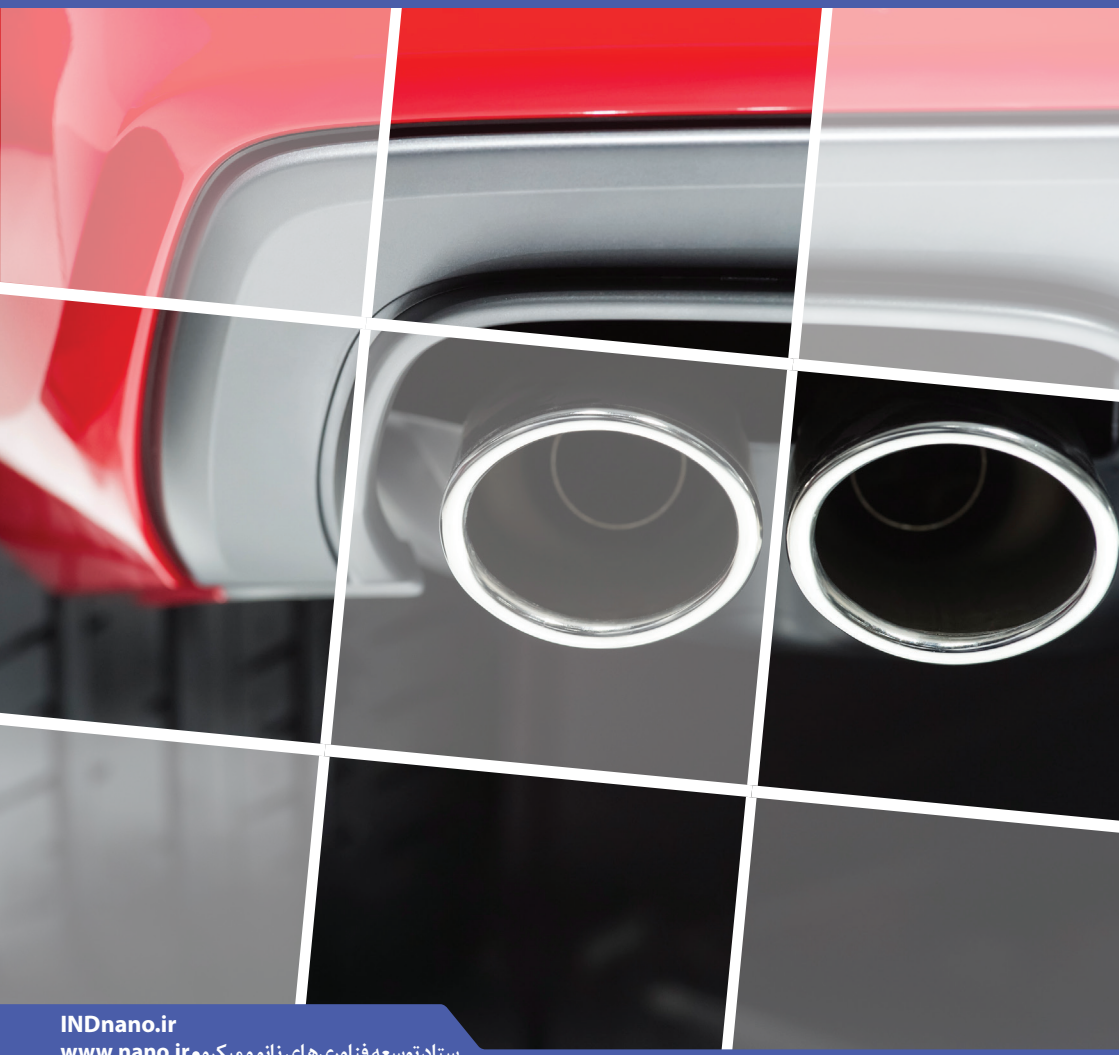
نانو و صنعت

مجموعه گزارش‌های صنعتی فناوری نانو • گزارش شماره ۲۶۹ | حوزه آب، پساب و محیط زیست

به‌کارگیری مبدل‌های نانوکاتالیستی در اگزوز خودرو برای دستیابی به هوای پاک



INDnano.ir

ستاد توسعه فناوری‌های نانو و میکرو • www.nano.ir

شناسنامه

ستاد توسعه فناوری‌های نانو و میکرو

گروه رصد و تولید محتوای بخش ترویج صنعتی

طراحی و اجرا:	توسعه فناوری مهرویژن	تلفن:	۰۲۱-۶۳۱۰۰
نظارت:	داود قرایلو	نمابر:	۰۲۱-۶۳۱۰۶۳۱۰
صندوق پستی:	۳۴۴-۱۴۵۶۵		
پست الکترونیک:	IND@nano.ir	پایگاه اینترنتی:	www.nano.ir www.INDnano.ir
سال انتشار:	۱۴۰۳		
نویسنده:	شرکت پیشگامان فناوری دریچه	اینستاگرام نانو و صنعت:	@INDnano.ir

محتواهای صنعتی و فناورانهٔ خود را از طریق پست الکترونیک و پایگاه اینترنتی نانو و صنعت (INDnano.ir) ارسال نمایید.

فهرست مطالب

آلودگی هوا با دود اگزوز خودروها ۳
مبدل کاتالیستی چیست؟ ۳
عملکرد مبدل کاتالیستی ۴
تأثیر فناوری نانو بر افزایش بازده کاتالیست خودرو ۵
محصولات داخلی ۶
بازار مبدل‌های نانوکاتالیستی ۷
پی‌نوشت‌ها ۸
منابع ۸

آلودگی هوا با دود اگزوز خودروها

هوای سالم یکی از عوامل مؤثر بر سلامتی و افزایش کیفیت زندگی انسان است. هر فرد در هر دقیقه به‌طور متوسط ۱۵۰،۰۰۰ سانتی‌متر مکعب هوا وارد ریه خود و از آن خارج می‌کند، ازاین‌رو داشتن هوای پاک یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های بشر محسوب می‌شود [۱].

آلودگی محیط‌زیست ازجمله پیامدهای ناخواسته فناوری است و خودروها یکی از منابع اصلی تولید آلاینده‌های هوا و همچنین ایجاد پدیده‌های ثانویه ناشی از آلودگی هوا همچون اثر گلخانه‌ای و باران‌های اسیدی هستند. استفاده از تمامی سازوکارها که در جهت کاهش آلودگی‌های محیط‌زیستی پاسخگوی نیازها باشد، همواره موردتوجه قرار گرفته است. یکی از این ابزارها، به‌کارگیری مبدل‌های کاتالیستی در مسیر اگزوز خودروهاست. مبدل کاتالیستی وسیله‌ای است که در سیستم خروجی موتور خودرو نصب می‌شود و با استفاده از کاتالیست‌ها، ترکیبات مضر خروجی موتور را به ترکیبات بی‌ضرر تبدیل می‌نماید. مبدل‌های کاتالیستی از دهه ۷۰ میلادی با هدف کاهش آلودگی هوا، بر سر راه گازهای خروجی موتورهای بنزینی نصب شده‌اند. جدیدترین و مرسوم‌ترین نوع آن‌ها، مبدل‌های سه‌منظوره هستند که اولین نوع آن‌ها در ۱۹۷۶ در آمریکا برای موتورهای بنزینی اجباری شد [۲, ۳].

مبدل کاتالیستی چیست؟

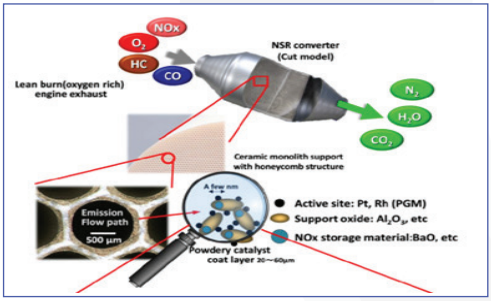
مبدل کاتالیستی قطعه‌ای در خروجی اگزوز خودروهای بنزینی یا دیزلی است که وظیفه تبدیل گازهای خروجی مضر به ترکیبات بی‌ضرر را بر عهده دارد. این فرایند براساس انجام واکنش‌هایی است که در حضور کاتالیست به وقوع می‌پیوندد. بنابراین مهم‌ترین بخش هر مبدل کاتالیستی، ذرات کاتالیست هستند. مبدل‌های کاتالیستی با توجه به اینکه چه تعداد آلاینده را به ترکیب‌های بی‌خطر تبدیل می‌کنند به مبدل‌های دومنظوره، سه‌منظوره و چهارمنظوره تقسیم می‌شوند که با توجه به نوع نیاز استفاده می‌شود [۴].

در مبدل‌های کاتالیستی از فلزات پلاتین، پالادیوم و رودیوم به‌عنوان کاتالیست استفاده می‌شود که به فلزات گروه پلاتین یا PGM[1] معروف هستند، هرکدام از این فلزات تأثیر خاصی در تبدیل گازهای خروجی از اگزوز خودرو به گازهای کم‌ضرر دارند. افزایش پلاتین موجب افزایش تبدیل CO و HC (هیدروکربن با سوختن ناقص)، افزایش پالادیوم موجب افزایش تبدیل گازهای HC، CO و NOx می‌شود و در نهایت افزایش رودیوم عملکرد مبدل را در تبدیل NOx بهبود می‌بخشد [۴].

هر مبدل کاتالیستی سه جزء اصلی دارد: مونولیت سرامیکی، پایه کاتالیست و ذرات کاتالیست (شکل ۱). مونولیت سرامیکی یک قطعه سرامیکی است که معمولاً از جنس کوردیریت است و آنچه که با چشم غیرمسلح از ساختار کلی مبدل کاتالیستی دیده می‌شود، در واقع همان مونولیت است. ساختار مونولیت باید به‌نحوی باشد که سطح زیادی را در دسترس قرار دهد. مونولیت‌ها، استوانه‌ای شکل با سطح مقطع دایره یا بیضی هستند که مجاری بسیار ریزی با مقطع چندضلعی دارند که نوع مربعی و شش‌ضلعی آن‌ها که ساختار لانه‌زنبوری دارند، از انواع مرسوم مونولیت‌ها هستند. از گاما آلومینا به‌عنوان پایه کاتالیست استفاده می‌شود و همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، PGM هم به‌عنوان کاتالیست در این مبدل‌ها به کار می‌رود [۵].

نحوه ساخت مبدل کاتالیستی به این صورت است که ابتدا گاما آلومینا بر روی سطح مونولیت تثبیت می‌شود سپس مونولیت درون دوغاب حاوی PGM قرار داده می‌شود و ذرات کاتالیست بر روی گاما آلومینا نشانده می‌شوند [۵].

مبدل‌های کاتالیستی حاوی فلزات گروه پلاتین شامل پالادیوم، پلاتین و رودیوم و ترکیباتی ازجمله آلومینا و سریم اکساید هستند. با وجود مزایای برجسته فلزات گروه پلاتین در ساختار مبدل‌های کاتالیستی، استفاده از این ترکیبات مشکلاتی را نیز به همراه دارد. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در استفاده از فلزات گروه پلاتین، بحث هزینه بالا و منابع محدود این فلزات است [۷].



شکل ۱- ساختار مبدل کاتالیستی در بزرگ‌نمایی‌های مختلف [۶]

برخی مبدل‌های کاتالیستی معمولی حاوی تقریباً ۹ گرم پلاتین است که این میزان فلز گران‌بها موجب افزایش قیمت مبدل‌های کاتالیستی می‌شود [۸]

عملکرد مبدل کاتالیستی

همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد، آلودگی‌های خروجی از اگزوز به‌شدت بر کیفیت هوا تأثیر می‌گذارند. فناوری‌های مختلفی مانند بهبود در طراحی موتور، پیش تصفیه سوخت، استفاده از افزودنی‌های سوخت و سوخت‌های جایگزین با آلایندگی کمتر، تنظیم بهتر فرایند احتراق و... برای کاهش سطوح انتشار آلاینده از وسایل نقلیه در نظر گرفته شده‌اند. اما علیرغم برخورداری از فناوری‌های مختلف برای کاهش تولید آلاینده‌های موتورهای احتراق داخلی، مبدل کاتالیستی بهترین راه‌حل برای کاهش آلاینده‌ها در مرحله پس از تولید آن‌ها در موتورهای بنزینی و دیزلی است. مبدل کاتالیستی بین لوله اگزوز و منیفولد اگزوز نصب می‌شود. اگزوز، حاوی گازهای مضر مانند NOx، CO، HC، ذرات معلق و دوده است. همه این آلاینده‌های خروجی از درون مبدل عبور می‌کنند که در آن کاتالیست بدون واکنش با آلاینده‌ها، این گازها را طی واکنش‌های شیمیایی به دی‌اکسید کربن، آب، اکسیژن و نیتروژن تبدیل می‌کند (شکل ۲) [۹].

در مبدل‌های کاتالیستی، سه واکنش رخ می‌دهد که به شرح زیر است [۹]:

- دو واکنش اکسایش که در آن مونوکسید کربن به دی‌اکسید کربن و ترکیبات HC به دی‌اکسیدکربن و آب تبدیل می‌شوند.

$$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$$

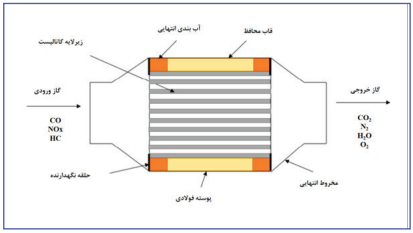
- یک واکنش کاهش که در آن NOx به اکسیژن و نیتروژن تبدیل می‌شود.

$$2NOx \rightarrow xO_2 + N_2$$

کاتالیست‌ها در واکنش مصرف نمی‌شوند اما با جذب ترکیبات واکنش‌دهنده روی سطح خود و کاهش در مقدار انرژی فعال‌سازی واکنش، سرعت انجام واکنش را بالاتر می‌برند. عوامل متعددی بر کارایی مبدل کاتالیستی تأثیر می‌گذارد، مانند دمای مبدل کاتالیستی به‌ویژه در ابتدای روشن‌کردن خودرو، ظرفیت ذخیره‌سازی اکسیژن، غیرفعال‌شدن کاتالیست، ترکیب شیمیایی کاتالیست و هندسه داخلی مبدل کاتالیستی. مطالعه این عوامل به محققان اجازه می‌دهد تا کارایی مبدل‌های کاتالیستی را بهبود بخشند.

تأثیر دمای مبدل کاتالیستی بر بازده آن در ثانیه‌های ابتدایی روشن‌کردن خودرو را شروع سرد[۲] می‌نامند. از

لحظه روشن‌کردن خودرو و عبور دود خروجی از مبدل کاتالیستی، به‌تدریج دمای کاتالیست افزایش می‌یابد و بازده فرایند کاتالیستی نیز افزایش می‌یابد. به دمایی که در آن بازده فرایند تبدیل به ۵۰درصد می‌رسد دمای فعال‌سازی[۳] می‌گویند و به زمانی که طول می‌کشد کاتالیست به این دما برسد، زمان فعال‌سازی[۴] اطلاق می‌شود. آلاینده‌های منتشر شده در فرایند شروع سرد، ۶۰ تا ۸۰درصد از کل آلاینده‌ها را به خود اختصاص می‌دهد. ازاین‌رو تلاش‌های فراوانی برای کاهش زمان فعال‌سازی انجام شده و در دست اقدام است. روش‌های کاهش این مدت زمان به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. در روش فعال سعی بر آن است که با گرم‌کردن مبدل کاتالیستی از طریقی به‌جز جذب گرمای اگزوز (به‌عنوان‌مثال از طریق سامانه‌های تولید گرمای الکتریکی) آن را در مدت زمان کوتاه‌تری گرم کنند. در روش‌های غیرفعال سعی می‌شود که به‌نحوی گرمای بیشتری از سمت اگزوز توسط مبدل کاتالیستی جذب شود. یک مثال از آن کم‌کردن فاصله خروجی اگزوز و مبدل کاتالیستی است [۹,۳].



شکل ۲- طرح کلی از مبدل کاتالیستی خودرو، گازهای آلاینده ورودی و گازهای خروجی [۹]

تأثیر فناوری نانو بر افزایش بازده کاتالیست خودرو

فناوری نانو از چند طریق توانسته است در بهبود کارایی و کاهش قیمت مبدل‌های کاتالیستی نقش‌آفرینی کند که در ادامه به آن پرداخته شده است.

کاهش میزان مصرف مواد فعال PGM

علی‌رغم استفاده از مواد جایگزین مختلف به‌عنوان کاتالیست در مبدل‌های کاتالیستی، به‌دلیل بازده بسیار بالای فلزات نجیب مانند PGM، این دسته از مواد هنوز جایگزینی ندارند. برای کاهش میزان مصرف مواد فعال در مبدل‌های کاتالیستی و در نتیجه کاهش قیمت آن، یکی از روندهایی که مد نظر قرار دارد، کاهش اندازه ذرات مواد فعال است. با کاهش اندازه ذرات در ابعاد نانومتری، نسبت سطح به حجم به‌شدت افزایش می‌یابد. ازآنجاکه فرایند کاتالیستی یک فرایند وابسته به سطح است با کاهش اندازه ذرات کاتالیست می‌توان با استفاده از مقدار کمتری از مواد فعال به همان میزان سطح در دسترس برای فعالیت کاتالیستی دست یافت. ازاین‌رو با استفاده از از مقدار کمتری کاتالیست می‌توان بازده تبدیل مناسبی داشت. به همین دلیل اندازه ذرات PGM در مبدل‌های کاتالیستی به‌مرورزمان کاهش یافته است.

شرکت مزدا موتور در سال ۲۰۰۷ برای اولین بار مبدل‌های کاتالیستی با استفاده از نانوذرات PGM را به بازار عرضه کرد. درحالی‌که مبدل‌هایی با اندازه ذرات کاتالیست حدود ۲۰ نانومتر تولید می‌شده است در طی زمان این میزان به کمتر از ۱۰ نانومتر کاهش یافته است. درحال‌حاضر مبدل‌های کاتالیستی ساخته می‌شوند که اندازه ذرات کاتالیست پلاتین و پالادیوم در آن‌ها کمتر از ۳ نانومتر است [۹, ۳].

نقش فناوری نانو در افزایش سطح مونولیت

هندسه مبدل کاتالیستی نیز از اهمیت فراوانی برخوردار است. مبدل کاتالیستی باید در عین حال که سطح ویژه بالایی فراهم می‌کند، خروج گاز را نیز با اختلال مواجه نکند. به همین دلیل از مونولیت‌های سرامیکی و گاهی فلزی استفاده می‌شود. این مونولیت‌ها گرچه سطح ویژه بالایی در مقیاس ماکروسکوپی فراهم می‌نمایند اما در مقیاس میکروسکوپی، سطوح مناسبی برای جذب مولکول‌ها نیستند. ازاین‌رو لازم است که سطح ویژه آن‌ها در مقیاس میکروسکوپی هم افزایش یابد. به این منظور یک لایه نازک از ماده‌ای متخلخل که در اغلب موارد گاما آلومیناست، بر روی مونولیت نشانده می‌شود. گاما آلومینا ساختار نانومتخلخل دارد و سطح ویژه را در مقیاس میکروسکوپی به‌شدت افزایش می‌دهد. اکنون مونولیت آماده است که پذیرای مواد فعال یا همان ذرات کاتالیست شود.

استفاده از نانوذرات ذخیره‌کننده اکسیژن برای افزایش بازده مبدل نانوکاتالیستی

در کنار گاما آلومینا به‌عنوان بستر تثبیت‌کننده نانوذرات فعال، از اکسیدهای سریم نیز بهره گرفته می‌شود که نقش عوامل ذخیره‌کننده اکسیژن را دارند و به افزایش بازده واکنش، کمک می‌کنند. نانوساختارهای سریم اکسید مانند نانوذره و نانومیله به‌صورت تجاری در ساختار مبدل‌های کاتالیستی به کار برده می‌شوند. حضور سریم علاوه‌بر این که واکنش‌های اکسایش و کاهش را تقویت می‌کند، منجر به پایداری لایه حاوی فلزات فعال و افزایش مقاومت حرارتی کاتالیست می‌شود [۳, ۱۰].

معرفی نانومواد فعال جدید و ارزان‌تر

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، گروه PGM مرسوم‌ترین مواد فعال موجود در مبدل‌های کاتالیستی هستند. به‌دلیل قیمت بالای این مواد، یکی از روندهای فناوری در این حوزه، معرفی کاتالیست‌های ارزان‌تر است که نقش فناوری نانو در این زمینه بی‌بدیل است. ازجمله کاتالیست‌های ارزان‌تر به‌عنوان جایگزین PGM می‌توان به کاتالیست مس، کاتالیست مس-روی، پرووسکایت ($CaTiO_3$)، باریم اکسید و منیزیم اکسید اشاره کرد که در اغلب موارد بازده تبدیل بالا از طریق ایجاد نانوساختارهایی از این مواد به دست آمده است [۳, ۹].

استفاده از نانومواد برای ساخت مونولیت با خاصیت نانوکاتالیستی

از دیگر روندهایی که برای کاهش قیمت مبدل کاتالیستی موردتوجه قرار دارد، تولید مونولیت از موادی ارزان‌قیمت است که هم‌زمان بتواند به‌عنوان کاتالیست هم عمل کند. به‌عنوانِ‌مثال استفاده از زئولیت‌ها به‌عنوان موادی نانوساختار، پایدار و با سطح ویژه بالا به این منظور در پژوهش‌های بسیاری گزارش شده است اما هنوز با تجاری‌شدن فاصله دارد [۳].

برای جمع‌بندی این بخش باید گفت که به‌طور کلی فناوری نانو موجب شده است که مصرف کاتالیست به حداقل برسد. همچنین بهبود کارایی مبدل کاتالیستی با استفاده از فناوری نانو در محصولات جدید موجب شده که نسبت به محصولاتی که با فناوری ۶ سال پیش تولید می‌شدند، قیمت مبدل کاتالیستی به یک‌سوم کاهش یابد و این در حالی است که به‌لحاظ کیفی نیز استانداردهای یورو ۴، یورو ۵ و یورو ۶ محقق شده است [۷, ۱۱, ۱۲].

محصولات داخلی

درحال‌حاضر چندین شرکت داخلی مبدل‌های نانوکاتالیستی تولید و به بازار عرضه می‌کنند که در ادامه

معرفی می‌شوند. ایران‌دلکو یکی از شرکت‌های تولیدکننده مبدل کاتالیستی با فناوری نانو است. شرکت ایران دلکو در سال ۱۳۷۰ در تهران تأسیس شد. در سال ۱۳۸۴ خط تولید مبدل‌های کاتالیستی یورو ۲ با انتقال دانش فنی از شرکت InterKat آلمان شروع شد. واحد تحقیق و توسعه محصول این شرکت در سال ۱۳۸۷ راه‌اندازی و سرانجام پس از ۳ سال هزینه و تلاش مداوم، در سال ۱۳۹۰ موفق به دستیابی به فناوری تولید مبدل‌های کاتالیستی با استاندارد آلایندگی یورو ۴ شد.

این شرکت با استفاده از فناوری نانو در کاتالیست خودرو، موفق به دستیابی به فناوری تولید مبدل‌های کاتالیستی با استاندارد آلایندگی یورو ۴ و ۵ شده است. در این مبدل‌های کاتالیستی همه فلزات گران‌بها ازجمله پلاتین، پالادیوم و رودیوم به‌صورت نانوذرات در تمامی سطوح پایه کاتالیستی که دارای تخلخلی بالا هستند، توزیع شده است. گروه بهمن، مگا موتور، ساپکو، سازه‌گستر، زامیاد، اگزوز خودرو خراسان، پارس خودرو، سازه پویش، گروه صنعتی صابر، گروه خودروسازی سایپا، ایپکو، گروه خودروسازی ایران خودرو، قطعه‌سازان میثاق و پارس اگزوز شرکت‌های طرف قرارداد ایران دلکو هستند. ایران دلکو مبدل‌های نانوکاتالیستی خود را به کشورهای ترکیه، پاکستان و منطقهٔ آسیای میانه (CIS) صادر کرده است [۱۱].

شرکت پرتوفرازان آویژه کیمیا نیز با استفاده از فناوری نانو، کاتالیست‌هایی تولید می‌کند که آلاینده‌های خروجی از اگزوز خودرو را به حداقل می‌رساند. کاتالیست‌های نانویی شرکت پرتوفرازان برای هر خودرو بسته به نوع آن، بنزین‌سوز یا گازسوز بودن و فناوری موتور آن‌ها متفاوت است. در واقع بخش تحقیق و توسعه این شرکت مطابق شرایط هر خودرو فرمولاسیونی منطبق با شرایط استاندارد برای تولید کاتالیست نانویی در نظر گرفته است.

شرکت صنعت آفرین ماهان نیز ازجمله تولیدکنندگان مبدل‌های نانوکاتالیستی است که برای انواع خودروهای داخلی نظیر پراید، کوییک و تیبا مبدل تولید می‌کند. این شرکت مبدل‌های کاتالیستی را برای محدوده وسیعی از خودروهای بنزینی و دوگانه‌سوز تولید می‌کند. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، هر یک از مواد فعال، بر روی یکی از واکنش‌های تبدیل گازهای آلاینده تأثیر بیشتری دارد. از آن جا که ترکیب دود خروجی موتور خودروهای مختلف متفاوت است، ترکیب مواد فعال در کاتالیست‌ها نیز به همین میزان تغییر می‌کند.

شرکت عایق خودرو توس در سال ۱۳۷۹ با هدف تولید عایق‌های صدا و ارتعاش تأسیس شد. این شرکت یک خط کاملاً پیشرفته تولید کاتالیست خودرو با توان تولید ۴۵۰،۰۰۰ قطعه در سال را دارد.

بازار مبدل‌های نانوکاتالیستی

انتظار می‌رود اندازه بازار جهانی مبدل‌های کاتالیستی خودرو از ۴۶٫۴ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۳ به ۸۳٫۱ میلیارد دلار تا سال ۲۰۳۰ افزایش یابد. در طول دوره پیش‌بینی، رشد سالانه حجم بازار، ۸٫۸ درصد خواهد بود [۱۳].

از میان تمام انواع مبدل‌های کاتالیستی، مبدل‌های سه‌منظوره بیشترین سهم از بازار (حدود ۶۰ درصد) را دارند و سهم آن‌ها از بازار تا سال ۲۰۳۰ افزایشی نیز خواهد بود [۱۴]. به‌لحاظ جغرافیایی بیشترین سهم بازار مربوط به آسیا-اقیانوسیه خواهد بود چراکه ۵۵ درصد از خودروهای جهان در این منطقه تولید می‌شوند [۱۵].

گرچه گسترش استفاده از خودروهای الکتریکی تهدیدی برای استفاده از مبدل‌های کاتالیستی محسوب می‌شود، اما سخت‌گیرانه‌ترشدن استانداردها به‌ویژه در زمینه خودروهای سواری و دیزلی و پتانسیل‌هایی که به‌واسطهٔ فناوری نانو برای بهبود کارایی مبدل‌های کاتالیستی وجود دارد، موجب می‌شود مبدل‌های کاتالیستی، بازار روبه‌رشدی را داشته باشند [۱۵]. با توجه به تولید سالانه بیش از ۱,۲۰۰,۰۰۰ خودرو در کشور و با احتساب کاتالیست‌های موردنیاز برای تعویض کاتالیست‌های فرسوده و همچنین ظرفیت تولید شرکت‌های تولیدکننده داخلی، به نظر می‌رسد حجم بازار مبدل‌های کاتالیستی در داخل کشور حدود ۵,۰۰۰,۰۰۰ قطعه مبدل کاتالیستی در سال باشد [۱۶].

پی‌نوشت‌ها

۱ Platinum Group Metals

۲ Cold Start

۳ Light-off Temperature

۴ Light-off Time

منابع

۱ A. Tarat. (2024). https://alitarat.com/; Oxygen Therapy.

۲ sanatekhodro.com/mag/ID/3604;

۳ L. Robles-Lorite, R. Dorado-Vicente, E. Torres-Jiménez, G. Bombek, and L. Lešnik, "Recent Advances in the Development of Automotive Catalytic Converters: A Systematic Review," Energies, vol. 16, p. 6425, 2023.

۴ م. عزیزی، م. فرامرزی، و م. علیزاده شادباد، «تأثیر درصد فلزات گران‌بها (PGM) بر عملکرد مبدل کاتالیستی»، ارائه شده در هفتمین کنگره ملی شیمی و مهندسی شیمی با تأکید بر فناوری‌های بومی ایران، ۱۳۹۹.

۵ R. Chaudhary and M. Thakur, "Environmental Pollution Control Using Nano-Particles in SI Engines," International Journal of Science and Research (IJSR), 2015.

۶ Y. Nagai, A. Kato, M. Iwasaki, and K. Kishita, "Mechanistic insights into NOx storage-reduction (NSR) catalyst by spatiotemporal operando X-ray absorption spectroscopy," Catalysis Science & Technology, vol. 9, 02/14 2019.

۷ indnano.ir/15411

۸ indnano.ir/14943

۹ E. Kritsanaviparkporn, F. M. Baena-Moreno, and T. Reina, "Catalytic converters for vehicle exhaust: fundamental aspects and technology overview for newcomers to the field," Chemistry, vol. 3, pp. 630-646, 2021.

۱۰ Z. Wiecka, I. Cota, B. Tylkowski, and M. Regel-Rosocka, "Recovery of platinum group metals from spent automotive converters and their conversion into efficient recyclable nanocatalysts," Environmental Science and Pollution Research, vol. 30, pp. 90168-90179, 2023.

۱۱ indnano.ir/11700

۱۲ indnano.ir/11109

۱۳ vynzresearch. (2022). https://www.vynzresearch.com/automotive-transportation/automotive-catalytic-converter-market.

۱۴ Mordor-Intelligence. (2021). https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/automotive-catalytic-converter-market.

۱۵ Markets-and-Markets, "https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/catalytic-converter-systems-market-128255548.html," 2020.

۱۶ www.irna.ir/news/85062047