فصلنامه علمی تخصصی طب کار
دوره ۱۵ ، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۲
صفحه: ۹۳-۷۸

Occupational Medicine Quarterly Journal
Vol. 15, No.3, Autumn 2023
Pages: 78-93

# مروری بر کاربرد فناوری پلاسما در کنترل آلودگی هوا

زهرا اردودری*[1]، مسعود ریسمانچیان[2]

## چکیده

**مقدمه:** پلاسما به عنوان چهارمین حالت ماده در نظر گرفته می شود. پلاسما غیر حرارتی به علت ویژگی‌های منحصر به فرد خود از قبیل عملکرد آسان، واکنش سریع در دمای محیط و زمان ماند کوتاه از محبوبیت بیشتری برخوردار می‌باشد. در این مطالعه کاربرد فناوری پلاسما در کنترل آلودگی هوا مرور خواهد شد.

**روش بررسی:** در این مطالعه، از موتورهای جستجوی Science direct, Google Scholar, Web of sciences, Scopus, Pub med استفاده شد. کلیدواژهایی که بر اساس آن مقالات جستجو شدند شامل plasma، cold plasme، thermal plasma، control air pollution,non trhermal plasma در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲ بود.

**نتایج:** به کارگیری همزمان استفاده از کاتالیزور و پلاسما به عنوان یک ابزار مفید برای افزایش تخریب آلاینده‌ها و بهره‌وری انرژی در فرآیندها نشان داده شده است. با این وجود، برخی از عوامل محدودکننده، عمدتاً شامل هزینه کاتالیزورها، هزینه احتمالی مورد نیاز برای تثبیت آنها یا آلودگی ثانویه ناشی از آن باید در نظر گرفته شود.

**نتیجه گیری:** به منظور تجاری‌سازی فناوری پلاسما با مشکلاتی از جمله افزایش هزینه و به کارگیری فناوری مذکور در محیط واقعی روبرو هستیم. استفاده همزمان از کاتالیزورها و فناوری پلاسما به عنوان یک ابزار مفید برای افزایش تخریب آلاینده‌ها و بهره‌وری انرژی در فرآیندها می‌باشد. عدم تولید فاضلاب و عدم نیاز به معرف از مزایای ترکیب پلاسمای تخلیه سد دی الکتریک و کاتالیزور می‌باشد. ترکیب پلاسمای تخلیه سد دی‌الکتریک و کاتالیزور به دلیل مصرف کم انرژی، روش‌های بسیار جذابی محسوب خواهند شد. به نظر می‌رسد، تحقیقات اخیر در راستای کارآمدی، افزایش سرعت، انعطاف‌پذیری، کاهش هزینه و کاهش مصرف انرژی و دوستدار محیط زیست کردن سیستم‌های پیشرفته مبتنی بر پلاسمای سرد خواهد بود.

**واژه های کلیدی:** پلاسما، پلاسمای سرد، کنترل، آلودگی هوا

[1] دانشجوی دکتری، کمیته تحقیقات دانشجویی، گروه مهندسی بهداشت حرفه ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران
[2] گروه مهندسی بهداشت حرفه ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان، اصفهان، ایران
* (نویسنده مسئول)؛ پست الکترونیک: ordudari@hlth.mui.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۳۱

[ Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-27 ]

[ DOI: 10.18502/tkj.v15i3.13782 ]

## ۱. مقدمه

عبارت "پلاسما" توسط Irving Langmuir در سال ۱۹۲۸ معرفی شد(۱). در کنار جامدات، مایعات و گازها، پلاسما به عنوان چهارمین حالت ماده در نظر گرفته می شود(۲). پلاسما با اعمال انرژی به یک گاز خنثی در دامنه‌ی وسیعی از دما و فشار، تولید می‌شود(۳). گونه‌های واکنشی تولید شده در فناوری پلاسما، به نوع گاز و شرایط عملیاتی اعمال شده بستگی دارد (۴). پلاسما در حالت پایه برانگیخته دارای بار خنثی است. به بیان دیگر، پلاسما کاملاً یا به طور جزئی یونیزه شده و حاوی مواد خنثی، یون‌ها، رادیکال‌های آزاد و الکترون‌هایی است که می‌تواند توسط انواع تخلیه‌های الکتریکی تولید شود(۵). این گازها در اثر گرما یا شرایط الکترومغناطیسی تحریک و ایجاد می‌گردند. تولید پلاسماهای رشته‌ای منبع عالی رادیکال‌ها و گونه‌های برانگیخته هستند و یک محیط اکسنده را ایجاد می‌کنند (۶).

لازم به ذکر است، ۹۹٪ از مواد موجود در طبیعت در حالت پلاسما هستند(۳). رعد و برق، شفق قطبی، خورشید و پراکنش نور نمونه‌های شناخته شده‌ی پلاسما و مثال‌هایی از پلاسمای طبیعی هستند(۳).

انتشار ترکیبات آلی فرار از منابع مختلف به اتمسفر باعث مشکلات جدی آلودگی هوا گشته است. به علت اثرات مضر ترکیبات آلی فرار بر روی سلامتی انسان و محیط، در چند دهه اخیر مقررات سختگیرانه‌ای برای انتشار ترکیبات آلی فرار تصویب شده است. کاهش انتشار ترکیبات آلی فرار از منابع مختلف نیازمند روش‌های جدید و موثر خواهد بود(۷).

در سال‌های اخیر برخی تکنیک‌های جدید در کنترل آلودگی هوا مانند پلاسما توجه زیادی را به خود جلب کرده اند. پلاسما غیرحرارتی به علت ویژگی‌های منحصر به فرد خود از قبیل عملکرد آسان، واکنش سریع در دمای محیط و زمان ماند کوتاه از محبوبیت بیشتری برخوردار می‌باشد(۸).

### انواع پلاسما

پلاسما را معمولاً می‌توان بر اساس چندین پارامتر طبقه‌بندی کرد که درجه حرارت اصلی‌ترین آن‌ها است. بر اساس دما، می‌توان پلاسما را به پلاسمای داغ یا "پلاسمای حرارتی" و پلاسمای سرد یا "پلاسمای غیرحرارتی"، طبقه‌بندی کرد(۵).

### پلاسما حرارتی

پلاسمای حرارتی نوعی پلاسما است که در آن دمای گونه‌های سنگین‌تر مانند رادیکال‌ها، یون‌ها، مولکول‌ها و اتم‌ها، مشابه الکترون‌ها است و تقریباً همه ذرات آن حتی در انرژی کم در تعادل حرارتی هستند. پلاسمای حرارتی عمدتا شامل فرکانس رادیویی، مشعل(torch) و تخلیه قوس است. در این پلاسما می‌توان شار حرارتی بالایی را با افزایش توان تا ۵۰ مگاوات و افزایش سطح فشار تا بیشتر از ۱۰۵ پاسکال افزایش داد(۹). در پلاسمای حرارتی، یونیزاسیون و فرآیندهای شیمیایی عمدتاً توسط دما کنترل می‌شوند که دما در این نوع پلاسما می‌تواند به بیش از ۲۰۰۰۰ کلوین برسد(۴). در این نوع پلاسما، دمای الکترون‌ها می‌تواند بیشتر از فاز گازی که تقریباً هم دمای محیط است، باشد. در انرژی یونیزاسیون بالا، الکترون‌ها مستقیماً با مولکول‌ها و یون‌های موجود واکنش نشان می‌دهند. پلاسما از رادیکال‌های برانگیخته تشکیل شده به همین دلیل آلاینده‌های موجود در هوا در دمای اتاق اکسید می‌شوند(۶). مزایا و معایب پلاسما حرارتی در جدول ۱ نشان داده شده است(۱۰).

جدول ۱: مزایا و معایب پلاسما حرارتی

| فرایند | مزایا | معایب |
|---|---|---|
| پلاسما حرارتی | دمای فرآیند و چگالی انرژی بالا | مصرف انرژی و هزینه های بالا |
| | اندازه کوچکتر نصب | به دلیل دمای بالا ممکن است به مواد نسوز نیاز باشد |
| | انرژی ورودی مستقل از واکنش است | طول عمر محدود مشعل |
| | کاهش جریان گاز و الزامات برای تصفیه گاز خروجی | |
| | گرمایش، راه اندازی و خاموشی سریع | |

[ Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-27 ]

[ DOI: 10.18502/tkj.v15i3.13782 ]

**پلاسما غیرحرارتی یا سرد**

در پلاسمای غیرحرارتی الکترون‌ها، دمای بسیار بالاتری نسبت به گونه‌های سنگین‌تر دارند. پلاسما غیرحرارتی به دلیل تفاوت در جرم الکترون‌ها، پلاسمای غیرتعادلی نیز نامیده می‌شود. با عبور انرژی، گاز به گونه‌های مختلف واکنش‌پذیر تجزیه می‌شود و به دنبال آن واکنش‌های یونیزاسیون انجام میگردد(۱۰،۹). در گذشته، تخلیه‌های پلاسمای غیرحرارتی توسط میدان‌های الکتریکی متناوب ((AC(Alternative curent) یا پالسی و مستقیم ((DC(Direct curent) تولید می‌شد و برای تولید چنین تخلیه‌هایی، از انواع مختلفی از منابع برق مانند پلاسمای جفت شده خازنی ((CCP(capacitive coupled plasma)، پلاسمای جفت شده القایی( ICP(inductively coupled plasma ) یا مستقیم (DC) استفاده می‌شد. اما امروزه، تخلیه جت‌های پلاسمایی با فشار اتمسفر، تخلیه کرونا، فرکانس رادیویی، پلاسمای ناشی از مایکروویو، تخلیه قوس نرم(gliding arc discharge)، تخلیه سد دی الکتریک با گازهای عامل (هوا، Ar، O2، $N_2$) و تخلیه تابشی( glow discharge) به طور گسترده برای تولید تخلیه‌های پلاسمای غیرحرارتی به کار می‌رود(۱۲،۱۱). منبع برق، مایکروویو و رادیو فرکانس اختلاف پتانسیل الکتریکی بالایی بین دو یا چند الکترود ایجاد می‌کند(۱۳).

اکثر انواع تخلیه پلاسما غیرحرارتی در یک گاز نجیب با مخلوط کوچکی از منابع گازی تولید می‌شوند. با این حال، برخی از آنها را می‌توان در هوای محیط و بدون هیچ منبع گازی استفاده کرد(۱۴).

در طی تولید پلاسما غیرحرارتی، الکترون‌های با انرژی بالا (تا ده الکترون ولت) و گونه‌های بسیار واکنش‌پذیر (اکسیژن و نیتروژن واکنش‌پذیر، RONS(reactive oxygen nitrogen species)، تشکیل می‌شود(۱۲)، و به عنوان نیروی محرکه برای شروع و انتشار واکنش‌های شیمیایی عمل (۱۲) و به طور همزمان نور ساطع و امواج ضربه‌ای تولید می‌کنند(۱۵). همچنین می‌توانند آلاینده‌ها را با سرعت بسیار بالا اکسید کنند، همه این گونه های واکنش‌پذیر همراه با دیگر انرژی‌ها مانند اشعه ماوراء بنفش برای اکسید کردن آلاینده‌ها استفاده می‌شوند(۱۲)، بنابراین کارایی انرژی آن در مقایسه با روش‌های مرسوم افزایش می‌یابد(۱۶).

به طور خلاصه، فرآیند پلاسمای غیرحرارتی را می‌توان با سه مرحله توصیف کرد: در مرحله اول، گونه‌های فعال متعددی تولید می‌شوند (الکترون‌های بسیار پرانرژی، رادیکال‌های OH، ازن، گونه‌های برانگیخته حاوی N و O) که با پیروی از یک مسیر خاص، نقش غالب در تخریب مواد آلی دارند که واکنش‌های شیمیایی پلاسما را تقویت می‌کنند. مرحله دوم شامل نفوذ گونه‌های فعال به سطح ماده مورد نظر است. مرحله سوم واکنش شیمیایی گونه‌های فعال و آلاینده‌های آلی برای حذف آلودگی است(۱۲).

پلاسما غیرحرارتی یا سرد بر اساس فشار محیط به دو دسته پلاسمای سرد کم فشار و پلاسمای سرد اتمسفری((CAP(cold atmospheric plasma) تقسیم می‌شود. پلاسمای کم فشار در فشارهای کم یا حتی در خلاء تولید می‌شود. پلاسما اتمسفری در فرکانس رادیویی کار می‌کند و با استفاده از تحریکات الکتریکی سریع در فواصل متناوب، ولتاژها و توان‌های مختلف، یونیزاسیون ایجاد می‌کند(۱۷).

پلاسمای سرد اتمسفری یک فرآیند اکسیداسیون پیشرفته ((AOPs(advanced oxidation process) است(۱۲). در میان روش‌های مختلف حذف آلاینده‌ها، پلاسمای سرد اتمسفری به عنوان یک روش بسیار رقابتی و کارآمد برای پاک‌سازی آب و گاز آلوده تکامل یافته است(۱۸). مصرف کم انرژی، راندمان تخریب بالای آلاینده، زمان تصفیه کوتاه و آلودگی ثانویه ناچیز به عنوان مزیت پلاسما سرد اتمسفری در نظر گرفته می‌شود(۱۲). یکی از مهمترین مزایای روش پلاسمای اتمسفری سرد این است که نیاز به دمای بالا ندارد و در نتیجه مصرف انرژی کاهش می‌یابد(۱۲). استفاده از پلاسمای سرد در فشار اتمسفر می‌تواند موجب افزایش بازده آلودگی‌زدایی و ایمنی فرآیند گردد و ویژگی‌های ارگانولیپتیکی محصولات را حذف نماید(۱۹).

راندمان بالا، قابلیت کاربرد برای طیف گسترده‌ای از مواد، قابلیت کاربرد برای غلظت‌های پائین آلاینده و دبی‌های زیاد جریان هوا از مزایا و انرژی بالا، تخریب ناکامل آلاینده، ایجاد ازن و کنترل سخت فرایند از معایب فن‌آوری پلاسما غیرحرارتی می‌باشد(۲۰). استفاده از فناوری پلاسمای غیرحرارتی با سرعت بسیار بالایی در حال افزایش است(۱۱). با این حال، علیرغم این واقعیت که CAP می‌تواند یک

[ Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-27 ]
[ DOI: 10.18502/tkj.v15i3.13782 ]

فناوری بسیار مناسب باشد، نقش مراحل کلیدی برای بهره‌برداری از این روش به شیوه بهینه باید بررسی گردد(۱۶).

مزایای انواع پلاسما غیرحرارتی در جدول ۲ نشان داده شده است(۱۲).

جدول۲: مزایای انواع پلاسما غیر حرارتی

| انواع پلاسما غیرحرارتی تخلیه ای | مزایا |
|---|---|
| (Gliding Arc Discharge: GAD)<br>تخلیه قوس نرم | انتخاب پذیری شیمیایی خوب<br>توانایی تولید مقدار زیادی از گونه های اکتیو<br>دمای بالای الکترون<br>دمای پایین گاز |
| (APPJ: Atmospheric Dressure Dlasma jet)<br>پلاسما جت فشار اتمسفری | عمق نفوذ بالا در آب<br>دانسیته بالای الکترون<br>استفاده آسان از شرایط اتمسفری |
| (Dielectric Barrier Discharge: DBD)<br>تخلیه سد دی الکتریک | شرایط پایدار و قابل تولید پلاسما<br>ساختار ساده<br>در دسترس بودن منابع تغذیه قابل اعتماد و مقرون به صرفه |
| (Pulse Corona Discharge: PCD)<br>تخلیه کرونا پلاسما | ریسک سمیت پایین<br>توانایی بالا برای حذف مواد آلی طبیعی |

## ۲.روش بررسی

در این مطالعه‌ی مروری روایی، از موتورهای جستجوی Science direct, Google Scholar, ISI, Scopus, Pub med استفاده شد . کلید واژهایی که براساس آن مقالات جستجو شدند شامل plasma، cold plasme، thermal plasma، control air pollution,non rhermal plasma در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲ بود. کاربرد انواع فناوری پلاسما در صنایع، عوامل موثر بر عملیات پلاسما، ترکیب سایر فناوری‌ها با پلاسما، تاثیر پارامترهای کلیدی بر راندمان حذف آلاینده‌ها با فناوری پلاسما از مقالات منتشر شده استخراج گردید.

## ۳. کاربرد فناوری پلاسما در صنایع

### کاربرد پلاسما حرارتی

پلاسما حرارتی به طور گسترده‌ای برای تصفیه زباله‌های جامد از طریق سوزاندن حرارتی استفاده می‌شود(۹). فناوری پلاسمای حرارتی برای تصفیه پسماندهای جامد در سراسر جهان به عنوان روشی بسیار کارآمد شناخته شده است و برای حذف یا تبدیل انواع مختلف زباله از جمله زباله‌های پلاستیکی، لاستیک‌های زباله(۲۱)، زیست توده(biomass) زباله‌های جامد شهری، زباله‌های الکترونیکی(۲۲)، خاکستر(۲۳)، لجن شهری و صنعتی(۲۴-۲۶) استفاده شده است. روش‌های پلاسما نه تنها برای تولید سوخت گازی استفاده می‌شوند، بلکه به نظر می‌رسد پتانسیل بالایی برای تولید سرباره شیشه‌ای دارند که می‌توان از آن برای بازیابی فلزات استفاده کرد. بنابراین، ممکن است جایگزینی امیدوارکننده برای حل مشکلات زباله های پزشکی باشد. عملیات در محل روش خوبی برای دفع زباله های پزشکی به ویژه در مواقع اضطراری است. برخی از محققان پیشنهاد می‌کنند که نصب زباله‌سوزهای موقت ممکن است راه‌حلی مؤثر برای مدیریت فوق‌العاده زباله‌های پزشکی باشد(۲۷). پلاسما حرارتی را می توان بدون ایجاد آسیب به بافت ماده، برای ضدغفونی مواد استفاده نمود(۱۷). سیستم‌های پلاسمای حرارتی در زمینه‌هایی که نیاز به گرمای بسیار زیادی دارند، مانند جوشکاری، برش و تصفیه زباله‌های خطرناک استفاده می‌شوند(۴). با این حال، مقررات سختگیرانه در مورد انتشار آلاینده‌های هوا از کوره‌های زباله‌سوز در محل و نصب آن بزرگترین چالش هستند. فناوری پلاسمای حرارتی دمای بالای فرآیند را که یک مزیت است را تامین و الزامات تصفیه گاز خارج شده را کاهش می‌دهد و امکان نصب در مقیاس کوچک‌تر را فراهم می‌کند. بنابراین، جایگزینی امیدوارکننده برای تصفیه زباله‌های پزشکی در محل و خارج از محل است(۲۸).

### کاربرد پلاسما غیرحرارتی

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، پلاسمای غیرحرارتی در زمینه‌های مختلفی مانند مهندسی محیط زیست، اصلاح سطوح(۲۹) علوم پزشکی(۱۷) و ایمنی مواد

[ Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-27 ]

[ DOI: 10.18502/tkj.v15i3.13782 ]

غذایی و تولید آن (۱۲) استفاده می‌شود. برای مثال در حوزه پزشکی می‌توان به استریل کردن لوازم و قطعات پزشکی، ترمیم زخم‌ها، از بین بردن سلول‌های سرطانی، از بین بردن عفونت چشم، ترمیم دندان و ضدعفونی کردن آن، سازگار کردن ایمپلنت‌ها برای قرارگیری در بدن انسان اشاره کرد. از مزایای استریل‌سازی به روش پلاسما، امکان استریل ابزارهای حساس به رطوبت و گرما، غیرسمی بودن ماده‌ی اولیه آن (پر اکسید هیدروژن)، عدم ایجاد پسماند سمی، کاهش زمان استریل، مقرون به صرفه بودن و دوستدار محیط زیست است(۳).

پلاسمای غیرحرارتی می‌توانند به طور موثری از رشد باکتری‌ها، کپک‌ها و مخمرها جلوگیری کنند به همین دلیل به طور گسترده برای استریل کردن محصولات غذایی استفاده شده است. اثر پلاسما بر آلودگی‌زدایی باقیمانده‌های آفت‌کش‌ها به گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) مانند OH، $O_3$ و پراکسید هیدروژن تولید شده در پلاسما نسبت داده می‌شود که می‌تواند به‌طور غیرمستقیم اکسید شده و پیوندهای شیمیایی مولکول‌های ارگانوفسفر را به طور موثر تخریب کند. در مقایسه با سایر روش‌های تخریب اکسیداتیو، پلاسمای سرد دارای مزایایی از جمله بازده بالاتر، ضدعفونی بدون استفاده از مواد شیمیایی و در دمای پایین است که ایمنی میکروبی، ماندگاری و تازگی محصول کشاورزی را تضمین می‌کند(۱۰). پلاسما می‌تواند با سلول‌های باکتریایی تعامل داشته باشد و میکروارگانیسم‌ها و همچنین هاگ‌ها و ویروس‌ها را غیرفعال کند(۳۰).

همچنین پلاسما روشی ایده‌ال جهت غیرفعالسازی میکروارگانیسم‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی در راستای ارتقای کیفی آنها و افزایش عمر نگهداری مواد غذاییِ بسته‌بندی شده است(۳).

از پلاسما می‌توان برای اصلاح سطح و افزایش خواص اصلی مواد نساجی استفاده کرد. این عملیات برای افزایش قابلیت رنگ‌پذیری پلیمرها، قابلیت چاپ، بهبود ثبات و استحکام رنگ، مقاومت شستشوی منسوج و تغییر انرژی سطح الیاف پارچه‌ها ثابت شده است(۳).

از کاربردهای پلاسما در صنعت کاغذ می‌توان به تولید کاغذ ضدشعله، ضداستاتیک، ضدباکتری، ضدکپک و سطوح زیستی سازگار آن اشاره کرد. ویژگی‌های مفید دیگری که می‌توان با پلاسما به دست آورد، ضدآب شدن کاغذ پس از رنگ‌آمیزی، مقاومت در برابر عوامل اکسیدکننده، پوشش‌های محافظ، برق انداختن، افزایش خاصیت ضدمرکب به واسطه‌ی اصلاح کاغذ قبل از چاپ، محافظت در برابر نور خورشید و پرتوهای ماوراءبنفش، پلیمریزاسیون با مونومر، پلیمرهای مصنوعی در پیوند با سلولز و رسوبات زیستی تجزیه‌پذیر است. از مزایای این نوع فرایندها عدم استفاده از حلال‌های شیمیایی و بی‌نیازی به آب است(۳).

فناوری پلاسما قادر است انواع زباله‌ها را بدون توجه به نوع آنها، به مواد قابل استفاده و سازگار با محیط زیست تبدیل کند. پسماندهای جامد شهری، مصالح و نخاله‌های ساختمانی، لجن فاضلاب‌های صنعتی و شهری و حتی پسماندهای خطرناک عفونی و بیمارستانی از طریق این فناوری ایمن قابل امحاء هستند. عملیات پلاسمای سطح، فرایندی است که انرژی سطح بسیاری از مواد را به منظور اصلاح خواص سطحی آنها (قابلیت اتصال و پیوستگی، تری، چسبندگی و غیره )افزایش می‌دهد. پلاسمای غیرحرارتی می‌تواند برای اصلاح و تغییر سطح موادی همچون شیشه، فلز، شبه فلزات، پلاستیک، پلیمر، پارچه، فیلم، کاغذ و مقوا، تولید تراشه رایانه استفاده کرد(۳). کاربرد انواع پلاسما در شکل ۱ و جدول ۳ نشان داده شده است(۳).

[ Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-27 ]

[ DOI: 10.18502/tkj.v15i3.13782 ]




شکل۱: کاربردهای انتخابی فناوری پلاسمای سرد در زمینه های مختلف

جدول ۳: معرفی انواع پلاسما، ویژگی ها و برخی کاربردهای آن

| پلاسما | | ویژگی ها | نحوه تولید | کاربرد |
|---|---|---|---|---|
| پلاسما حرارتی یا پلاسما گرم | | تعادل حرارتی بین اجزا، دمای بالا، یونیزاسیون کامل و تعادل ترمودینامیکی گاز | تخلیه از نوع قوس الکتریکی، واکنش های گرما هسته ای و اثر لیزر | عملیات متالوژی، عملیات حرارتی، جوشکاری، استخراج فلزات |
| پلاسما غیرحرارتی یا پلاسما سرد | فشار پایین یا خلا | نابرابری درجه حرارت اجزا، خارج از تعادل ترمدینامیکی و یونیزاسیون جزئی گاز | تخلیه الکتریکی گاز در فشار پایین | پاکسازی سطح، لایه نشانی، تولید ازن، تصفیه هوا، کاهش آلودگی هوا، ضدعفونی آب و استریل کردن |
| | فشار اتمسفری | | تخلیه الکتریکی گاز در فشار اتمسفری | |

### ۴.کاربرد پلاسما غیر حرارتی در کنترل آلاینده های هوا

پلاسمای غیرحرارتی منبع رادیکال‌های آزاد فاز گازی هیدروکسیل، اکسیژن و هیدروژن و دیگر گونه‌های اکتیو می‌باشد که برای تخریب آلاینده مفید است. عناصر فعال در پلاسما غیرحرارتی از قبیل رادیکالهای هیدروکسیل، مولکول‌های ازن و اتم‌های اکسیژن می‌توانند با بو و گازهای سمی واکنش داده و آن‌ها را به مواد بی‌بو و غیرسمی تبدیل نماید. پلاسما می‌تواند در فضای بین دو الکترود جدا از هم با ولتاژ بالا (۱۰ تا ۳۰ کیلوولت) ایجاد گردد(۳۱).

در ایران مطالعاتی به منظور کنترل آلاینده‌های هوا صورت گرفته است از جمله می‌توان به مطالعه ابراهیمی و همکاران اشاره نمود که به بررسی پالایش بخارات کلروفرم با استفاده از راکتور پلاسمای غیرحرارتی جدید پرداخته شد. نتایج نشان داد که تخلیه الکتریکی در گپ تخلیه بزرگتری ایجاد می‌گردد. از سویی با افزایش ولتاژ و افزایش غلظت، کارایی تخریب افزایش می‌یابد. همچنین افزایش دبی باعث کاهش کارایی می‌گردد. علاوه بر این مشاهده گردید که گاز خروجی از راکتور حاوی اکسیدهای نیتروژن، کلر، اسیدکلریدریک، فسژن، تری کلروبنزآلدئید و تری کلرواستالدئید می باشد(۷).

در مطالعه‌ای قربانی شهنا و همکاران در سال ۱۳۹۵ به بررسی اثر تلفیقی پلاسمای غیرحرارتی و نانوکامپوزیت کربن فعال- اکسید روی بر حذف هیدروکربن‌های آلی فرار هوا پرداختند. یافته‌ها نشان داد که اثر سینرژیستی بالایی بین پلاسما و کاتالیست برقرار میگردد به نحوی که در انرژی ورودی

[ Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-27 ]
[ DOI: 10.18502/tkj.v15i3.13782 ]

ویژه برابر با ۱۰۰۰ ژول بر لیتر، تقریبا کل تولوئن حذف گردید، درحالی که با استفاده از پلاسمای تنها درصد حذف با به کار بردن همین مقدار انرژی برابر ۸۸ درصد بود.

در حضور کاتالیست همچنین انتخاب‌پذیری به $co_2$ نیز افزایش پیدا کرد و بعضی از محصولات فرعی همچون No و $No_2$ به طور کامل حذف گردیدند و مقدار $O_3$ خروجی بسیار ناچیز بود. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که روش هیبریدی پلاسما-کاتالیست یک روش نوین و امیدبخش در راستای حذف ترکیبات آلی فرار می‌باشد که باعث افزایش کارائی حذف، کاهش محصولات خطرناک و کاهش انرژی مصرفی میگردد(۳۲).

**کاربرد پلاسمای غیرحرارتی با فشار اتمسفر در سیستم‌های** HVAC (heating, ventilation, and air conditioning)**و** AHU(air handling units)

استفاده از ژنراتورهای پلاسمای غیرحرارتی (NTP(Non thermal plasma) با فشار اتمسفر در سیستم‌های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع (HVAC) و واحدهای جابجایی هوا (AHU)، تصفیه‌کننده‌ها و دستگاه‌های پردازش هوای مشابه و همچنین در شبکه‌های کانالی آنها، در چند سال اخیر به طور قابل توجهی توسعه یافته است.

ژنراتورهای NTP از میدان الکتریکی برای انتقال اتم‌ها و مولکول‌ها در بازیافت بار مثبت یا منفی هوا (یونیزاسیون تک قطبی یا یونیزاسیون دو قطبی) استفاده می‌کنند. انتقال انرژی حاصل از برخورد مولکول‌های باردار با مولکول‌های خنثی در هوا باعث تشکیل یون‌ها و رادیکال‌های آزاد می‌شود. این فرآیند تعادل یونی طبیعی را تغییر می‌دهد (۱۰۰۰ یون منفی در $cm^3$ و ۱۲۰۰ یون مثبت در $cm^3$). همچنین، یون‌ها و رادیکال‌های آزاد حاصل با مولکول‌های آب در هوا واکنش می‌دهند و گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) از جمله پراکسید هیدروژن ($H_2O_2$)، ازن ($O_3$)، رادیکال هیدروکسیل ($OH^-$)، سوپراکسیدها ($O_2^-$) و اکسیژن منفرد را تشکیل می‌دهند. محدوده ROS تشکیل شده به قطبیت یون‌های واکنش‌دهنده، پارامترهای طراحی راکتور NTP مورد استفاده و شرایط محیطی در طول فرآیند یونیزاسیون هوا بستگی دارد.

استفاده از ROS برای افزایش کیفیت هوای داخل((IAQ(Indoor air quality) برای جذب و حذف آلاینده‌های بیولوژیکی استفاده می‌شوند. فیلترها، سینی‌ها و مجاری در چنین سیستم‌هایی، بستر مناسبی را برای تکثیر میکروبی و تکثیر در داخل خانه فراهم می‌کنند(۳۳).

جریان یون تولید شده توسط ژنراتورهای NTP دارای خواص باکتری‌کشی در برابر بیوآئروسل‌های گرم مثبت و گرم منفی است که در محیط‌های فیزیکی ساکن مانند فیلترهای هوا و ظروف کشت ته نشین می‌شوند. یون‌های منفی کارایی کمتری نسبت به یون‌های مثبت دارند(۳۴). در سیستم‌هایی که ازن به عنوان یک محصول جانبی تولید می‌شود، و ازن نقش اصلی را در این فرآیند بازی نمی‌کند، کارایی ضدباکتریایی یون‌های مثبت و منفی با افزایش غلظت یون و زمان مواجهه افزایش می‌یابد کارایی ضدباکتریایی در فرآیندهای دینامیکی، تک مرحله‌ای است. به عنوان مثال، یون‌های تولید شده توسط یک سیستم NTP یونیزاسیون دوقطبی، اثر ضدباکتریایی را علیه استافیلوکوکوس اپیدرم نشان داده‌اند و کارایی آنها با افزایش سوئیچینگ قطبی افزایش و با افزایش سرعت جریان هوا کاهش می‌یابد. همانند سیستم‌های استاتیک IAQ، کارایی باکتری‌کشی ژنراتورهای یون تک قطبی با یون‌های مثبت ظاهراً بیشتر از یون‌های منفی است(۳۵). ظرفیت زیست‌کشی ژنراتورهای NTP که یون‌های منفی تولید می‌کنند، در برابر برخی باکتری‌ها انتخابی است(۳۶). فعالیت ضدباکتریایی با کاهش سرعت جریان هوا و فاصله از منبع انتشار یون افزایش می‌یابد(۳۷).

علاوه بر آلاینده‌های بیولوژیکی، سیستم‌های NTP در حذف یا کاهش برخی از ترکیبات فرار آلی (VOCs) در هوا مؤثر هستند. استفاده از ساطع‌کننده‌های یونی در ولتاژها و فرکانس‌های زیاد باعث می‌شود تعداد بیشتری از الکترون‌ها پیوندهای مولکولی موجود در آلاینده‌ها را بشکنند و در نتیجه کارایی حذف آنها را افزایش دهند(۳۸). از سوی دیگر، راندمان حذف سیستم‌های NTP ظاهراً با افزایش غلظت اولیه VOCs و یا افزایش سرعت جریان هوا کاهش می‌یابد(۳۹). در مقابل، سایر فناوری‌های حذف VOC مانند آن‌هایی که مبتنی بر جذب بر روی کربن فعال هستند، در غلظت‌های پایین VOC کارآمدی کمتری خواهند داشت(۴۰). از آنجا که هر نوع پیوند مولکولی به حداقل مقدار انرژی برای شکستن نیاز دارد، بازده انرژی سیستم‌های NTP زمانی بالا است که آلاینده خاصی که باید حذف شود، مشخص باشد. مشکل اصلی چنین سیستم‌هایی در کاهش آلاینده‌های شیمیایی ناشی از اکسیداسیون ناقص گازها و تشکیل محصولات جانبی ناخواسته است، که اغلب شامل ازن

[ Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-27 ]
[ DOI: 10.18502/tkj.v15i3.13782 ]

می‌باشد(۴۱, ۴۲). این گاز می تواند با VOC های مختلف، رادیکال هیدروکسیل و رادیکال نیترات، در هوای داخل ساختمان واکنش دهد. مشکل تشکیل ازن به عنوان یک محصول جانبی یونیزاسیون نه تنها واکنش‌پذیری بالای آن در برابر VOCها و رادیکال‌های آزاد آن است، بلکه به طور بالقوه خطرناک نیز می‌باشند. در نتیجه، فناوری‌های بهبود IAQ تولیدکننده ازن می‌تواند اثرات نامطلوبی بر سلامت قلب و عروق داشته باشد (۳۴). اشکالات اصلی فناوری NTP برای حذف VOC را می‌توان با استفاده از یک فیلتر کاتالیزوری ساخته شده با منگنز، تیتانیوم یا اکسید تیتانیوم پوشیده شده (Titanium doped) به حداقل رساند. این فناوری ترکیبی معمولاً به عنوان کاتالیز با کمک پلاسما (( PAC(Plasma-Assisted Catalysis) یا کاتالیز با محور پلاسما(PDC(Plasma-Driven Catalysis) شناخته می‌شود(۳۳).

**۵.کاربرد ترکیب پلاسما و رسوب دهنده الکترواستاتیکی در حذف ذرات**

سیستم‌های NTP که معمولاً در رسوب‌دهنده‌های الکترواستاتیکی (ESP) ادغام می‌شوند، برای جذب ذرات ریز (PM2.5) در هوا بسیار مؤثر هستند(۴۳). بزرگترین مزیت ESPها نسبت به انواع دیگر سیستم‌های جذب ذرات، مصرف کم انرژی و ایجاد افت فشار کم می‌باشد. از آنجایی که فناوری ESP عموماً ازن را تولید می‌کند و نگهداری آن گران است، استفاده همزمان از سیستم‌های NTP و فیلترهای فیزیکی معمولی اثر هم‌افزایی دارند. بنابراین، مشخص شده است که تولید یون‌های مثبت فیلترهای بالادست، با افزایش غلظت یون و کاهش سرعت جریان هوا موجب افزایش کارایی می‌گردد(۴۴).

در تئوری، سیستم‌های NTP یونیزاسیون دوقطبی باید بتوانند ذرات ریز (PM2.5) را بدون نیاز به جمع‌کننده‌های الکترواستاتیک یا فیلترهای فیزیکی ( به‌طور ساده با تجمع و بارش طبیعی ذرات) جذب کنند. اینکه آیا یک بار استفاده از فناوری NTP برای حذف ذرات معلق کافی است یا خیر، نیاز به بررسی دارد(۴۵).

**۶.عوامل موثر بر عملیات حذف در فرایند پلاسمای سرد**

ساختار راکتور و محفظه‌ها، ولتاژ و فرکانس اعمال شده، منبع تخلیه نوع گاز، سرعت جریان و ماهیت آلاینده از عوامل موثر بر عملیات حذف توسط پلاسمای سرد محسوب می‌گردد که در ادامه به توضیح عوامل پرداخت خواهد شد(۱۳).

**ساختار راکتور و محفظه ها** طراحی هندسی یک راکتور ایده‌آل باید به گونه‌ای باشد که از انرژی، حداکثر استفاده را نماید و بین پلاسما و محیط تحت عملیات سطح تماس لازم را ایجاد کند. مواد و هندسه الکترودها، ماده لایه دی الکتریک و فاصله شکاف بین الکترودها از پارامترهایی است که باید مدنظر قرار گیرد. در میان عوامل ذکر شده، طراحی فاصله مناسب الکترودها عامل تعیین‌کننده‌ای است که باید توزیع یکنواخت پلاسما و فاصله بهینه شکاف بین الکترودها را برای تشکیل پلاسمای الکتریکی ایده‌آل در یک ولتاژ اعمال شده تضمین نماید. الکترودهای سیمی نسبت به الکترودهای سوزنی و پین می‌توانند توزیع یکنواخت‌تری در ناحیه پلاسمایی داشته باشند. علاوه بر موارد ذکر شده، انتخاب مناسب مواد برای الکترودها نیز مهم است، زیرا در برخی موارد راندمان تخریب تحت تأثیر این عامل قرار خواهد گرفت. فولاد ضدزنگ پر استفاده‌ترین ماده برای الکترودها است. در مورد DBD(Dielectric Barrier Discharge)، با در نظر گرفتن اینکه ریز تخلیه‌ها روی سطح دی الکتریک ایجاد می‌شوند، ماده دی‌الکتریک برای ایجاد پلاسمای همگن مهم است. طبق نتایج، افزایش ثابت دی‌الکتریک یا کاهش ضخامت سد دی‌الکتریک منجر به افزایش ظرفیت سد دی‌الکتریک و افزایش شدت تخلیه می‌شود. با تجزیه و تحلیل الکتریکی دقیق تخلیه‌های پالسی نانوثانیه ((NSP(Nanosecond Pulsed) مشخص شد که استفاده از شیشه به‌عنوان سد دی‌الکتریک، به دلیل گذردهی نسبی بالاتر موجب یکنواختی تخلیه و توان رسوب بالاتر بین شکاف الکترود دی‌الکتریک می‌شود. روش‌هایی که انتقال جرم گونه‌های پلاسما را در داخل آب افزایش می‌دهند، می‌توانند عملکرد راکتور پلاسما را به طور قابل توجهی افزایش دهند(۱۲).

**ولتاژ و فرکانس اعمال شده**

اکسیداسیون پلاسما به شدت تحت تأثیر انرژی ورودی به سیستم است که توسط ولتاژ و فرکانس اعمال شده بیان می‌شود. تأثیر ولتاژ اعمال شده بر راندمان تخریب، عمدتاً مبتنی بر افزایش چگالی الکترون و غلظت گونه‌های فعال تولید شده است. مشابه اثر ولتاژ، افزایش نرخ تخریب با فرکانس اعمال شده به دلیل میدان الکتریکی بالاتر و متعاقب آن افزایش الکترون‌های پرانرژی و غلظت RONS است(۱۲).

[ Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-27 ]

[ DOI: 10.18502/tkj.v15i3.13782 ]

**منبع تخلیه(Discharge power source)**

منابع انرژی ولتاژ بالا مورداستفاده برای به حرکت درآوردن راکتورهای مختلف پلاسما به طور قابل ملاحظه‌ای بر کارایی انرژی فرآیند تأثیر می‌گذارد. تخلیه پالسی نانوثانیه (NSP یا NPD(Nanosecond Pulsed Discharge)) به دلیل اینکه جریان تخلیه و توان لحظه‌ای می‌تواند تا سه برابر افزایش یابد و مزیت منحصر به فردی از نظر بهره‌وری انرژی دارد و قادر به تولید پلاسمای قدرتمند و گونه‌های فعال است و در DBD هایی با موج‌های سینوسی شکل ولتاژ بالا، مشاهده می‌شود. با این وجود، میانگین توان تخلیه NSP به دلیل چرخه کاری بسیار پایین، کم است. بنابراین، برای دستیابی به راندمان حذف آلاینده مشابه نسبت به سایر منابع تغذیه ولتاژ بالا، به توان ورودی کمتری نیاز است، زیرا انرژی وارد شده بیشتر برای سرعت بخشیدن به الکترون به جای گرم کردن ذرات سنگین استفاده می‌شود(۱۲).

**نوع گاز و سرعت جریان**

به طور کلی، گازهای حاوی اکسیژن ($O_2$ و هوا) در مقایسه با پلاسمای نیتروژن، آلاینده را بهتر تخریب خواهد کرد که نشان‌دهنده نقش غالب ROS در برابر RNS است، با توجه به اینکه انتظار می‌رود تولید ROS حاوی $O_2$ در مقایسه با گاز $N_2$ افزایش یابد. با این وجود، تعیین‌کننده‌ترین عامل تأثیرگذار، فعل و انفعالات بین گونه‌های پلاسما و آلاینده است که برای هر آلاینده منحصر به فرد است. علاوه بر این، حالت و سرعت جریان گاز نیز بسیار مهم است. همچنین، با تنظیم نرخ جریان، زمان ماند RONS در ناحیه تخلیه کنترل می‌شود و برخورد و واکنش بین گونه‌های فعال را می‌توان افزایش داد(۱۲)

**ماهیت آلاینده**

انرژی مورد نیاز برای شکستن پیوندها برای هر ترکیب متفاوت است. با این حال، جدا از استحکام باند، مسیر تخریب نیز یک عامل حیاتی محسوب می‌گردد. بنابراین، حتی اگر برخی از ترکیبات، نیازمند انرژی کمتری باشند، مکانیسم تخریب پیچیده آنها بر نتایج تجزیه نهایی تأثیر می‌گذارد. در طول فرآیند پلاسما، جدا از مولکول‌های آلاینده اولیه، چندین واسطه در محلول وجود دارد که با آلاینده هدف در برابر گونه‌های فعال پلاسما رقابت می‌کنند و منجر به تاخیر در تخریب می‌شوند. طبق نتایج تخریب ارتباط نزدیکی با روابط ساختاری یا تخریبی دارد(۱۲).

علاوه بر موارد فوق، عوامل مختلف قابل کنترل که تأثیرات مهم‌تری دارند، مانند دمای داخل راکتور، زمان تصفیه و غلظت اولیه آلاینده نیز می‌توانند بر حذف آلاینده تأثیر بگذارند(۱۲).

**۷. ترکیب سایر فناوری ها با فناوری پلاسما**

تکنیک‌حذف آلاینده‌های گازی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: (۱) جذب سطحی و جذب شیمیایی آلاینده (۲) تجزیه آلاینده(۴۶).

در روش جذب سطحی آلاینده عمدتاً از فاز هوا وارد فاز جاذب جامد و در روش جذب شیمیایی وارد فاز جاذب مایع می‌گردد و بدین ترتیب آلاینده‌ها در یک مکان، جمع آوری و تغلیظ می‌شوند. با این وجود، در جذب شیمیایی آلاینده‌ها با یک واحد تصفیه بیولوژیکی وارد واکنش شیمیایی می‌شوند. از سوی دیگر، تکنیک‌های تخریب‌کننده یا فرآیندهای اکسیداسیون، با تشکیل محصولات واسطه فرعی $H_2O$ و $CO_2$ مشخص می‌شوند. این واکنش تحت شرایط کنترل شده مانند شرایطی که شامل دمای بالا (مانند احتراق) یا دماهای ملایم تا متوسط (مانند پلاسمای سرد و اکسیداسیون کاتالیزوری) است انجام می‌شود(۴۶).

**فناوری هیبریدی پلاسما و فتوکاتالیست برای حذف آلاینده های گازی**

در فرایند پلاسما و فوتوکاتالیز، $TiO_2$ یک کاتالیزور است که بدلیل کارایی کوانتومی و پتانسیل‌های اکسایش-کاهش باندهای ظرفیت و رسانش، قادر است بسیاری از مولکول‌های آلی را با گزینش‌پذیری عالی‌تری نسبت به $CO_2$ اکسید کند(۴۷). تخلیه سد دی‌الکتریک در هوا رشته‌های یونیزه شده را تولید می‌کند که منبع عالی برای رادیکال‌ها و گونه‌های برانگیخته محسوب می‌گردند و محیط اکسیدکننده‌ای در دمای اتاق و با انرژی ورودی کم تشکیل می دهد. پلاسمای غیرحرارتی عملکرد قابل توجهی (راندمان تبدیل و هزینه انرژی) برای مقادیر کم آلودگی ارائه می‌دهد (۴۸). چالش اصلی با پلاسما جلوگیری از تشکیل محصولات جانبی اکسیداسیون و هدایت واکنش‌ها به سمت کانی‌سازی است(۴۹). $TiO_2$، به دلیل ظرفیت جذب خود، تمایل دارد محصولات جانبی را در حالت جذب نگه دارد، بنابراین آنها به صورت طولانی مدت در معرض رادیکال قرار می‌دهد تا به تجزیه کامل ایجاد گردد(۴۰).

[ Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-27 ]
[ DOI: 10.18502/tkj.v15i3.13782 ]

**طراحی سیستم های هیبریدی پلاسما و فتوکاتالیستی**

ترکیب پلاسما تخلیه سد دی‌الکتریک با فتوکاتالیست نسبت به بقیه انواع پلاسما به دلیل تخلیه یکنواخت پلاسما در سطح کاتالیزور موفق تر بوده است. ترکیب پلاسما تخلیه سد دی‌الکتریک و فوتوکاتالیز TiO2/UV، موجب مصرف کم انرژی خواهد شد(۵۰).

**معرفی راکتورهای فتوکاتالیتیک در حذف آلاینده‌های گازی**

با جذب نور در یک نیمه رسانا، الکترون از حالت پایه به نوار رسانایی هدایت و در حالت پایه یک حفره به عنوان فوتوکاتالیست ایجاد می‌شود. بیشتر الکترون‌ها دوباره با حفره ترکیب می‌شوند و تعدادی دیگر می‌توانند ترکیبات جذب‌شده روی سطح کاتالیزور را اکسایش یا کاهش دهند(۵۱). این واکنشها می‌توانند به طور مستقیم در حضور مواد خاص و به طور غیرمستقیم با کمک اکسیژن و آب در جو، رادیکالهایی تولید کنند(۵۲-۵۴). این گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) برای اکسیداسیون و کانی‌سازی آلاینده‌ها بسیار انتخابی عمل می‌کنند(۵۵). متداول‌ترین فوتوکاتالیست مورد بررسی $TiO_2$ است که طول موج تابش فرابنفش (UV) کمتر از ۳۸۸ نانومتر را جذب می‌کند(۵۴). در جدول ۴ حذف ترکیبات آلی فرار مختلف (VOCs) شامل آروماتیک، آلدئیدها و مرکاپتانها در یک راکتور فوتوکاتالیستی نشان داده شده است .

جدول ۴: انواع راکتور برای ترکیبات آلی فرار

| آلاینده مورد نظر | طراحی نوع راکتور | منبع |
|---|---|---|
| تولوئن | راکتورهای پیوسته و دسته ای | (۵۶) |
| بوتیرآلدهید | راکتور مسطح | (۵۷) |
| دی متیل دی سولفید | راکتور سیلندری | (۵۴) |
| ۲،۳-بوتادین | راکتور مسطح با منسوجات درخشان | (۵۳) |
| NOx | راکتور لوله ای، راکتور بستر ثابت | (۵۸) |
| $H_2S$ | راکتور لوله ای | (۵۹) |
| $SO_2$ | راکتور بستر ثابت | (۶۰) |
| $NH_3$ & $H_2S$ | راکتور مستطیلی | (۶۱) |

برخی از آلاینده‌های معدنی مانند آمونیاک، $NO_X$، $SO_X$، CO و $H_2S$ موجود در صنایع توسط راکتور فوتوکاتالیز حذف می‌شوند. با این وجود، این آلاینده‌ها کمتر موردمطالعه قرار گرفته اند(۴۶).

واکنش فوتوکاتالیستی را میتوان با تابش فوتون فعال کرد و در دمای اتاق و فشار اتمسفر اجرا نمود (۴۸). از معایب فوتوکاتالیست می‌توان گفت که فقط با تابش اشعه ماوراء بنفش فعال می‌شود و کارایی آن در محدوده نور مرئی می‌باشد. ترکیب مجدد بارهای نوری در سطح نیمه هادی نیز می‌تواند بازده فرآیند را کاهش دهد(۶۲).

**نوع کاتالیزور و عملکرد آن در تخلیه پلاسما**

کاتالیزورها به دو روش مهم عمل می‌کند، در روش اول، به منطقه تخلیه وارد می‌شود (کاتالیزور درون پلاسما، IPC(Intra-plasma catalysis))(۶۳). در روش دوم، گاز قبل از مواجهه با کاتالیزور به سمت ناحیه تخلیه که در پایین دست (کاتالیزور پس از پلاسما، PPC(Post-plasma catalysts) نصب می‌شود حرکت می‌کند(۵۰).

در اکثر ساختارهای راکتور با دانه‌های بسته، کاتالیزورها بر روی مهره‌های شیشه‌ای قرار می‌گیرند که نقش یک مانع دی‌الکتریک راکتور پلاسما را نیز بازی می‌کنند. علاوه بر این، $TiO_2$ را می‌توان در حالت خالص استفاده کرد یا روی یک تکیه‌گاه مانند سیلیکاژل و $Al_2O_3$ یا سایر مواد متخلخل قرار داد. همچنین $TiO_2$ را می‌توان بر روی فوم، کربن فعال و زئولیت رسوب داد. فرم پودری کاتالیزور را می‌توان برای پوشاندن سطح راکتور استفاده کرد. علاوه بر این، کاتالیزور را می‌توان روی تکیه‌گاه‌هایی مانند فایبرگلاس یا مواد کربن فعال قرار داد(۴۶).

**۸. تأثیر برخی از پارامترهای کلیدی بر راندمان حذف VOCs به عنوان آلاینده گازی با فناوری پلاسما**

**اثر رطوبت نسبی**

[ Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-27 ]

[ DOI: 10.18502/tkj.v15i3.13782 ]

پلاسما DBD با هوای خشک سازگار است. با این وجود، مولکول آب به طور طبیعی در آلاینده‌های موجود در هوا وجود دارند. بخار آب موجود در سیستم، ROS و RNS ناشی از تخلیه پلاسما را به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌دهد. این پدیده زمانی اتفاق می‌افتد که با الکترون‌های آزاد شده از تخلیه پلاسما یا با برخی از گونه‌های فعال که از واکنش‌های فوتوکاتالیستی سرچشمه می‌گیرد، واکنش می‌دهد(۶۴).

باید توجه داشت که رادیکال $HO^{\circ}$ تولید شده، اکسیدان قوی‌تری نسبت به سایر مواد می‌باشد. علاوه بر این، $HO^{\circ}$ فعالیت یک فوتوکاتالیست را با کاهش سرعت غیرفعال شدن آن پایدار می‌کند. رطوبت، کارایی فتوکاتالیز پلاسما را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد ولی در مطالعات اندکی اثرات نامطلوب نشان داده شده است. از طرفی، در صورت تخلیه فاز گاز، دبی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، پس از جذب در مقادیر بالاتر، رطوبت می‌تواند لایه‌ای ایجاد کند که از دسترسی به آلاینده‌ها و معرف‌ها جلوگیری می‌کند، در نتیجه کارایی تجزیه آلاینده توسط فوتوکاتالیست را کاهش می‌دهد(۴۶).

رطوبت نسبی گاز می‌تواند بر تخریب آلاینده‌ها و اثرات مضر مرتبط با ترکیب مجدد با رادیکال‌های آزاد تأثیر بگذارد. با این حال، این موضوع عمدتاً به شرایط عملیاتی مانند غلظت آلاینده بستگی دارد. ایجاد رادیکال‌های $HO^{\circ}$ به غلظت آب در واکنش بستگی دارد. از این رو، نرخ تخریب آلاینده‌ها می‌تواند با غلظت آب افزایش یابد. در مقابل، افزایش رطوبت نسبی بدون توجه به پیکربندی کوپلینگ (به عنوان مثال، راکتورهای نوع IPC یا PPC) نرخ تبدیل یا تجزیه آلاینده را کاهش می‌دهد. برخی از مطالعات تأیید کرده‌اند که رادیکال‌های HO باعث تبدیل CO به $CO_2$ می‌شوند، بنابراین منجر به افزایش نرخ کانی‌سازی در غلظت‌های بالاتر آب می‌شود. با این حال، مقدار ناکافی آب می‌تواند فوتوکاتالیست را مهار کند و در نتیجه گزینش‌پذیری آن را برای کانی‌سازی $CO_2$ کاهش دهد(۴۶).

وجود بخار آب، به ویژه در راکتورهای PPC، می تواند انتشار ازن را در خروجی راکتور کاهش دهد. با این حال، در رطوبت زیر ۳۰ درصد، غلظت ازن در سیستم IPC در مقایسه با پیکربندی پلاسما به تنهایی بی‌تأثیر است. علاوه بر این، رطوبت باعث کاهش انتشار $NO_2$ می‌شود و پس از آن، عمر مفید کاتالیزور را افزایش می‌دهد.

**اثر ولتاژ اعمال شده**

افزایش چگالی انرژی ورودی می‌تواند منجر به افزایش دبی پلاسما و افزایش غلظت الکترون‌های آزاد شده و انرژی‌های مربوط به آنها شود. متعاقبا، برخوردهای بیشتری با سایر گونه‌ها و آلاینده‌های موجود رخ می‌دهد. در نتیجه، غلظت ROS، مانند رادیکال‌های $O^{\circ}$ و $HO^{\circ}$ نیز افزایش می‌یابد که عمدتاً مسئول تخریب و کانی‌سازی آلاینده‌ها هستند. تولید $CO_2$ می‌تواند با افزایش چگالی انرژی افزایش یابد. علاوه بر این، لازم به ذکر است که غلظت ازن، در خروجی راکتور و همچنین انرژی ورودی، متناسب باشد. بنابراین، بهینه‌سازی چگالی انرژی تغذیه و انتخاب فوتوکاتالیست مناسب برای افزایش تجزیه آلاینده و کاهش غلظت ازن و $NO_x$ در خروجی راکتور ضروری است(۴۶).

**سایر پارامترهای مهم**

پارامترهای موردمطالعه برای تجزیه آلاینده‌ها در فرآیند هیبریدی پلاسما-فتوکاتالیستی شامل موارد زیر می‌شود:

۱. نرخ جریان
۲. غلظت آلاینده
۳. مقدار فوتوکاتالیست
۴. سطح اکسیژن در فاز گاز

افزایش جریان گاز خروجی و غلظت آلاینده‌ها باعث کاهش راندمان حذف و گزینش‌پذیری $CO_2$ می‌شود. بنابراین، تحقیقات بیشتری برای بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند و شرایط عملیاتی ضروری است(۴۶).

**۹. نتیجه‌گیری، محدودیت‌ها و چشم‌انداز آینده**

به منظور تجاری‌سازی فناوری پلاسما با مشکلاتی از جمله افزایش هزینه و به کارگیری فناوری مذکور در محیط واقعی روبرو هستیم. دوستدار محیط زیست کردن و کاهش مصرف انرژی ضروری به نظر می‌رسد. تلاش‌های تحقیقاتی اخیر دانشمندان در آینده نزدیک در راستای کارآمدتر کردن، سریع‌تر کردن و انعطاف‌پذیر کردن، کم‌هزینه‌تر کردن و دوستدار محیط زیست کردن سیستم‌های پیشرفته مبتنی بر پلاسمای سرد خواهد بود. در نهایت، باید در نظر داشت که به منظور افزایش قابلیت تجاری‌سازی، فناوری پلاسما باید در محل مورد نظر به کار گرفته شود. که نیازمند داشتن ویژگی‌های مناسبی از نظر طول عمر، دوام، ایمنی عملیاتی و عمر کاری مفید می‌باشد. برای استفاده طولانی مدت از این فناوری نیاز است، که بتوان به راحتی از امکانات موجود در

[ Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-27 ]
[ DOI: 10.18502/tkj.v15i3.13782 ]

محل، مانند منبع تغذیه (مثلاً تأسیسات شرکت‌های برق محلی) یا توسعه سیستم‌هایی با منبع تغذیه مبتنی بر انرژی خورشیدی یا بادی استفاده شود که در نهایت منجر به کاهش هزینه‌های عملیاتی تا ۶۰ درصد گردد(۱۲).

استفاده همزمان از کاتالیزورها و فناوری پلاسما به عنوان یک ابزار مفید برای افزایش تخریب آلایندهها و بهره‌وری انرژی در فرآیندها نشان داده شده است. با این وجود، برخی از عوامل محدودکننده، عمدتاً شامل هزینه کاتالیزورها، هزینه احتمالی مورد نیاز برای تثبیت آنها یا آلودگی ثانویه ناشی از آن باید قطعاً در نظر گرفته شود. بنابراین، هزینه به دست آمده از استفاده از کاتالیزورها باید با افزایش هزینه متناظر مورد نیاز برای غلبه بر محدودیت‌های آنها متعادل شود. میدان کاتالیزور پلاسما در ابتدای درک فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی زیربنایی است که زمینه ساز جفت شدن مولد پلاسما و کاتالیزورها را فراهم می نماید و از بینش علمی لازم برای طراحی منطقی یا بهبود سیستم‌های کاتالیزوری پلاسما فاصله زیادی دارد(۱۲).

عدم تولید فاضلاب و عدم نیاز به معرف از مزایای ترکیب پلاسمای تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD) و کاتالیزور می‌باشد. ترکیب پلاسمای تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD) و کاتالیزور به دلیل مصرف کم انرژی، روش‌های بسیار جذابی محسوب خواهند شد. با این حال، محصولات جانبی در فرایند ترکیب پلاسما و فوتوکاتالیست کاهش می‌یابد، مقدار $NO_x$ و ازن در خروجی راکتورها ناچیز خواهد بود. همه اینها یک چالش مهم است که نیازمند تحقیقات بیشتری است(۴۶).

**سپاس گزاری**

از دانشگاه علوم پزشکی اصفهان کمال تشکر و قدردانی را اعلام میداریم.

**تضاد منافع**

بین نویسندگان هیچگونه تعارضی در منافع وجود ندارد.

**ملاحظات اخلاقی**

این مطالعه مروری می باشد.

**سهم نویسندگان**

نویسندگان به طور یکسان در نگارش مقاله سهیم بوده اند.

**حمایت مالی**

این پژوهش حمایت مالی نداشته است.

## *References*

1. Li S, Dang X, Yu X, Abbas G, Zhang Q, Cao L. The application of dielectric barrier discharge non-thermal plasma in VOCs abatement: A review. Chemical Engineering Journal. 2020;388(5):124275.
2. Zhang S, Li L, Zhang C, Li G. ALA altered ABA content of winter oilseed rape (Brassica napus L.) seedling. Agricultural Science & Technology-Hunan. 2011;12(4):484-591.
3. Madani F, Hadian dehkordi M. An Overview of the Application of Plasma Technology in the Protection of Cultural and Historical Objects. journal of reaserch on archaeometry. 2018;4(1):81-94.
4. Ananthanarasimhan J, Lakshminarayana R, Anand M, Dasappa S. Influence of gas dynamics on arc dynamics and the discharge power of a rotating gliding arc. Plasma Sources Science and Technology. 2019;28(8):08501.۲
5. Reynamartínez R, Céspedes RN, Alonso MI, Acosta YR. Use of Cold Plasma Technology in Biomaterials and Their Potential Utilization in Controlled Administration of Active Substances. Journal Material Science. 2018;4(5):555649.
6. Tong R, Zhang L, Yang X, Liu J, Zhou P, Li J. Emission characteristics and probabilistic health risk of volatile organic compounds from solvents in wooden furniture manufacturing. Journal of cleaner production. 2019;208:1096-108.
7. Bahrami A, Nasrollahzadeh M, Alimohammadi I, Jaleh B, Abedi K, Ghorbani Shahna F, et al. The purfication of chloroform vapors using a novel non-thermal plasma reactor (2015). Iran Occupational Health. 2017;14(4):84-75.
8. Ebrahimi H, Bahrami A, Jalen B, Shahna FG. Gaseous chlorobenzene degradation by a novel non-thermal plasma reactor. Fresenius Environmental Bulletin. 2015;24(5A):1871-8.
9. Ekezie F-GC, Sun D-W, Cheng J-H. A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry: Current applications and future trends. Trends in Food Science & Technology. 2017;69:46-58.
10. Cai X, Du C. Thermal plasma treatment of medical waste. Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2021;41(1):1-46.
11. Cong L, Huang M, Zhang J, Yan W. Effect of dielectric barrier discharge plasma on the degradation of malathion and chlorpyrifos on lettuce. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2021;101(2):424-32.
12. Gururani P, Bhatnagar P, Bisht B, Kumar V, Joshi NC, Tomar MS, et al. Cold plasma technology: advanced and sustainable approach for wastewater treatment. Environmental Science and Pollution Research. 2021:1-21.
13. Aggelopoulos CA. Recent Advances of Cold Plasma Technology for Water and Soil Remediation: A Critical Review. Chemical Engineering Journal. 2021:131657.

[ Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-27 ]

[ DOI: 10.18502/tkj.v15i3.13782 ]

14. Fernandes FA, Rodrigues S. Cold Plasma Processing on Fruits and Fruit Juices: A Review on the Effects of Plasma on Nutritional Quality. Processes. 2021;9(12):2098.
15. Golda J, Held J, Redeker B, Konkowski M, Beijer P, Sobota A, et al. Concepts and characteristics of the 'COST Reference Microplasma Jet'. Journal of Physics D: Applied Physics. 2016;49(8):084003.
16. Iervolino G, Vaiano V, Palma V. Enhanced removal of water pollutants by dielectric barrier discharge non-thermal plasma reactor. Separation and Purification Technology. 2019;215:155-62.
17. Ferreira AR, Guedes P, Mateus EP, Ribeiro AB, Couto N. Emerging organic contaminants in soil irrigated with effluent: electrochemical technology as a remediation strategy. Science of The Total Environment. 2020;743:140544.
18. Ucar Y, Ceylan Z, Durmus M, Tomar O, Cetinkaya T. Application of cold plasma technology in the food industry and its combination with other emerging technologies. Trends in Food Science & Technology. 2021.
19. Zhan J, Zhang A, Héroux P, Guo Y, Sun Z, Li Z, et al. Remediation of perfluorooctanoic acid (PFOA) polluted soil using pulsed corona discharge plasma. Journal of hazardous materials. 2020;387:121688.
20. Berardinelli A, Pasquali F, Cevoli C, Trevisani M, Ragni L, Mancusi R, et al. Sanitisation of fresh-cut celery and radicchio by gas plasma treatments in water medium. Postharvest Biology and Technology. 2016;111:297-304.
21. Oh W-C, Choi J-G, Zhang F-J, Go Y-G, Chen M-L. Synthesis of expanded graphite-titanium oxide composite and its photocatalytic performance. Journal of the Korean Ceramic Society. 2010;47(3):210-5.
22. Ibrahimoglu B, Demircan CA, Kizisar SE, Yilmazoglu MZ, Turkes N, editors. Energy recovery from waste tires with plasma method. 2018 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT); 2018: IEEE.
23. Szałatkiewicz J. Metals recovery from artificial ore in case of printed circuit boards, using plasmatron plasma reactor. Materials. 2016;9(8):683.
24. Ma W, Fang Y, Chen D, Chen G, Xu Y, Sheng H, et al. Volatilization and leaching behavior of heavy metals in MSW incineration fly ash in a DC arc plasma furnace. Fuel. 2017;210:145-53.
25. Wang M, Mao M, Zhang M, Wen G, Yang Q, Su B, et al. Highly efficient treatment of textile dyeing sludge by CO2 thermal plasma gasification. Waste Management. 2019;90:29-36.
26. Cai X, Wei X, Du C. Thermal plasma treatment and co-processing of sludge for utilization of energy and material. Energy & Fuels. 2020;34(7):7775-805.
27. Changming D, Chao S, Gong X, Ting W, Xiange W. Plasma methods for metals recovery from metal–containing waste. Waste Management. 2018;77:373-87.
28. Yu H, Sun X, Solvang WD, Zhao X. Reverse logistics network design for effective management of medical waste in epidemic outbreaks: Insights from the coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak in Wuhan (China). International journal of environmental research and public health. 2020;17(5):1770.
29. Daletou M, Aggelopoulos C. Highly-energy efficient oxidation of MWCNT with nanosecond pulsed dielectric barrier discharge plasma. Applied Surface Science. 2021;563:150139.
30. Umair M, Jabbar S, Ayub Z, Muhammad Aadil R, Abid M, Zhang J, et al. Recent advances in plasma technology: Influence of atmospheric cold plasma on spore inactivation. Food Reviews International. 2021:1-23.
31. Preis S, Klauson D, Gregor A. Potential of electric discharge plasma methods in abatement of volatile organic compounds originating from the food industry. Journal of Environmental Management. 2013;114:125-38.
32. Ghorbani Shahna F, Bahrami A, Ebrahimi H. The hybrid effect of non-thermal plasma and activated carbon-zinc oxide nanocomposite on the removal of volatile organic compounds in air. Iran Occupational Health. 2017;14(4):24-13.
33. Hernández-Díaz D, Martos-Ferreira D, Hernández-Abad V, Villar-Ribera R, Tarrés Q, Rojas-Sola JI. Indoor PM2. 5 removal efficiency of two different non-thermal plasma systems. Journal of environmental management. 2021;278:111515.
34. Kim D-j, Shim Y-k, Park J, Kim H-j, Han J-g. Demonstration of organic volatile decomposition and bacterial sterilization by miniature dielectric barrier discharges on low-temperature cofired ceramic electrodes. Japanese Journal of Applied Physics. 2016;55(4):040302.
35. Nunayon SS, Zhang HH, Jin X, Lai AC. Experimental evaluation of positive and negative air ions disinfection efficacy under different ventilation duct conditions. Building and Environment. 2019;158:295-301.
36. Lai A, Cheung A, Wong M, Li W. Evaluation of cold plasma inactivation efficacy against different airborne bacteria in ventilation duct flow. Building and Environment. 2016;98:39-46.
37. Zhou P, Yang Y, Huang G, Lai AC. Numerical and experimental study on airborne disinfection by negative ions in air duct flow. Building and environment. 2018;127:204-10.
38. Santos CA, Phuong NH, Park MJ, Kim SB, Jo YM. Decomposition of indoor VOC pollutants using non-thermal plasma with gas recycling. Korean Journal of Chemical Engineering. 2020;37(1):120-9.
39. Karatum O, Deshusses MA. A comparative study of dilute VOCs treatment in a non-thermal plasma reactor. Chemical Engineering Journal. 2016;294:308-15.

[ Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-27 ]

[ DOI: 10.18502/tkj.v15i3.13782 ]

40. Schiavon M, Torretta V, Casazza A, Ragazzi M. Non-thermal plasma as an innovative option for the abatement of volatile organic compounds: a review. Water, Air, & Soil Pollution. 2017;228(10):1-20.
41. Guo C, Gao Z, Shen J. Emission rates of indoor ozone emission devices: A literature review. Building and Environment. 2019;158:302-18.
42. Holzer F, Kopinke F-D, Roland U. Non-thermal plasma treatment for the elimination of odorous compounds from exhaust air from cooking processes. Chemical Engineering Journal. 2018;334:1988-95.
43. Cho MS, Ko HJ, Kim D, Kim KY. On-site application of air cleaner emitting plasma ion to reduce airborne contaminants in pig building. Atmospheric environment. 2012;63:276-81.
44. Park JH, Yoon KY, Hwang J. Removal of submicron particles using a carbon fiber ionizer-assisted medium air filter in a heating, ventilation, and air-conditioning (HVAC) system. Building and Environment. 2011;46(8):1699-708.
45. Liu G, Xiao M, Zhang X, Gal C, Chen X, Liu L, et al. A review of air filtration technologies for sustainable and healthy building ventilation. Sustainable cities and society. 2017;32:375-96.
46. Khezami L, Nguyen-Tri P, Saoud WA, Bouzaza A, El Jery A, Nguyen DD, et al. Recent progress in air treatment with combined photocatalytic/plasma processes: A review. Journal of Environmental Management. 2021;299:113588.
47. Huu TP, Sivachandiran L, Da Costa P, Khacef A. Methane, Propene and Toluene Oxidation by Plasma-Pd/γ-Al 2 O 3 Hybrid Reactor: Investigation of a Synergetic Effect. Topics in Catalysis. 2017;60(3-5):326-32.
48. Abou Saoud W, Assadi AA, Guiza M, Bouzaza A, Aboussaoud W, Ouederni A, et al. Study of synergetic effect, catalytic poisoning and regeneration using dielectric barrier discharge and photocatalysis in a continuous reactor: Abatement of pollutants in air mixture system. Applied Catalysis B: Environmental. 2017;213:53-61.
49. Zhang Z, Yan X, Gao F, Thai P, Wang H, Chen D, et al. Emission and health risk assessment of volatile organic compounds in various processes of a petroleum refinery in the Pearl River Delta, China. Environmental pollution. 2018;238:452-61.
50. Assadi AA, Loganathan S, Tri PN, Gharib-Abou Ghaida S, Bouzaza A, Tuan AN, et al. Pilot scale degradation of mono and multi volatile organic compounds by surface discharge plasma/TiO2 reactor: Investigation of competition and synergism. Journal of hazardous materials. 2018;357:305-13.
51. Neyts EC. Plasma-surface interactions in plasma catalysis. Plasma chemistry and plasma processing. 2016;36(1):185-212.
52. Abou Saoud W, Assadi AA, Kane A, Jung A-V, Le Cann P, Gerard A, et al. Integrated process for the removal of indoor VOCs from food industry manufacturing: Elimination of Butane-2, 3-dione and Heptan-2-one by cold plasma-photocatalysis combination. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 2020;386:112071.
53. Abou Saoud W, Kane A, Le Cann P, Gérard A, Lamaa L, Peruchon L, et al. Innovative photocatalytic reactor for the degradation of VOCs and microorganism under simulated indoor air conditions: Cu-Ag/TiO2-based optical fibers at a pilot scale. Chemical Engineering Journal. 2021;411:128622.
54. Vickers NJ. Animal communication: when i'm calling you, will you answer too? Current biology. 2017;27(14):R713-R5.
55. Boyjoo Y, Sun H, Liu J, Pareek VK, Wang S. A review on photocatalysis for air treatment: From catalyst development to reactor design. Chemical engineering journal. ۲۰۱۷;۵۳۷:۳۱۰-۵۹.
56. Pham T-D, Lee B-K. Novel adsorption and photocatalytic oxidation for removal of gaseous toluene by V-doped TiO2/PU under visible light. Journal of hazardous materials. 2015;300:493-503.
57. Gharib-Abou Ghaida S, Assadi AA, Costa G, Bouzaza A, Wolbert D. Association of surface dielectric barrier discharge and photocatalysis in continuous reactor at pilot scale: Butyraldehyde oxidation, by-products identification and ozone valorization. Chemical Engineering Journal. 2016;292:276-83.
58. Hu Y, Song X, Jiang S, Wei C. Enhanced photocatalytic activity of Pt-doped TiO2 for NOx oxidation both under UV and visible light irradiation: a synergistic effect of lattice Pt4+ and surface PtO. Chemical Engineering Journal. 2015;274:102-12.
59. Alonso-Tellez A, Robert D, Keller V, Keller N. H 2 S photocatalytic oxidation over WO 3/TiO 2 Hombikat UV100. Environmental Science and Pollution Research. 2014;21(5):3503-14.
60. Liu H, Yu X, Yang H. The integrated photocatalytic removal of SO2 and NO using Cu doped titanium dioxide supported by multi-walled carbon nanotubes. Chemical Engineering Journal. 2014;243:465-72.
61. Maxime G, Amine AA, Abdelkrim B, Dominique W. Removal of gas-phase ammonia and hydrogen sulfide using photocatalysis, nonthermal plasma, and combined plasma and photocatalysis at pilot scale. Environmental Science and Pollution Research. 2014;21(22):13127-37.
62. Palau J, Assadi AA, Penya-Roja J, Bouzaza A, Wolbert D, Martínez-Soria V. Isovaleraldehyde degradation using UV photocatalytic and dielectric barrier discharge reactors, and their combinations. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 2015;299:110-7.
63. Jo J-O, Trinh HQ, Kim SH, Mok YS. Simultaneous removal of hydrocarbon and CO using a nonthermal plasma-catalytic hybrid reactor system. Chemical Engineering Journal. 2016;299:93-103.

[ Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-27 ]

[ DOI: 10.18502/tkj.v15i3.13782 ]

64. Abidi M, Hajjaji A, Bouzaza A, Trablesi K, Makhlouf H, Rtimi S, et al. Simultaneous removal of bacteria and volatile organic compounds on Cu2O-NPs decorated TiO2 nanotubes: Competition effect and kinetic studies. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 2020;400:112722.

[ Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-27 ]

[ DOI: 10.18502/tkj.v15i3.13782 ]

# *Review of the application of plasma technology in air pollution control*

***Ordudari Z [1*], Rismanchian M[2]***

[1] PhD Student, Student Research Committee, Department of Occupational Health and Safety Engineering, Faculty of Health, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran.
[2] Department of Occupational Health and Safety Engineering, Faculty of Health, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran.

## *Abstract*

***Introduction:*** Plasma is considered the fourth state of matter. Non-thermal plasma is more popular due to its unique features such as easy operation, quick reaction at ambient temperature, and short residence time. In this study, the application of plasma technology in air pollution control will be reviewed.

***Materials and Method:*** In this study, Science Direct, Google Scholar, ISI, Scopus, and Pubmed search engines were used. The keywords searched included plasma, cold plasma, thermal plasma, air pollution control, and non-thermal plasma from 2016 to 2022.

***Results:*** Plasma catalysis is a useful tool for increasing pollutant degradation and energy efficiency in processes. Nevertheless, some limiting factors including the cost of catalysts, the possible cost required for their stabilization, and the resulting secondary pollution must be taken into account.

***Conclusion:*** To commercialize plasma technology, we are facing problems such as increasing the cost and applying the mentioned technology in the real environment. The simultaneous use of catalysts and plasma technology is a useful tool to increase the destruction of pollutants and energy efficiency in processes. No wastewater production and no need for reagents are advantages of the combination of dielectric barrier discharge plasma and catalyst. The combination of dielectric barrier discharge plasma and catalyst will be very attractive methods due to low energy consumption. It seems that the recent research will be in the direction of increasing efficiency, increasing speed, and flexibility, reducing the cost and energy consumption, and making the advanced systems based on cold plasma more environmentally friendly.

***Keywords:*** Plasma, Cold Plasma, Control, Air Pollution

***This paper should be cited as:***
Ordudari Z, Rismanchian M. Review of the application of plasma technology in air pollution control. Occupational Medicine Quarterly Journal. 2023; 15(3): 78-93.

**** Corresponding Author:***
***Email: zordudari@gmail.com***
***Tel: +98 9137896877***
***Received: 26.03.2023*** ***Accepted: 21.05.2023***

[ Downloaded from tkj.ssu.ac.ir on 2026-11-27 ]

[ DOI: 10.18502/tkj.v15i3.13782 ]