای گاز در قوس الکتریکی با زمان اعمال توان الکتریکی تخمین زده می شود.

برای محاسبه جرم هوا، ابتدا حجم فضای کمابیش استوانه ایی از قوس بین آند و کاتد به مقدار 6.28×10^{-8} m^3 بدست می آید. از این رو، با جایگذاری مقدار توان الکتریکی ورودی به گاز برای تشکیل پلاسمای قوس و مقدار بدست آمده از جرم داریم:

$$P_e \Delta t = 2 \times 10^3 (w) \Delta t = 7.62 \times 10^{-5} (\Delta T) \quad (2)$$

بنابراین، رابطه (۳) افزایش دمای گاز درون قوس را بر حسب زمان اعمال توان نشان می دهد:

$$\Delta T (K) = 0.2622 \times 10^8 \Delta t \quad (3)$$

برای تخمین زمان، فرض کنیم این توان به صورت میانگین به شکل پیوسته به گاز اعمال شده و قوس پیوسته شکل می گیرد، بایستی زمانی را حساب کنیم که گاز در این استوانه بین آند و نازل شناور، در برابر این توان میانگین قرار دارد. در این صورت باید v ، سرعت جریان گاز را در عبور از طول این استوانه بدست آورد. از قانون برنولی رابطه (۴) را داریم:

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (4)$$

در حالی که، q فشار دینامیکی و با داشتن بیشینه فشار کمپرسور هوا 8 bar فشار کاری در محدوده $4-6$ bar است. این فشار در دو مرحله دچار کاهش می شود، یکی با افزایش طول شلنگ گاز حدود 2 متر تا رسیدن به سر نازل الکتروود، که در شرایط معمول و با فرض چسبندگی سیال و شارش پیوسته گاز، با نسبت دو برابر شدن طول شلنگ، فشار به نسبت $1/2$ کاهش می یابد. همچنین با داشتن قطر شلنگ گاز حدود 0.5 سانتی متر، کاهش فشار با تغییر قطر دهانه از شلنگ به نازل با قطر 2 میلی متر با ضریب 32 و معکوس نسبت قطر دهانه ها متناسب است [۱۲، ۱۳]. بدین ترتیب در مرحله اول فشار به $3-2$ bar کاهش و در مرحله دوم با نسبت قطر شلنگ به نازل به محدوده bar $0.25 - 0.37$ و در نهایت با داشتن طول استوانه قوس به اندازه 2 سانتی متر، سرعت گاز در نازل

بر اساس رابطه (۴) در محدوده $۷۸/۵ - ۶۴/۵$ m/s قرار می‌گیرد. از این رو، به صورت میانگین زمان Δt در محدوده $۲۵۰ - ۳۰۰$ μs خواهد بود. حال بر اساس رابطه (۳)، افزایش دمای گاز در محدوده $۶۵۰۰ - ۷۸۰۰$ درجه کلوین و بدین ترتیب دمای گاز در قوس الکتریکی، T_f نسبت به دمای اولیه آزمایشگاه به مقدار $T_i = 300$ (K)، به شکل زیر برآورد می‌شود.

$$T_f \sim 7000 - 8000 \text{ (K)}$$

در تایید دمای محاسبه شده گفتنی است، در فشار اتمسفری یا بالاتر، آهنگ تبادل انرژی بین ذرات در فرآیند برخورد های کشسان و ناکشسان یک تعادل موضعی ترمودینامیکی^۱ را بوجود می‌آورد (LTE). یعنی الکترون‌ها، یون‌ها و اتم‌های خنثی در ستون قوس الکتریکی در یک دما هستند. این شرایط در پلاسمایی با دمای ۸۰۰۰ درجه کلوین و چگالی الکترونی 10^{21} m^{-3} تا 10^{24} m^{-3} وجود دارد [۱۱]. در این شرایط مشخصات پلاسما با فشار و دما در هر نقطه از ستون قوس تعیین می‌گردد. هرچند در نزدیکی الکتروود، در نتیجه شدت بالای میدان الکتریکی و سرد شدن شدید یون‌ها و اتم‌های خنثی با هدایت‌پذیری حرارتی الکتروود، دیگر شرایط LTE غالب نیست.

با کوچکترین تغییر در فشار هوای ورودی و پارامترهای تخلیه الکتریکی، در چنین پلاسماهای ناپایداری، دمای شعله پلاسمایی تغییر قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت. در اینجا با توجه به مختصات سامانه و توان آن برآورد تقریبی از مرتبه دمای قوس حدوداً از ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ درجه کلوین می‌تواند متفاوت باشد. اگرچه تعیین دقیق دمای شعله به شکل موضعی، تنها با بیناب‌سنجی از شعله پلاسمایی امکان‌پذیر است. در حالی که، دمای محاسبه شده برای قوس بر پایه داده‌های بزرگ مقیاس^۲ فشار و توان ورودی به گاز برای فضای کوچک قوس بین آند و کاتد، بدست آمده است.

در حقیقت، انرژی لازم برای یونش گاز نیز با تقریب خوبی به حساب نیامده است. چرا که، اگر بخواهیم دمای قوس حقیقی را برآورد کنیم، بایستی انرژی مصرفی یونش را برای تعداد مولکول‌های نیتروژن (غالب در هوا) موجود در حجم فضای بین دو الکتروود حساب و از مقدار کل انرژی ورودی کم کنیم. انرژی یونش اولیه برای مولکول نیتروژن $\epsilon_i = ۱۵.۳ \text{ kJ/mol}$ (برای نیتروژن اتمی حدود ۱۴.۰۲ kJ/mol) است. همچنین $1 \text{ liter} = 10^{-3} \text{ m}^3$ و حجم فضای بین الکتروودها معادل $6.28 \times 10^{-5} \text{ liter}$ و همچنین حجم مورد نظر معادل $2.8 \times 10^{-6} \text{ mol}$ مول غالب نیتروژن و انرژی لازم برای یونش مرتبه اول کامل مول موجود در این حجم، $۴/۲ \text{ J}$ محاسبه می‌شود.

^۱ Local Thermodynamic Equilibrium (LTE)

^۲ Macroscopic



سهم زیادی از این انرژی یونیزاسیون کمابیش با سامانه پیش یونش بین آند و نازل شناور تامین می‌شود. پتانسیل یونش و جریان تقریبی بین آند و نازل شناور به مقدار 30 kV و جریانی در حد میلی آمپر یا کمتر نیز، عمده انرژی برای یونش اولیه را تامین می‌کند. از این رو، برای یونش کامل نیز، سهم ناچیزی از انرژی الکتریکی اصلی، مصرف می‌شود و سهم اصلی انرژی ورودی در تبادل انرژی از الکترون‌ها به اتم‌ها و یون‌های گاز و گرمایش آن‌ها خواهد بود. از این رو، توان الکتریکی اصلی 2 kW بین آند و کاتد، در زمان کمینه حدود $250 \mu\text{s}$ با انرژی کل ورودی $0/5$ ژول با تقریب صرف گرمایش اتم‌ها یا یون‌ها در پلاسمای موجود و دیگر پدیده‌های کوچک مقیاس^۱ می‌شود.

۱.۲ رهیافت انرژی جنبشی

اگر با رهیافت انرژی جنبشی، تسهیم انرژی به تک تک ذرات و در نهایت دمای ذرات (یون، اتم و ملکول) را بدست آوریم، تعداد مول در حجم را از قبل و تعداد ذره در هر مول گاز (هوا) را بر پایه عدد آووگادرو داریم. از این رو، تعداد کل ذرات در حجم مورد نظر 1.68×10^{18} ذره و سهم انرژی هر ذره معادل $1/8 \text{ eV}$ محاسبه می‌شود. اگر این انرژی را بر پایه انرژی جنبشی در سه درجه آزادی معادل انرژی حرارتی $3/2 \text{ kT}$ (k ثابت بولتزمن) فرض کنیم، دمای هر ذره برحسب الکترون ولت و کلونین به ترتیب $14000 \text{ K} \sim 1/2 \text{ eV}$ برآورد می‌شود. این نتیجه، هم از نظر مرتبه مقداری با مقادیر بزرگ مقیاس حاصل، قابل مقایسه است و هم نسبت روابط ساده فیزیک بزرگ مقیاس و نظریه جنبشی ذرات را تایید می‌کند.

بی‌گمان تمام انرژی $0/5$ ژول به انرژی جنبشی تک تک ذرات در پلاسمای قوس منتقل نمی‌شود و بخش زیادی سهم گرمایش دیواره الکترودها، اتلاف الکتریکی ناشی از جریان‌های ناشی در الکترودها و پدیده‌های کوچک مقیاس دیگر می‌شود. از این رو، با همان دمایی که به شکل بزرگ مقیاس حدود 7000 درجه کلونین برای قوس الکتریکی بدست آوردیم، می‌توان گفت کمابیش 50% از کل انرژی ورودی بین ذرات گاز تقسیم شده و نصف دیگر با پدیده‌های اتلافی از دست رفته است.

البته دمای شعله پلاسمایی بیرون مشعل نیز با شارش گاز هوا، سرد شده و با خروج از دهانه آند، در صورت داشتن یک پلاسمای برخوردی و تعادلی گرم، با یک حدس خوش بینانه می‌تواند 20 تا 50 درصد کمتر از دمای قوس باشد. این حدس را می‌توان با بیناب‌سنجی از شعله پلاسمایی تایید کرد. دمای محاسباتی از قوس، مبنایی برای طراحی دقیق الکترودها، نازل شناور و فاصله آن‌ها از هم و نیز

¹ Microscopic

فشار جریان هوا یا گاز ورودی خواهد بود تا کارایی دمایی مشعل نیز بدست آید. اگر انرژی قوس پلاسمایی با هماهنگی خوبی نسبت به فشار هوا یا شار گاز بین دو الکترود و طراحی هندسی مناسب الکترودها (آند، نازل شناور و کاتد) همراه باشد، بایستی این انرژی به خوبی به شعله پلاسمایی انتقال یابد و در خروجی، دمای بالای شعله نیز با تقریب یک پلاسمای گرم و تعادلی، درصد خوبی از دمای قوس باشد. در دو بخش بعدی، بهره این انتقال انرژی به شعله پلاسمایی تحلیل و بر اساس آن دمای محفظه محاسبه و با دمای اندازه‌گیری شده مقایسه خواهد شد.

۳. ترمودینامیک حاکم بر محفظه زباله‌سوز

شکل (۵)، محفظه اصلی زباله‌سوز (استوانه بزرگ) به حجم ۶۰ لیتر روی چهارپایه و استوانه باریک‌تر در قسمت بالایی، مجرای ورود زباله و از قسمت بالای آن، مجرای تخلیه دود را نشان می‌دهد. محفظه زباله‌سوز از دو راه گرم می‌شود. یکی با شعله مشعل که از قسمت میانی دیواره جانبی وارد محفظه می‌شود. دیگری، المنت‌های حرارتی کف و دیواره جانبی که در داخل استوانه محفظه جاسازی شده است. در شکل (۶) تنها المنت کف محفظه نشان داده شده است و المنت دیگر در دیواره جانبی استوانه جای گرفته است. در حقیقت منظور دیگر المنت‌های حرارتی، گرم نگه‌داشتن محفظه برای جاری شدن احتمالی مواد باقیمانده در کف محفظه از راه مجراهای ایجاد شده به خارج نیز هست.



شکل ۵ محفظه زباله‌سوز، سامانه خروج گاز و تزریق زباله.

توان الکتریکی بدست آمده از دو المنت یا مقاومت حرارتی، به شکل مستقیم صرف تولید انرژی گرمایی می‌شود. توان الکتریکی المنت زیرین محفظه، ۴ kW و با داشتن رسانش سیمان‌سوز



روی آن، میزان توان حرارتی به داخل محفظه با نسبت ۷۰٪ و المنت دیواره جانبی نیز ۳ kW و با احتساب ضریب رسانش مربوطه، با ضریب ۴۰٪ (هر دو درصد به شکل تجربی تخمین زده شده است) به ترتیب مقدار ۲/۸ kW و ۱/۲ kW اندازه گیری و روی هم ۴ kW محاسبه شده است.



شکل ۶ نمای از بالای محفظه و المنت حرارتی کف آن.

شکل (۷)، نمایی از شعله پلاسمايي مشعل حدود ۵ سانتی متر خروجی از آند و منبع تغذیه دستگاه را نشان می دهد. دمای محفظه با روشن بودن المنت های حرارتی و مشعل پلاسمايي، پس از حدود ده ثانیه، حدود ۹۲۰ درجه سانتی گراد یا ۱۱۹۳ درجه کلوین با ترموکوپل اندازه گیری شد و به دمای بیشینه و کمابیش پایدار رسید. در دو بخش بعد، این دمای اندازه گیری با دمای محاسباتی از روش تحلیل ترمودینامیکی مقایسه خواهد شد.



شکل ۷ شعله پلاسمايي مشعل و منبع تغذیه.

۱.۳ رهیافت اول، فرآیند بی دررو: محاسبه دمای محفظه

حجم مفید داخلی محفظه حدود ۶۰ لیتر یا $60 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ است. این حجم در فشار اتمسفر با هوا پر شده است. با داشتن چگالی هوا مقدار جرم موجود در محفظه مشخص است. همچنین، با داشتن ظرفیت گرمایی حرارتی هوا، مقدار انرژی در واحد زمان یا توان گرمایی تخلیه شده در محفظه

مشخص می‌باشد. با این شرایط، افزایش دما در یک فرآیند بی‌دررو بدون فرض اتلاف، محاسبه خواهد شد.

کل توان گرمایی ورودی P_{tot} به محفظه ناشی از توان دو المنت حرارتی P_{e1} و P_{e2} و مشعل پلاسمایی ($P_p = 2 \text{ kW}$) بر اساس محاسبه زیر بدست می‌آید.

$$P_{tot} = P_p + P_{e1} + P_{e2} = 6 \text{ (kW)} \quad (5)$$

دوباره از قانون ترمودینامیک (رابطه (۱))، برای جرم m با ظرفیت گرمایی c و افزایش دمای ΔT ، میزان انرژی وارد به محفظه Q بر واحد زمان یا توان حرارتی ورودی به سامانه بر اساس رابطه زیر با افزایش دما متناسب است:

$$6 \text{ kW} = 72.86 \Delta T \quad (6)$$

از این رو، میزان افزایش دما بر واحد زمان $\Delta T = 83 \text{ (K)}$ محاسبه و دمای اولیه، دمای آزمایشگاه در شرایط متعارفی ($T_i = 300 \text{ K}$) است. در این صورت، دمای محفظه در حالت بیشینه پس از ده ثانیه حدود 1230 درجه کلون خواهد بود و کمابیش ثابت می‌ماند. در این زمان با روشن بودن مشعل و المنت‌ها، این محاسبه با اندازه‌گیری سازگاری خوبی نشان می‌دهد. همانگونه که در بالا نیز اشاره شد، با اصلاح طراحی هندسی الکترودها و سرعت جریان گاز هوا می‌توان بهره دمای مشعل را بالا برد تا به پلاسمای گرم و تعادلی نزدیک‌تر و بدین ترتیب دمای محفظه بالاتر رود.

۲.۳ رهیافت دوم، فرآیند همدمای محاسبه دمای محفظه بر پایه اتلاف حرارتی دیواره جانبی

در حقیقت، مطلب بخش ۳.۱ یک محاسبه انرژی گرمایش در فرآیند بی‌دررو تا زمان ده ثانیه بود. تمام فرضیات با داشتن منبع گرمایی بدون در نظر گرفتن اتلاف حرارتی در زمان رسیدن به بیشینه دمایی، برای برقراری قانون اول ترمودینامیک آورده شده بود. در صورتی که در روش دیگر، فرض بر این است که مشعل پیوسته کار می‌کند و با اتلاف خروجی ناشی از رسانش در تعادل است. از این رو، کفایت معادلات انتقال حرارت، مستقل از زمان و بر اساس اتلاف ناشی از رسانش محفظه در نظر گرفته شود. همچنین، دما در حالت تعادلی در زمان بینهایت فیزیکی و بر اساس شار گرمایی ورودی و اتلاف ناشی از رسانش در یک فرآیند همدمای حساب شود. اتلاف، به این دلیل که جریان گرما بیشتر به سمت بالاست و برای کف محفظه ناچیز است، با تقریب خوبی از دیواره جانبی محفظه در نظر گرفته شده است. قسمت خروجی دود هم اگر چه با شارش گاز گرم به سمت بالا همراه است و اتلاف می‌تواند قابل ملاحظه باشد ولی با افزودن ماده سوختنی و انرژی گرمایی بدست آمده



از آن سبب جبران اتلاف به شکل کیفی می شود و در اینجا از انرژی ماده سوختنی صرف نظر شده است.

در رهیافت دوم، بر پایه مقدار رسانش گرمایی موثر از دیواره جانبی، پس از رسیدن به تعادل حرارتی، دمای خارجی بدنه T_{out} به حدود 100 درجه سانتی گراد یا 373 درجه کلون می رسد. با داشتن رابطه شار گرمایی و ضریب رسانش سیمان نسوز محفظه، دمای درون محفظه، T_{in} نیز بر اساس رابطه (۷) محاسبه می گردد.

$$dP_{tot}/dA = \phi = -k\nabla T \quad (7)$$

و برای گرادیان دما در تقارن استوانه ای داریم:

$$\nabla T = dT/dr; \quad \Delta T = T_{in} - T_{out} \quad (8)$$

در این رابطه، ϕ شار گرمایی در واحد Wm^{-2} و dA المان سطح برای سطح جانبی، بر پایه طول استوانه محفظه به اندازه $L = 50 \text{ cm}$ و قطر آن به اندازه 45 cm برای مختصات شعاعی استوانه r قابل محاسبه است. اتلاف حرارتی تنها از دیواره جانبی برای ضخامت سیمان نسوز در راستای شعاعی $\Delta r_d = 4.5 \text{ cm}$ در نظر گرفته شده و از شعاع داخلی عایق نسوز تا شعاع خارجی آن، یعنی $\Delta r_d = r_{out} - r_{in}$ ، محاسبه می شود. برای بتن (سیمان و ماسه) این ضریب 0.8 در دمای 300 درجه سانتی گراد است [۱۴]. ضریب رسانش k برای سیمان نسوز (RASACAST A-18) از برند راساکست با ترکیب 94% آلومینا (Al_2O_3)، در دمای بالا، کمتر و حدود $(Wm^{-1}K^{-1})$ $0.5 - 0.3$ تخمین زده می شود [۱۵]. اتلاف حرارتی یک بعدی و برای سطح جانبی در تقارن استوانه ای فرض می شود. برای طول استوانه و مختصات شعاعی ضخامت لایه عایق، آهنگ اتلاف به صورت رابطه (۹) است:

$$\dot{Q} = -kA dT/dr = -k2\pi rL dT/dr \quad (9)$$

از انتقال نصف تا کل توان الکتریکی و با احتساب توان المنت های گرمایی، توان کل ورودی به محفظه $5-6 \text{ kW}$ و با فرض اینکه انرژی پلاسمای شعله با برخورد ذرات و گسیل تابشی، کاملاً به انرژی گرمایی در محفظه تبدیل شود، شار گرمایی درون محفظه در حالت تعادل همدمای به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\dot{Q} = (5-6) \times 10^3 \text{ W} = 8.95 \Delta T \quad (10)$$

بنابراین دمای داخل محفظه،

$$T_{in} \sim 900 - 1000 \text{ (K)}$$

این محاسبه تقریبی و بزرگ مقیاس از دمای محفظه در فرآیند همدما، با مقدار بدست آمده در فرآیند بی‌دررو و مقدار اندازه‌گیری شده با ترموکوپل قابل مقایسه و سازگار است. دقت داریم که ارزش این محاسبات برای تخمین دمای محفظه زباله‌سوز ضروری است تا در طراحی محفظه و مشعل برای رسیدن به دمای مناسب، پارامترهای مهم در نظر گرفته شود. در حقیقت، با یک مشعل طراحی شده در ابعاد مشخص، دمای قوس الکتریکی بین آند و کاتد، حدود ۷۰۰۰ درجه کلوین و مقدار تخمینی دمای شعله پلاسمایی خروجی از روی بیناب سنجی در مطالعه‌ای دیگر حدود ۴۰۰۰ درجه کلوین اندازه‌گیری شده و تنها برای مقایسه به همین عدد بسنده شده است. البته منابعی در شرایط نزدیک به شرایط کاری ما حدود این مقدار را تایید می‌کنند [۱۱]. از آنجا که بحث بیناب‌نمایی و جزئیات آن خارج از حوصله این مقاله است، نتایج پژوهشی و جزئیات آن برای مقاله دیگر در حال آماده‌سازی است.

دمای اندازه‌گیری شده در شرایط پایدار، برای محفظه‌ایی با حجم ۶۰ لیتر با توجه به توان الکتریکی المنت‌های گرمایی به اندازه ۴ کیلووات و توان ورودی مشعل ۲ کیلووات، دمایی حدود ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه کلوین را داخل محفظه فراهم می‌کند. این تحلیل، اندازه‌گیری و محاسبات، نقشه راه مناسب را برای بهینه‌سازی در طراحی مشعل و محفظه حرارتی را فراهم می‌سازد.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج اولیه از ساخت و راه‌اندازی مشعل طراحی شده در گزارش علمی فنی از یک پروژه پژوهشی و یک مقاله به عنوان خروجی قابل انتظار از پروژه، ارائه شده است [۱۶ و ۱۷]. بنابراین در مقاله حاضر پس از یک مقدمه مختصر در باره سامانه زباله سوز پلاسمایی، برای رسیدن به اهداف پژوهشی بالاتر در طراحی و بحث علمی، همراه با انجام محاسبات تحلیلی و دقیق از زوایای دیگر، با استفاده از یک رهیافت و نگرش جدید به تحلیل ترمودینامیکی سامانه مشعل و تخمین دمای آن و محفظه پرداخته شده است. در بخش دوم این مقاله، به روش تحلیلی و قوانین ترمودینامیکی و سیالی، دمای قوس الکتریکی مشعل در محدوده ۸۰۰۰-۷۰۰۰ درجه کلوین محاسبه شد. البته یادآوری شد که این دمای محاسباتی که با شارش گاز سرد یا خنک کننده هوا که نقش ایجاد شعله پلاسمایی را نیز ایفا می‌کند، همراه است و به خودی خود دمای شعله پلاسمایی پایین‌تر از این مقدار خواهد بود. پیش‌بینی می‌شود دمای شعله کمتر و به حدود ۴۰۰۰ درجه کلوین برسد که این مقدار را می‌توان با روش بیناب‌سنجی دقیق از پلازما تایید کرد. البته نتایج بیناب‌سنجی از شعله پلاسمایی با تایید همین محدوده دمایی، به شکل مستقل در گزارش دیگری برای چاپ آماده شده است. در بخش سوم،



مقدار دمای محفظه با استفاده از ترموکوپل به مقدار 1193 K اندازه گیری شد. همچنین با دو رهیافت تحلیلی و محاسباتی جداگانه، اول انرژی انباشت در توان $1-2\text{ kW}$ و روشن بودن المنت های حرارتی در محفظه زیاله سوز و دستیابی به دمای بیشینه محفظه پس از زمان حدود ده ثانیه، در یک فرآیند بی دررور، دما به مقدار 1230 K رسید. در رهیافت دوم اتلاف ناشی از رسانش در حالت تعادل یعنی در فرآیند همدم، در زمان طولانی دمای محفظه تا حدود $1000-900\text{ K}$ تخمین زده شد و نتایج سازگاری خوبی را نشان می دهند. تخمین دمای قوس الکتریکی بین الکترودها حدود 7000 درجه کلوین و بهره انتقال این انرژی گرمایی به شعله پلاسمایی و برآورد دمای شعله حدود 4000 درجه کلوین در یک کار جداگانه و مستقل، و رسیدن دمای محفظه 60 لیتری با چنین مشعلی در شرایط پایدار به حدود 1000 درجه کلوین، می تواند محک و معیار خوبی برای طراحی دقیق تر الکترودها و میزان شارش گاز باشد که باید برای هدف آینده طرح در استفاده از این گونه مشعل در سامانه های زیاله سوز مورد توجه قرار گیرد.

۵. تقدیر و تشکر

از همکاران در پروژه زیاله سوز که با یاری آنان داده های اولیه برای استفاده در این مقاله بدست آمد و همچنین از آقایان دکتر داود ایرجی (رئیس) و دکتر چاپار رسولی در پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته ای سپاسگزاری می نمایم.

منابع

- [1] Pang S., Fuel Flexible Energy Generation, Elsevier, Solid, Liquid and Gaseous Fuels, 241-269, 2016, <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-378-2.00009-2>
- [2] Ducharme C., Technical and economic analysis of Plasma-assisted Waste-to Energy processes, M.Sc. thesis, Columbia University, USA, 2010.
- [3] Mączka T., Śliwka E., Wnukowski M., Plasma gasification of waste plastics, Journal of Ecological Engineering, **14**, No. 1, 33-39, 2013, <https://doi.org/10.5604/2081139X.1031534>
- [4] Ghorui S., Sahasrabudhe S. N., and Das A. K., Current transfer in dc non-transferred arc plasma torches, J. Phys. D: Appl. Phys, **43**, 245201 (18pp), 2010, <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/24/24520>
- [5] Goyal V., Ravi G., Bandyopadhyay P., Banerjee S., Yugesh V., and Mukherjee S., Study of dynamical behavior of the plasma in a dc non-transferred plasma torch using fast imaging, PHYSICS OF PLASMAS, **24**, 033506, 2017, <https://doi.org/10.1063/1.4977914>
- [6] Guo Z., Yin S., Liao H., Gu S., Three-dimensional simulation of an argon-hydrogen DC non-transferred arc plasma torch, International Journal of Heat and Mass Transfer, **80**, 644-652, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.059>



- [7] Bernardi D., Colombo V., Ghedini E., Mentrelli A., Three-dimensional modelling of inductively coupled plasma torches, *Eur Phys J D*, **22**, 119–125, 2003, <https://doi.org/10.1140/epjd/e2002-00233-9>
- [8] Bernardi D., Colombo V., Ghedini E., Mentrelli A., Trombetti T., 3-D numerical simulation of fully-coupled particle heating in ICPTs, *Eur Phys J D*, **28**, 423–433, 2004, <https://doi.org/10.1140/epjd/e2004-00012-8>
- [9] Tiwari N., Bhandari S., and Ghoru S., Stability and structures in atmospheric pressure DC non-transferred arc plasma jets of argon, nitrogen, and air, *Physics of Plasmas*, **25**, 072103, 2018, <https://doi.org/10.1063/1.5034397>
- [10] He-Ping L. and Xi C., Three-dimensional modelling of the flow and heat transfer in a laminar non-transferred arc plasma torch, *Chin. Phys. Soc.*, 1009-1963/2002/11(01)/0044-06, **11(1)**, 2002. <https://doi.org/10.1088/1009-1963/11/1/310>
- [11] Fauchais P. L., Heberlein J. V. R., and Boulos M. I., Thermal Spray Fundamentals: From Powder to Part, *Springer Science & Business Media*, 1-15. 2014, <https://neutrium.net/fluid-flow/pressure-loss-in-pipe/>
- [12] <https://www.pipeflowcalculations.com/pipe-valve-fitting-flow/flow-in-pipes.xhtml>, 2020
- [13] Young H. D., An edition of university physics, 7th Ed., *Addison Wesley*, 1992.
- [14] https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_thermal_conductivities, 2023
- [15] Khaleghian Gh., Beigmohammadi N., Morshedian N., Nohekhan M., Rezaeefard B., Design and construction of a laboratory plasma gasification system for municipal solid waste, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **45**, issue 1, No. 107, April 2024, <https://doi.org/10.24200/nst.2023.1237.1805>
- [16] Technical report project with code: PRI-F2-99-003, plasma and fusion research school, NSTRI, P.O. Box: 14399-51113, Tehran Iran.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

