



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۱۱-۹ بهمن ۱۳۹۷



اثر پلاسمای سرد فشار اتمسفری در اصلاح آلاینده های NO_x

هما نظری^۱، ساعد جعفری^۲، مهدی عابدی ورکی^۳

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گیلان، رشت، ایران^۱ Homa.Nazari_3347@yahoo.com

دانشیار گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گیلان، رشت، ایران^۲ Sjafari@guilan.ac.ir

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گیلان، رشت، ایران^۳ [M_abedi-](mailto:M_abedi-varaki@phd.guilan.ac.ir)

varaki@phd.guilan.ac.ir

چکیده - در این مقاله یک مطالعه ی نظری بر حذف آلاینده ی NO_x توسط تکنولوژی پلاسمای غیرحرارتی، به ویژه تخلیه ی سد دی الکتریک ارائه شده است. مدل یک بعدی، کاهش غلظت NO_2 و افزایش غلظت الکترون را به صورت تابعی از زمان نشان می دهد. آلاینده های هوا همچون اکسیدهای نیتروژن معمولاً در مناطقی که وسایل نقلیه و کارخانجات با استفاده از سوخت های فسیلی کار می کنند، وجود دارند.

کلیدواژه - پلاسمای غیرحرارتی، راکتور تخلیه ی سد دی الکتریک

The effect of Atmospheric pressure Non-Thermal plasma on treatment of NO_x pollutant

Homa Nazari¹, Saed Jafari², Mehdi Abedi Varaki³

¹Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Guilan, Rasht

Homa.Nazari_3347@yahoo.com

²Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Guilan, Rasht

Sjafari@guilan.ac.ir

³Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Guilan, Rasht

M_abedi-varaki@phd.guilan.ac.ir

Abstract- In this paper a theoretical study on NO_x removal by non-thermal plasma technology specifically a dielectric barrier discharge, is presented. The one-dimensional model showed a reduction of NO_2 concentration and increase in electron concentration as a function of time. Air pollutants such as oxides of nitrogen are commonly found in areas where vehicles and factories using fossil fuels are operating.

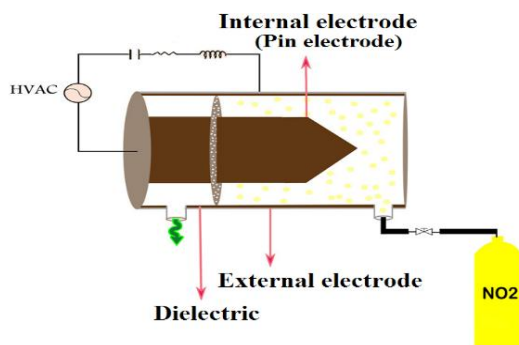
Keywords: Non-Thermal plasma, Dielectric barrier discharge reactor

مقدمه

در سال های اخیر تکنیک های مختلفی همچون، کاهش کاتالیستی انتخابی، سایش مرطوب، تابش های پرتو الکترونی، تخلیه ی سد دی الکتریک، و تخلیه ی کرونا ی پالسی، به منظور حذف آلاینده های خروجی از آگزوز موتورهای دیزلی، با درجات مختلف موفقیت، وارد شده اند. نگرانی عمده ی بسیاری از تکنیک ها، انرژی مورد نیاز برای حذف آلاینده ها بوده است، که این مطلب منجر به پیشرفت فناوری قوی یعنی پلاسمای غیر حرارتی شد. در پلاسمای غیر حرارتی، انرژی متوسط الکترون ها، به طور قابل توجهی بالاتر از یون ها و ذرات خنثی است، که این یک مزیت بزرگ در کاهش انرژی مورد نیاز برای حذف آلاینده ها است [۱]. پلاسما حالت چهارم ماده است، و گاز یونیزه شده ای است که انرژی کافی برای جداسازی الکترون ها از اتم ها و مولکول ها را فراهم می کند. انواع مختلفی از اکسیدهای نیتروژن در طبیعت وجود دارند. از جمله: N_2O ، NO ، NO_2 ، N_2O_5 ، NO_3 ، N_2O_4 ، عمده ترین اکسیدهای نیتروژن موجود در جو NO ، NO_2 ، N_2O است. اختصار ناکس به نیتریک اکسید، یا نیتروژن مونواکسید، و نیتروژن دی اکسید، اطلاق می شود. که از نقطه نظر فوتوشیمیایی، نیتروژن اکسید جدید نامیده می شود. نیتروژن اکسید هنگامی که سوخت در درجه حرارت بالا می سوزد، به وجود می آید. در میان شکل های مختلف NO_x ، نیتریک اکسید و نیتروژن دی اکسید سمی هستند. حدود ۹۵٪ از NO_x منتشر شده از فرآیندهای سوختن NO ، و ۵٪ NO_2 است. غلظت بالای NO_2 در فضاهای باز، بیماری های تنفسی و قلبی و اثرات منفی دیگر NO_x از جمله: مه دود فوتوشیمیایی، باران های اسیدی، گرمای جهانی، تشکیل فرآورده های سمی و... است. تکنیک پلاسمای غیرحرارتی، رویکرد خلاقانه ای برای این مشکلات ارائه داده است. برای بسیاری از برنامه های کاربردی به خصوص حذف غلظت های بسیار رقیق آلودگی هوا، رویکرد پلاسمای غیرحرارتی، به علت انتخاب انرژی و قابلیت آن برای حذف همزمان آلاینده های مختلف و همچنین مصرف کم انرژی و مقرون به صرفه بودن بسیار مناسب است.

روش بررسی

بخش های مختلف راکتور طراحی شده در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): راکتور تخلیه ی سد دی الکتریکی (DBD)

راکتور DBD به شکل یک سیلندر استوانه ای، به طول ۱۰۰ میلیمتر می باشد، که یک الکتروود سوزنی درمیانه ی آن متصل شده است. سطح داخلی الکتروود خارجی با لایه ی ۱،۵ میلیمتری از آلومینا به عنوان سد دی الکتریک پوشیده شده است. فاصله ی سد و الکتروود داخلی که محل تخلیه است ۲ میلی متر می باشد. به دلیل حضور سد دی الکتریک بین الکتروودها، انجام عمل تخلیه نیاز به منبع تغذیه ی ولتاژ بالا دارد. با عبور گاز از سطح دی الکتریک، الکتروودها میدان الکتریکی کافی را برای تولید پلاسما بین خود ایجاد می کنند. آند و کاتد هر دو به منبع تغذیه ولتاژ بالا متصل می گردند. طراحی پایه راکتور، شامل یک ورودی گاز به داخل راکتور است. الکتروودها هر دو از جنس فولاد می باشند. در این آزمایش دمای واکنش ها ۳۰۰ کلوین و فشار ۱ اتمسفر در نظر گرفته شده است. در حین حرکت گاز در امتداد محور دودکش، عملکرد منبع تغذیه ولتاژ بالا، منجر به تخلیه درخشان الکتریکی شده و تشکیل پلاسمای غیرحرارتی را سبب می شود. علاوه بر شکل گیری آسان پلاسما های پایدار و تخلیه ی یکنواخت در راکتور تخلیه ی سد دی الکتریک، مزایای دیگری از قبیل مقیاس پذیری، اثر بخشی و هزینه ی عملیاتی پایین، منجر شده است، محققان استفاده از این نوع راکتور را به راکتورهای دیگر ترجیح دهند [۲]. معادلات تعادلی برای

$$\begin{aligned} R_e &= -K_1 n_e n_{NO_2^+} + K_2 n_{O^-} n_{NO} - K_4 n_e n_{O_2} + K_6 n_{N_2} n_e + \alpha |V_d| n_e \\ R_{NO_2^+} &= -K_1 n_e n_{NO_2^+} + K_5 n_{N_2^+} n_{NO_2} \\ R_{NO} &= K_1 n_e n_{NO_2^+} - K_2 n_{O^-} n_{NO} + K_3 n_{O^-} n_{NO_2} \\ R_{O^-} &= -K_2 n_{O^-} n_{NO} + K_4 n_e n_{O_2} \\ R_{NO_2} &= -K_3 n_{O^-} n_{NO_2} - K_5 n_{N_2^+} n_{NO_2} + K_2 n_{O^-} n_{NO} \\ R_{O_2} &= -K_4 n_e n_{O_2} + K_3 n_{O^-} n_{NO_2} \\ R_{N_2^+} &= -K_5 n_{N_2^+} n_{NO_2} + K_6 n_e n_{N_2} \\ R_{N_2} &= -K_6 n_{N_2} n_e + K_5 n_{NO_2} n_{N_2^+} \end{aligned}$$

الکترودها، به منظور تغییر جهت سریع میدان الکتریکی شعاعی، به فرکانس منبع تغذیه متصل شده‌اند. پتانسیل اعمالی به صورت $V = V_0(2\pi t\nu)$ است، که در آن $V_0 = 60 \text{ kV}$ دامنه پتانسیل است. و $\nu = 60 \text{ Hz}$ فرکانس منبع تغذیه می‌باشد. عملکرد میدان الکتریکی خارجی بین دو الکتروده داخلی و خارجی، منجر به یونیزاسیون در داخل راکتور و شکل‌گیری تخلیه پلاسما می‌شود. بنابراین ضریب اولیه‌ی تاوانسند $\alpha(E/p)$ و سرعت سوق الکترون‌ها در معادله‌ای به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$V_d = \mu_e E \quad \frac{\alpha}{p} = A \exp(BP/E)$$

که A و B کمیت‌های ثابت می‌باشند. μ_e تحرک‌پذیری الکترون و V_i پتانسیل یونیزاسیون می‌باشد، که در جدول (۲) ارائه شده‌اند.

جدول (۲) - داده‌های مدل شبیه‌سازی شده

$0.134 \text{ m}^2/\text{V.s}$	تحرک پذیری الکترون (μ_e)
2.311	کمیت ثابت (A)
119.2	کمیت ثابت (B)
300 K	دما (T)
60 Hz	فرکانس منبع تغذیه (ν)
60 kV	دامنه پتانسیل (V_0)
10^8 m^{-3}	چگالی اولیه گونه‌ها
10^6 m^{-3}	چگالی اولیه الکترون‌ها

گونه‌های مختلف، همچون ذرات خنثی، رادیکال‌ها، یون‌ها و ... توسط رابطه‌ی (۱) نوشته می‌شود [۳].

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} - D_\alpha \nabla^2 n_i = R_i \quad (1)$$

D_α ضریب پخش دوقطبی است، و R_i سرعت واکنش برای آمین گونه است. شکل‌گیری NO_2 در سه مسیر ممکن رخ می‌دهد. در ابتدا الکترون از تخلیه‌ی الکتریکی در محیط راکتور تولید می‌شود. در مرحله‌ی دوم نیتروژن اتمی تولید می‌شود. و در آخر اکسیژن اتمی از تجزیه‌ی تولید می‌شود. بنابراین بر اساس واکنش‌های شیمیایی ارائه شده، معادلات پیوستگی برای الکترون و سایر گونه‌های باردار به صورت زیر می‌باشد،

جدول (۱) - واکنش‌های گاز NO_2 در حضور پلاسمای غیرحرارتی

$e + NO_2^+ \xrightarrow{K_1} NO + O$	$K_1 = 5.49 \times 10^{-36}$
$O^- + NO \xrightarrow{K_2} NO_2 + e$	$K_2 = 8.3 \times 10^{-40}$
$O + NO_2 \xrightarrow{K_3} NO + O_2$	$K_3 = 9.6 \times 10^{-18}$
$e + O_2 \xrightarrow{K_4} O^- + O$	$K_4 = 5.27 \times 10^{-17}$
$N_2^+ + NO_2 \xrightarrow{K_5} NO_2^+ + N_2$	$K_5 = 0.55 \times 10^{-39}$
$e + N_2 \xrightarrow{K_6} N_2^+ + e + e$	$K_6 = 6.66 \times 10^{-17}$

که K ثابت واکنش می‌باشد و یکای آن $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ است.

$$\begin{aligned} \frac{dn_{NO_2^+}}{dt} &= R_{NO_2^+} & \frac{dn_O}{dt} &= R_O & \frac{dn_{NO_2}}{dt} &= R_{NO_2} \\ \frac{dn_{N_2^+}}{dt} &= R_{N_2^+} & \frac{dn_{NO}}{dt} &= R_{NO} & \frac{dn_{N_2}}{dt} &= R_{N_2} \\ \frac{dn_{O_2}}{dt} &= R_{O_2} & \frac{dn_{O^-}}{dt} &= R_{O^-} & \frac{dn_e}{dt} &= R_e + \alpha |V_d| n_e \end{aligned}$$

معادله‌ی $R_\alpha = K_i n_\alpha n_\beta$ ، که در آن چگالی الکترون به صورت معادله‌ی (۲) نوشته می‌شود.

$$\frac{dn_e}{dt} = R_e + \alpha |V_d| n_e \quad (2)$$

V_d سرعت سوق و α ضریب یونیزاسیون اولیه می‌باشد.

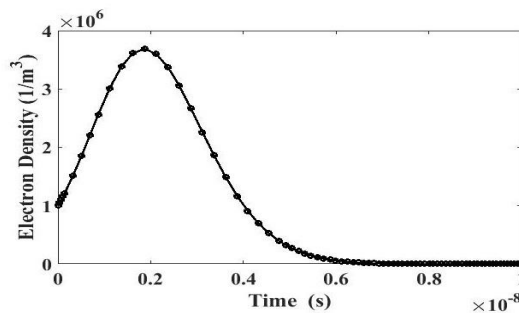
آن‌ها نشان دادند که با استفاده از این روش می‌توان گاز نیتروژن دی‌اکسید را به دو گاز بی‌ضرر اکسیژن و نیتروژن تبدیل کرد و به این طریق این آلاینده را از چرخه طبیعت حذف کرد. نتایج به دست آمده صحت روش استفاده شده را نشان می‌دهد که با یافته‌ی این محققان مطابقت دارد. همچنین افزودن کاتالیست یا جاذب کاهش نهایی را افزایش می‌دهد. [۲]

نتایج

مشاهده شده است هنگامی که ولتاژ بالا به الکتروود خارجی اعمال می‌شود، و گاف تخلیه‌ی کوچک برای راکتور انتخاب می‌شود، ولتاژ شکست کوچکتر مورد نیاز است. بنابراین با همان ولتاژ بالا حذف NO_2 بهتری صورت می‌گیرد. به علاوه با افزایش قطر الکتروود داخلی، به سبب کوچک شدن گاف تخلیه، راندمان حذف NO_2 افزایش می‌یابد. همچنین با آغاز تخلیه‌ی الکتریکی در داخل راکتور، غلظت مولکول‌های NO_2 بعد از یک افزایش شدید، کاهش پیدا می‌کند. این نتایج طبق بررسی‌های جامع ونگ و همکارانش در خصوص اثرات ساختاری راکتور تخلیه‌ی سد دی‌الکتریک بر روی حذف NO حاصل شده است. [۵]

مراجع

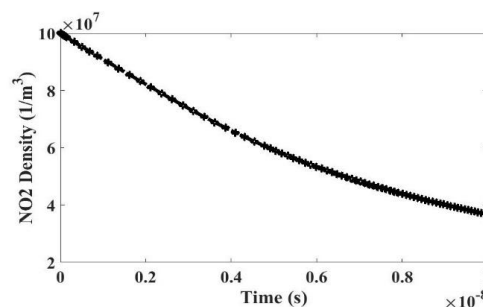
- [1] S. Mohapatro and B. Rajanikanth, "Studies on NOX removal from diesel engine exhaust using duct-type DBD reactor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, pp. 2489-2496, 2015.
- [2] P. Talebizadeh, M. Babaie, R. Brown, H. Rahimzadeh, Z. Ristovski, and M. Arai, "The role of non-thermal plasma technique in NOx treatment: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, pp. 886-901, 2014.
- [3] M. Abedi-Varaki, A. Ganjovi, F. Shojaei, and Z. Hassani, "A model based on equations of kinetics to study nitrogen dioxide behavior within a plasma discharge reactor," *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, vol. 13, p. 69, 2015.
- [4] B. Ramamurthi and D. J. Economou, "Pulsed-power plasma reactors: two-dimensional electropositive discharge simulation in a GEC reference cell," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 11, p. 324, 2002.
- [5] T. Wang, B.-M. Sun, H.-P. Xiao, J.-y. Zeng, E.-p. Duan, J. Xin, et al., "Effect of reactor structure in DBD for nonthermal plasma processing of NO in N₂ at ambient temperature," *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 32, pp. 1189-1201, 2012.



شکل (۲): نمودار تغییرات زمانی چگالی الکترون

در محیط راکتور نسبت به زمان.

این نمودار نشان می‌دهد هنگامی که میدان الکتریکی خارجی را در راستای شعاعی بین دو الکتروود خارجی و داخلی اعمال می‌کنیم، به سبب یونیزاسیون گاز پس‌زمینه و تشکیل پلاسما، چگالی الکترون افزایش پیدا می‌کند. این افزایش در لحظه‌ی ۰.۲ نانوثانیه به اوج می‌رسد. و از آن پس رشد الکترون به سبب واکنش با O_2 و NO_2^+ کاهش پیدا می‌کند. در این سیستم گاز یونیزه می‌شود و پلاسما تشکیل می‌گردد. رامامیورتاهی و همکارش، با شبیه سازی راکتور پلاسمایی توان پالسی، تغییرات چگالی الکترون را به دست آوردند که دست آورد آن‌ها با نتیجه‌ی کار ما مطابقت دارد [۴].



شکل (۳): نمودار تغییرات چگالی NO_2 نسبت به زمان.

نیتروژن دی‌اکسید NO_2 گازی سمی با بویی تند است. این گاز در دمای معمولی زرد و در دماهای بالاتر، به رنگ قهوه‌ای در می‌آید. نیتروژن دی‌اکسید از مهم‌ترین آلاینده‌های هوا است، و بر رشد گیاهان اثر منفی گلخانه‌ای دارد. با توجه به شکل (۳)، چگالی این گاز با گذشت زمان کاهش، و مطابق با هدف اصلی این راکتور، یعنی کاهش آلاینده‌ی سمی NO_2 است. اکوامارو و همکارانش، با استفاده از تخلیه‌ی تابان، در فشار کم به تجزیه‌ی گاز نیتروژن دی‌اکسید در هوا پرداختند.