بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

طیف سنجی نوری راکتور پلاسمای سرد کاهنده غلظت گازهای آلاینده و سمی NO_x

سعید جوادی آناقیزی[۱]، پویان طالبی زاده[۲]، شهریار میرپور[۱]، حسن رحیم زاده[۲] و حمیدرضا قمی[۱]

[۱]پژوهشکده لیزر و پلاسما دانشگاه شهید بهشتی تهران

[۲] دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران

چکیده - در این تحقیق با شبیه سازی سیستم گازی اکسیدهای نیتروژن خروجی از اگزوز موتورهای دیزل، به بررسی اثر جنس الکترود داخلی راکتور تخلیه سد دی الکتریک به منظور افزایش راندمان پاکسازی گازهای آلاینده و سمی اکسیدهای نیتروژن با استفاده از تکنولوژی پلاسمای سرد پرداخته می شود. سه جنس مختلف در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. نتایج اولیه حاکی از توانا بودن این سیستم در کاهش غلظت اکسیدهای نیتروژن بوده است. همچنین نتایج طیف سنجی نوری حاکی از آن است که راکتور با الکترود آلمینیوم در تولید بیشتر اتم های ناپایدار نیتروژن در محیط پلاسما و همچنین تقویت روابط شیمیایی منجر به کاهش گازهای آلاینده عملکرد بهتری را در قیاس با انرژی الکتریکی مصرفی راکتور ها دارا می باشد.

کلید واژه- اکسیدهای نیتروژن، پلاسمای سرد، راکتور تخلیه ی سد دی الکتریک، جنس الکترود، طیف سنجی نوری

The Optical Emission Spectroscopy of Non-thermal Plasma Reactor for NO_x Toxic Gas Reduction

Saeed Javadi Anaghizi[1], Pouyan Talebizadeh[2], Shahriyar Mirpour[1], Hasan Rahimzadeh[2], Hamid Ghomi[1]

[1] Laser and Plasma Research Institute, University of Shahid Beheshti,

[2] Department of mechanical engineering; Amirkabir University of Technology; Tehran; Iran

Abstract - In this paper, by simulating the nitrogen oxides (NOx) exhausted from diesel engines, the effect of electrode material in the dielectric barrier discharge reactor is studied in order to increase the NOx removal efficiency. Three different materials of the inner electrodes are examined. First, the results show the capability of this system to decrease the concentration of NOx in the exhaust gas. In addition, optical emission spectroscopy (OES) results show that the reactor with aluminum as the inner electrode material has more NOx removal efficiency with less power consumption than the other reactors due to more production of Nitrogen unstable atoms.

Keywords: Nitrogen oxides, Non-thermal plasma, Dielectric barrier discharge reactor, Electrode material, Optical emission spectroscopy

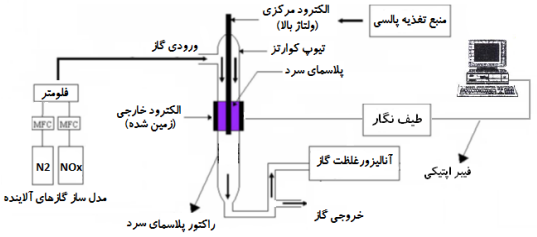
[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

۱- مقدمه

در سال های اخیر یکی از نگرانی های عمده بشر کاهش آلاینده های محیط زندگانی خویش بوده است. اکسید های نیتروژن (NOx) ناشی از سوختن سوخت های فسیلی در موتور های دیزل و نیروگاه های تولید برق به عنوان یکی از شاخص ترین آلاینده های هوا محسوب می شوند که از معایب آن می توان به باران های اسیدی، تخریب لایه اوزون و اختلال در سلامت افراد جامعه بشری اشاره کرد. یکی از راه های کاهش NOx استفاده از تکنولوژی پلاسمای سرد می باشد. عمدتا تخلیه الکتریکی که منجر به تولید پلاسمای سرد می شود ناشی از دسته ای از تخلیه های الکتریکی میکرو ثانیه با طول عمر کوتاه می باشد. این طول عمر کوتاه توسط یک منبع تغذیه ایجاد می شود که ولتاژ های بالا را بصورت پالس های بسیار کوتاه تولید می کنند [۱]. تخلیه الکتریکی نورانی شامل ذرات مختلف از جمله مقدار زیادی اتم های خنثی، یون های مثبت، الکترون ها و ذرات برانگیخته می باشد. یون های مثبت الکترود مرکزی را بمباران کرده و موجب گسیل الکترون ثانویه از سطح کاتد شده و این الکترون های پر انرژی وارد پلاسما شده و انواع مختلفی از برخوردها (مهمترین برخوردها منجر به یونیزاسیون یا برانگیختگی گاز های موجود در گاف گازی راکتور می شوند) را با ذرات داخل پلاسما انجام می دهند. ذرات تحریک شده توسط برخوردهای منجر به برانگیختگی، فوتون های منحصر به فردی تابش می کنندکه به وسیله ی طیف سنجی تابش اپتیکی تخلیه الکتریکی نورانی آشکارسازی می شوند. طول موج این فوتون ها نوع ماده و شدت طیف که نمایان گر تعداد فوتون ها است، چگالی آن نوع خاص از اتم ها را تعیین می کند. در این تحقیق، توانایی پلاسمای سرد تخلیه الکتریکی سد دی الکتریک (DBD) در کاهش غلظت گازهای آلاینده NOx مورد بررسی قرار خواهد گرفت و همچنین با طیف نگاری از راکتور پلاسمای سرد در شرایط متفاوت جنس الکترودهای مرکزی در شرایط ولتاژ اعمالی و فرکانس تکرار پالس گوناگون اثرات جنس مواد سازنده راکتورمورد مطالعه قرار می گیرد. لازم به ذکر است که جنس های متفاوت آلمینیوم، مس و استیل به عنوان رایج ترین اجناس در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته اند.

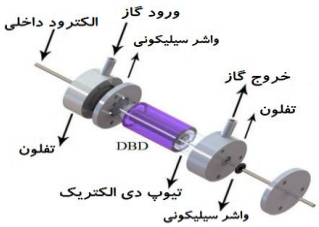
۲- چیدمان آزمایش

شکل (۱) چیدمان مورد استفاده در این آزمایش را نشان می دهد.



شکل ۱ : چیدمان آزمایش

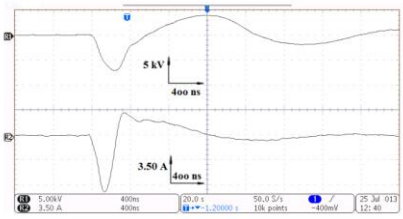
که شامل یک سیستم مدل ساز گازهای آلاینده NOx (شامل گازهای نیتروژن به همراه گازهای سمی NOx) و از راکتورهای استوانه ای پلاسمای سرد(DBD) ، که تنها تفاوت آنها در جنس الکترود داخلی می باشند، استفاده شد. این راکتورها که شامل یک تیوپ دی الکتریک (کوارتز) دارای قطر داخلی ۱۲ میلی متر و ضخامت ۱.۵ میلی متر که توسط یک توری ظریف و انعطاف پذیر جداره بیرونی آن پوشیده شده و به عنوان الکترود خارجی (زمین شده) تلقی می شود، الکترود های داخلی (ولتاژبالا) یک استوانه رسانا(آلومینیوم، مس و استیل) کاملا صیقلی و صاف شکل(۲) با طول مفید ۲۰ سانتی متر در داخل تیوپ قرار گرفته است.



شکل ۲ : راکتور استوانه ای پلاسمای سرد تخلیه الکتریکی سد دی الکتریک

جهت تامین انرژی الکتریکی برای ایجاد پلاسمای سرد (DBD) از یک منبع تغذیه پالسی ولتاژ بالا ساخته شده در مرکز تحقیقاتی که قابلیت تغییرات ولتاژ (۱-۱۵ کیلوولت) و فرکانس تکرار پالس (۱۰-۳۰ کیلوهرتز) استفاده شد شکل(۳) شکل موج ولتاژ و جریان الکتریکی تخلیه الکتریکی گذرنده بر راکتور در یک دوره تناوب می باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

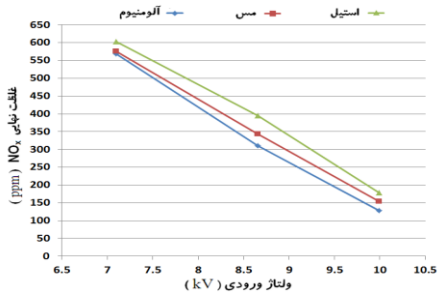


شکل ۳ : شکل موج اعمالی بر راکتور تخلیه سد دی الکتریک در ولتاژ ۱۱.۶۷ کیلوولت و فرکانس تکرار پالس ۱۹.۲۳ کیلوهرتز.

در نهایت یک دستگاه آنالیزور گازهای آلاینده AVL Di Gas 4000، برای نمایش کاهش غلظت گاز(NOx) و ثبت داده ها و ذخیره آنها در رایانه مورد استفاده قرار گرفته شد. در تمامی آزمایش ها غلظت ورودی گازهای آلاینده (NOx) ۷۲۰ppm ثابت بوده و به منظور مطالعه ی عوامل شیمیایی پلاسما از طیف سنجی اپتیکی Ocean Optics NIR-Visible،USB2000+(OES) استفاده شد.

۳- نتایج، بحث و بررسی

عمدتا واکنش هایی که در راکتور استوانه ای پلاسمای سرد تخلیه اکتریکی سد دی الکتریک منجر به کاهش غلظت گازهای آلاینده NOx می شوند ناشی از برخورد الکترون های آزاد ، یون ها، رادیکال ها و مولکول های ایجاد شده در راکتور بر اثر پلاسمای سرد میباشند.



شکل ۴ : درصد پاک سازی آلاینده ها بر حسب تغییرات ولتاژ اعمالی در فرکانس های تکرار پالس ثابت۱۶.۶۵کیلوهرتز

شکل (۴) نمایی از درصد کاهش گازهای آلاینده توسط راکتورها بر اساس افزایش ولتاژ اعمالی بر راکتورها در فرکانس تکرار پالس ۱۶.۶۵کیلوهرتز می باشد. با توجه به شکل با افزایش ولتاژ ورودی بر راکتورها میدان الکتریکی در گاف گازی افزایش یافته و تعداد الکترون های پر انرژی و رادیکال های آزاد و نرخ برخوردها در محیط بیشتر شده تشکیل شده و انرژی الکترونهای آزاد از طریق برخورد و یونزاسیون و بر انگیختگی مولکول های گازی N2 باعث تولید اتم های N و N2 (á) Singlet Meta stable States))می شوند که این اتم ها تاثیر بسزایی در کاهش غلظت آلاینده ها بر اساس روابط زیر دارا می باشند [۲].

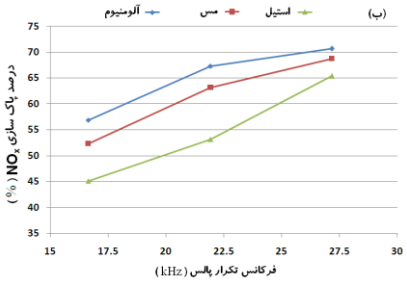
$$N_2(a') + NO \rightarrow N_2 + N + O \quad (۱)$$

$$N + NO \rightarrow N_2 + O \quad (۲)$$

$$NO_2 + O_3 \rightarrow NO_3 + O_2 \quad (۳)$$

$$NO_2 + NO_3 \rightarrow N_2O_5 \quad (۴)$$

شکل (۵) نمایی از درصد کاهش گازهای آلاینده توسط راکتورها بر اساس افزایش فرکانس تکرار پالس بر راکتورها در ولتاژهای اعمالی ثابت ۹.۹ کیلوولت بر راکتورها می باشد.

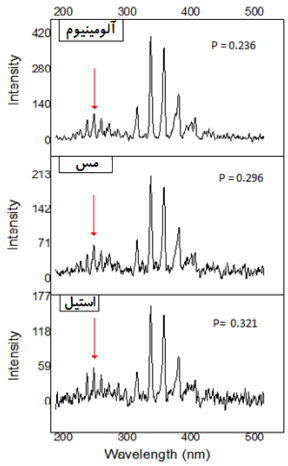


شکل ۵ : درصد پاک سازی آلاینده ها بر حسب تغییرات فرکانس های تکرار پالس در ولتاژ ورودی ثابت۹.۹ کیلوولت

با توجه به نتایج آزمایش های صورت گرفته در شکل بالا بر هر سه راکتور مشاهده می شود با افزایش فرکانس در یک ولتاژ مشخص درصد پاک سازی گاز آلاینده افزایش می یابد این امر حاکی از آن است که با افزایش فرکانس تکرار پالس نرخ ضربه پالس بر راکتور پلاسما افزایش یافته و به تبع منجر به افزایش اعمال توان الکتریکی بر تخلیه الکتریکی موجود در محیط پلاسما و نیز بر روی راکتور پلاسمای سرد (DBD) شده و درنتیجه احتمال برخوردهای موثر با اتم های گازهای آلاینده بیشتر شده و با کاهش چشم گیر غلظت گازهای آلاینده NOx روبه رو خواهیم بود از طرفی این روند پاک سازی با تغییر جنس الکترود داخلی و یا به عبارتی تغییر در ضریب الکترون های ثانویه (γ) الکترود داخلی محسوس تر شده است. ضریب گسیل الکترون های ثانویه (γ) بزرگ به معنای تولید بیشتر الکترو نهای پر انرژی و ماهیت پلاسمای بهتر را خواهیم داشت، ضریب گسیل الکترون های ثانویه (γ) برای آلومنیوم ۱.۵ و مس۱.۲۹ واستیل ۱.۲۴ می باشد [۳]. هنگام استفاده از آلومنیوم به عنوان جنس الکترود مرکزی به دلیل بزرگ بودن ضریب گسیل الکترون های ثانویه (γ)، تعداد الکترون های پر انرژی به نسبت مس و استیل بیشتر بوده و تعداد بیشتری از اتم های N و N2)

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

á) را در طی برخوردهای پیاپی خود با مولکول های نیتروژن موجود در محیط تخلیه الکتریکی تولید می کنند که این امر موجب قوی تر عمل کردن روابط فوق الذکر و به تبع بالا رفتن راندمان پاک سازی در راکتور می شود. شکل (۶) طیف های ثبت شده توسط طیف سنج نوری را در شرایط یکسان انرژی الکتریکی و و موضع یکسان قرارگیری فیبر اپتیکی در راکتورها را نمایش می دهد.



شکل(۶): طیف های ثبت شده توسط طیف سنج نوری را در ولتاژ ورودی ۸.۶۶ کیلوولت و فرکانس تکرار پالس ۱۹.۲۳ کیلوهرتز

جدول (۱) لیستی از طیف های منشره از اتم ها را در حضور ۷۲۰ppm از گازهای سمی و به همراه گاز نیتروژن نشان میدهد.

جدول(۱): لیستی از طیف های منشره از اتم های بر انگیخته شده از مولکول های گازهای موجود در راکتور کاهنده NOx

Species (system)	Transition	Peak Position (nm)
N2 second positive	$C^3\Pi \rightarrow B^3\Pi$	315.55 ; 336.65 ; 358.18 ; 380.59 ;
NO γ band	$A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$	236.9 ; 247.76 ; 259.56 ; 272.81

طیف های نشری مربوط به NOγ bands از طریق بر انگیختگی توسط اتم های ناپایدار N2 طبق روابط (۵ و۶) بدست می آیند [۴و۵].

$$N_2(a) + NO(X) \rightarrow N_2 + NO(a) \qquad (۵)$$

$$NO(a) \rightarrow NO(X) + h\nu(NO_\gamma\ band) \qquad (۶)$$

از طرفی برانگیختگی مولکول های نیتروژن از حالت پایدار توسط برخوردهای الکترونی طبق رابطه (۷) می باشد.

$$e + N_2(X_1\Sigma_g^+)_{v=0} \rightarrow N_2(C^3\pi_u)_{v'=0} + e \quad (\Delta E = 11ev) \qquad (۷)$$

با توجه به معادلات بلندترین پیک مربوط به N2 second positive در طول موج ۳۳۶.۶۹ نانومتر و بلندترین پیک مربوط به NOγ band در طول موج ۲۴۷.۷۶ (خط نشان در شکل ۶) برای هر سه الکترود مشاهده شد. شدت پیک های نیتروژن در راکتور با الکترود داخلی از جنس آلومنیوم به ترتیب بلندتراز مس و استیل است و حاکی از وجود اتم های نیتروژن بیشتری در محیط پلاسما و به تبع پاک سازی بیشتر در این راکتور می باشد

با تعریف پارامتر P=(NOγ band) / (N2 second positive) که حاکی از نسبت نسبت اتم های گاز آلاینده به شدت اتم های نیتروژن ناپایدار در محیط می باشد (با کالیبراسیون طیف ها ی ثبت شده در هر راکتور به بلندترین پیک نیتروژن موجود در آن راکتور مقدار P که حاکی از شدت پیک NO گاز آلاینده باقی مانده در راکتور تعریف می شود ملاحظه می شود) این مقدار برای آلومنیوم کمتر از مس و استیل می باشد که این گواه بر مناسب بودن جنس آلومنیوم می باشد

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق با بررسی توانایی پلاسمای سرد تخلیه الکتریکی سد دی الکتریک در پاک سازی غلظت گازهای آلاینده NOx مشاهده شد که با افزایش ولتاژ و فرکانس تکرار پالس اعمالی بر پلاسمای سرد (DBD) درصد این پاک سازی افزایش می یابد. همچنین نتایج نشان داد که با طراحی مناسب و انتخاب آلومنیوم به عنوان جنس الکترود داخلی راکتور پلاسمای سرد می توان بر این توانایی افزود. در مجموع می توان گفت پلاسمای سرد تخلیه الکتریکی سد دی الکتریک روشی کارآمد و پر بازده در کاهش غلظت گازهای آلاینده NOx می باشد.

مراجع

[1] Rajanikanth, B.S., Rout, S., *Studies on nitric oxide removal in simulated gas compositions under plasma-dielectric/catalytic discharges*, **Fuel Processing Technology**, 74 (2001) 177-195.

[2] Rajanikanth, B.S., Srinivasan, A.D., *Pulsed plasma promoted adsorption/catalysis for NO_x removal from stationary diesel engine exhaust*. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,** 14 (2007) 302-311.

[3] Baglin, V., Bojko1, J., Gröbner, O., Henrist, B., Hilleret, N., Scheuerlein, C., Taborelli, M., *The secondary electron yield of technical materials and its variation with surface treatments*, CERN, Geneva, Switzerland, 2010.

[4] Shimizu, K., Oda, T., *Emission spectrometry for discharge plasma diagnosis*, **Science and Technology of Advanced Materials,** 2 (3–4) (2001) 577-585.

[5] Machala, Z.; Janda, M.; Hensel, K.; Jedlovsky, I.; Lestinska, L.; Foltin, V.; Martisovits, V., Morvova, M., *Emission spectroscopy of atmospheric pressure plasmas for bio-medical and environmental applications*, **Journal of Molecular Spectroscopy**, *243 (2007) 194-201.*

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]