نانو و صنعت

مجموعه گزارش‌های صنعتی فناوری نانو • گزارش شماره ۲۷۱

حوزه نفت

کاربرد نانوکاتالیست‌های انتقال آب-گاز بر افزایش خلوص هیدروژن

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	پایگاه اینترنتی:	www.nano.ir
پست الکترونیک:	IND@nano.ir		www.INDnano.ir
سال انتشار:	۱۴۰۳	اینستاگرام نانو و صنعت:	@INDnano.ir
نویسنده:	شرکت پیشگامان فناوری دریچه		

فهرست مطالب

- اهمیت تولید هیدروژن ۳
- نقش نانوکاتالیست‌ها در واکنش انتقال آب-گاز ۳
- نانوکاتالیست‌های WGS دما پایین بر پایه مس ۶
- فناوری نانو برای بهبود نانوکاتالیست‌های WGS ۶
- محصولات داخلی ۸
- بازار داخلی و جهانی نانوکاتالیست‌ها ۹
- پی‌نوشت‌ها ۱۱
- منابع ۱۱

اهمیت تولید هیدروژن

بشر از دیرباز برای تأمین انرژی موردنیاز خود از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌کرده است. کاهش در دسترس بودن این منابع انرژی تجدیدناپذیر به دلیل افزایش مصرف و اثرات نامطلوب ناشی از آن بر محیط زیست، محققان را بر آن داشته است تا بر روی جایگزین‌هایی برای آن‌ها از میان انواع منابع انرژی تجدیدپذیر و پاک تمرکز کنند. هیدروژن یکی از گزینه‌های امیدوارکننده است که می‌تواند جایگزینی تجدیدپذیر و پاک‌تر برای سوخت‌های فسیلی مرسوم باشد [۱].

یکی دیگر از مواردی که تولید هیدروژن با خلوص بالا را بسیار پر اهمیت می‌کند، نیاز به هیدروژن با خلوص بالا برای مصرف در فرایندهای مختلف صنعتی است. هیدروژن در چندین حوزه صنعتی به مقدار زیاد مورداستفاده قرار می‌گیرد. هیدروژن در پالایش نفت، سنتز آمونیاک از طریق فرآیند Haber-Bosch و فرآوری فلزاتی مانند نیکل (Ni)، تنگستن (W)، مولیبدن (Mo)، مس (Cu)، روی (Zn)، سرب (Pb) و اورانیوم (U) استفاده می‌شود. هیدروژن همچنین در ساخت کودهای نیتروژن‌دار، هیدرودی‌سولفوریزاسیون و تصفیه هیدورژنی فرآورده‌های نفتی، هیدروژنه کردن پسماندهای خطرناک (PCBها، دیوکسین‌ها و...)، سنتز اتانول، متانول و دی متیل اتر، تهیه سوخت‌های مایع مصنوعی به روش Fischer-Tropsch و به‌عنوان سوخت کوره‌های صنعتی با دمای بالا و موشک‌های فضایی استفاده می‌شود [۱].

فرآیند انتقال آب-گاز (WGS)[۱] یکی از قدیمی‌ترین واکنش‌های کاتالیستی ناهمگن است که در صنعت برای تولید هیدروژن با خلوص بالا و کاهش کربن مونوکسید از گاز سنتز[۲] به کار می‌رود. واکنش WGS شامل واکنش بین CO و آب روی یک کاتالیست مناسب برای غنی‌سازی مخلوط گازی با H_2 است. واکنش انتقال آب-گاز در حال حاضر به‌طور گسترده برای تولید هیدروژن از کربن فسیلی و همچنین از ذخایر زیست‌توده تجدیدپذیر استفاده می‌شود. به‌طور سنتی، کاتالیست‌های آهن-کروم (Fe-Cr) و مس-روی (Cu-Zn) به ترتیب برای تسهیل واکنش WGS در دماهای بالا و پایین استفاده می‌شدند. اما در طول سال‌ها، فناوری کاتالیست واکنش WGS به‌طور چشم‌گیری پیشرفت کرده است و برای کمک به واکنش حتی در محدوده دمای متوسط و دستیابی به تبدیل CO بالاتر، به‌طور مناسبی اصلاح شده است [۱, ۲].

در این گزارش ابتدا نقش نانوکاتالیست‌ها در واکنش WGS بررسی می‌شود و در ادامه به نقش فناوری نانو در بهبود کارایی این نانوکاتالیست‌ها پرداخته می‌شود. در پایان نیز بازار این دسته از نانوکاتالیست‌ها و محصولات نانوی ایرانی در این حوزه معرفی خواهند شد.

نقش نانوکاتالیست‌ها در واکنش انتقال آب-گاز

همان‌طور که گفته شد، افزایش کاربردهای هیدروژن در حوزه‌های مختلف، منجر به توسعه مستمر آن از اواسط قرن هجدهم شده است. حدود ۹۵ درصد از نیاز جهانی هیدروژن فعلی از طریق فرایند ریفرمینگ اولیه با بخار آب[۳] تولید می‌شود. در این فرایند مواد کربنی طبیعی با منشأ زغال‌سنگ و نفت خام به‌عنوان مواد اولیه به کار می‌روند که از جمله آن‌ها می‌توان به گاز طبیعی و برش‌های سبک نفت مانند نفتا اشاره کرد [۱].

رفرمینگ متان با بخار آب در حال حاضر پرکاربردترین روش برای تولید هیدروژن است. در این فرآیند، متان و بخار آب واکنش می‌دهند و منجر به تولید H_2 و CO می‌شوند. استفاده از مخلوط گازی CO و H_2 در بسیاری از کاربردها امکان‌پذیر نیست چرا که CO منجر به مسموم شدن نانوکاتالیست در فرایندهای پتروشیمی و الکترودهای پلاتین در پیل‌های سوختی و متعاقباً منجر به غیرفعال شدن آن‌ها می‌شود. واکنش انتقال آب-گاز یکی از روش‌های مرسوم برای حذف CO نامطلوب در صنعت است که به کمک آن می‌توان غلظت CO را در مخلوط گازی به محدوده استاندارد رساند [۱, ۳, ۴].

گاز حاصل از ریفرمینگ که به آن گاز سنتز نیز گفته می‌شود، حاوی کربن مونواکسید (CO) و هیدروژن (H_2) است. واکنش انتقال آب-گاز مرحله میانی است که برای کاهش درصد CO و غنی‌سازی هیدروژن در گاز سنتز استفاده می‌شود.

فرایند ریفرمینگ اولیه با بخار آب، یک مخلوط گازی تولید می‌کند که حاوی هیدروژن به همراه مقادیر قابل‌توجهی CO است. این CO از طریق واکنش WGS مصرف می‌شود و در واکنش با آب به تولید CO_2 و هیدروژن اضافی منجر می‌شود. اساساً مخلوطی از CO و بخار آب از طریق واکنش WGS به CO_2 و H_2 تبدیل می‌شود:

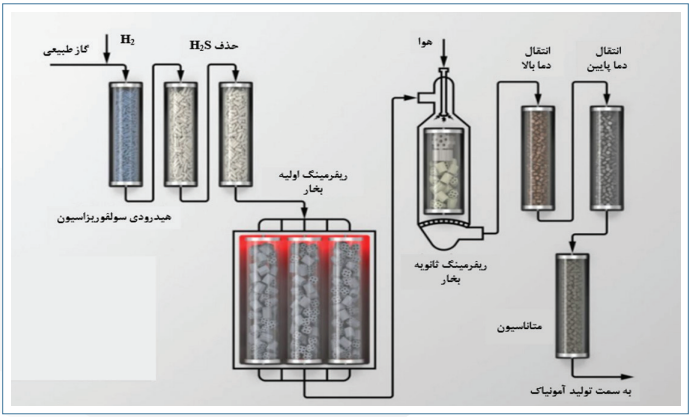
$$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 \Delta H_{298^\circ C} = -41.09\ kJ.mol^{-1}$$

این واکنش نسبتاً گرماده است به همین دلیل وقوع آن به لحاظ ترمودینامیکی در دمای پایین و به لحاظ سینتیکی در دمای بالا محتمل‌تر است اما تغییر فشار، تأثیری بر آن ندارد. فرایند WGS فرایندی مهم برای تولید هیدروژن عاری از CO و یا تنظیم نسبت H_2/CO است [۱].

برای دستیابی به هیدروژن با خلوص بالا و در مقیاس‌های صنعتی از گاز سنتز، نیاز به انتخاب نانوکاتالیست مناسب برای تسهیل در انجام واکنش است. نانوکاتالیست‌های WGS در دو دسته کلی قرار می‌گیرند: نانوکاتالیست‌های انتقال دما بالا (HTS[۴]) و نانوکاتالیست‌های انتقال دما پایین (LTS[۵]). در ابتدا نانوکاتالیست‌های آهن اکسید-کروم اکسید برای واکنش‌های WGS معرفی شدند که در خط تولید آمونیاک مورداستفاده قرار می‌گرفتند. این نانوکاتالیست‌ها این توانایی را داشتند تا بتوانند غلظت CO را به ۲ تا ۴٪ مولی در گاز خروجی برسانند. این نانوکاتالیست‌ها تنها در دمایی بین ۳۱۰ تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد فعال بودند و به همین دلیل به نانوکاتالیست‌های انتقال دما بالا معروف شدند. فعالیت نانوکاتالیستی این دسته از نانوکاتالیست‌ها با کاهش دما به شدت کاهش می‌یابد. همچنین به دلیل درصد به نسبت بالای CO در گاز خروجی برای رسیدن به غلظت ۱٪ مولی برای CO در هیدروژن خروجی، نیاز است تا فرایند با استفاده از چندین راکتور و بستر نانوکاتالیستی به وقوع بپیوندد و میان هر راکتور نیز سامانه خنک‌سازی وجود داشته باشد [۱, ۳].

بعد از این دسته از نانوکاتالیست‌ها، نوع جدیدی از نانوکاتالیست‌ها معرفی شدند که بر پایه مس بودند و در دمای پایین‌تری در حدود ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد عمل می‌کردند. غلظت CO در گاز خروجی در حضور این نانوکاتالیست‌ها بین ۰٫۱ تا ۰٫۳٪ مولی بود و به نانوکاتالیست‌های انتقال دما پایین شناخته شدند. نانوکاتالیست‌های پایه مس نسبت به ترکیبات گوگردی موجود در هیدروکربن‌ها حساس هستند و غیرفعال می‌شوند در حالی که نانوکاتالیست‌های بر پایه آهن چندان به گوگرد حساس نیستند [۱].

واکنش WGS به‌صورت تجاری و در صنعت با استفاده از دو راکتور آدیاباتیک انجام می‌شود که در بخش اول انتقال دما بالا به وقوع می‌پیوندد (راکتور HTS) و در ادامه در بخش دوم، انتقال دما پایین رخ می‌دهد (راکتور LTS) و میان این دو بخش، سامانه سرمایش برای کاهش دما تعبیه می‌شود تا دمای ورودی مرحله دوم برای انتقال دما پایین مناسب باشد (شکل ۱). دمای بالا در راکتور اول موجب می‌شود به لحاظ سینتیکی بهینه‌تر باشد و سرعت بالای مصرف شدن CO را در پی دارد و موجب می‌شود که درصد بالای CO با سرعت بالایی کاهش یابد. در راکتور دوم بهینه‌سازی ترمودینامیکی مدنظر است و ازاین‌رو دما پایین‌تر است و انتخاب‌پذیری بالاتری برای مصرف CO که طی مرحله قبل، غلظت آن به شدت کاهش یافته است، دارد. به همین دلیل می‌تواند غلظت آن را به ۰٫۱ تا ۰٫۳ درصد برساند. همچنین برای محافظت از نانوکاتالیست مس در برابر گوگرد یک بستر محافظ پیش از راکتور LTS قرار داده می‌شود تا ترکیبات حاوی گوگرد را به حداقل برساند [۱, ۳].



شکل ۱- طرح کلی فرایند تولید و CO‌زدایی از H_2 برای تولید آمونیاک (مثال شماتیک: شرکت گسترش فناوری خوارزمی). گام اول در فرآیند تولید آمونیاک، تولید هیدروژن از گاز طبیعی است که شامل چندین فرآیند متمایز است. در ابتدا، گاز سنتز از گاز طبیعی با استفاده از فرآیند ریفرمینگ تولید می‌شود. سپس مونوکسیدکربن با استفاده از راکتورهای شیفت در واکنش با بخار آب به هیدروژن و کربن دی اکسید تبدیل می‌شود. انتقال آب گاز در دو راکتور سری که اولی دما بالا و دومی دما پایین است، انجام می‌شود. قبل از تولید گاز سنتز، گاز طبیعی باید عاری از آلودگی‌هایی باشد که اثرات نامطلوبی بر کاتالیزورهای پایین دست دارد و بایستی حذف شود. گاز طبیعی معمولاً حاوی غلظت‌های مختلفی از ترکیبات گوگردی به شکل سولفید هیدروژن و یا اجزای حاوی گوگرد آلی است [۵].

ترکیب نانوکاتالیست HTS به‌طور مرسوم، ۷۴٫۲٪ Fe_2O_3، ۱۰٫۰٪ Cr_2O_3، ۰٫۲٪ MgO و باقیمانده آن، ترکیبات فرار هستند. ترکیب شیمیایی نانوکاتالیست LTS نیز مخلوطی از ZnO، CuO و Al_2O_3/Cr_2O_3 است که دو مثال از ترکیبات مرسوم نانوکاتالیست‌های LTS به شرح زیر است [۴]:

- ۶۸-۷۳٪ ZnO، ۱۵-۲۰٪ CuO، ۹-۱۴٪ Cr_2O_3، ۲-۵٪ Mn و مابقی اکسیدهای Al و Mg
- ۳۲-۳۳٪ CuO، ۳۴-۵۳٪ ZnO و ۱۵-۳۳٪ Al_2O_3

نانوکاتالیست‌های LTS از طریق تزریق هم‌زمان محلول اسیدی (خوراک) حاوی یون‌های فلزی مس، روی و آلومینیوم از یک‌سو و محلول قلیایی تنظیم‌کننده pH (به‌عنوان مثال کربنات سدیم) از سوی دیگر حاصل می‌شود. مقدار pH باید در تمام طول تزریق (ترسیب) در محدوده مطلوب، ثابت بماند [۶].

نانوکاتالیست‌های WGS دما پایین بر پایه مس

اولین نانوکاتالیست WGS دما پایین بر پایه مس در سال ۱۹۶۳ معرفی شد که از CuO و ZnO با نسبت ۱ به ۲، تشکیل شده بود. کمی بعد مشخص شد که افزودن آلومینا به ساختار این نانوکاتالیست‌ها می‌تواند پایداری گرمایی را افزایش دهد و مقاومت در برابر مسموم شدن نانوکاتالیست را بهبود بخشد. ازاین‌رو نانوکاتالیست‌های ترکیبی از اکسیدهای ZnO ، CuO و Al_2O_3 به‌صورت تجاری و به‌طور گسترده مورداستفاده قرار گرفتند. فلز مس موجود در این نانوکاتالیست‌ها فعالیت نانوکاتالیستی و انتخاب‌پذیری بالایی را در دمای پایین از خود نشان می‌داد بنابراین نانوکاتالیست مناسبی برای واکنش WGS در دمای پایین و در غلظت کم CO بود. این نانوکاتالیست‌ها در بازه ۱۵۰ تا ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد فعال هستند و مقدار بهینه آن بین ۲۰۰ تا ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد است. کاهش CuO و دیگر ترکیبات شیمیایی حاوی مس، یک عامل مهم برای افزایش فعالیت نانوکاتالیستی است. از طرفی فعالیت نانوکاتالیستی این دسته از نانوکاتالیست‌ها متناسب با سطح در دسترس از مس فلزی است و چندان به نسبت Al/Zn وابسته نیست. فعالیت نانوکاتالیستی نانوکاتالیست‌های سه‌تایی معرفی شده وابستگی زیادی به تشکیل ساختار اسپینل از اکسیدهای Cu-Al-Zn دارد چراکه منجر به تشکیل ذرات بسیار ریز مس بر روی سطح پایه نانوکاتالیست می‌شود و سطح فعال را افزایش می‌دهد. بر اساس مطالب گفته شده، برای بهبود کارایی این دسته از نانوکاتالیست‌ها نخست باید شرایطی فراهم شود که ذرات فلزی مس در کوچک‌ترین اندازه بر روی سطح پراکنده شوند و دیگر آن‌که این ذرات در طول فرایند نانوکاتالیستی، تجمع نکنند و به هم نپیوندند و ذرات بزرگ‌تری را تشکیل ندهند. این نقش را تا حد زیادی حضور Al_2O_3 ایفا می‌کند و در واقع نقش یکی پروموتر ساختاری[۶] را دارد [۳].

فناوری نانو برای بهبود نانوکاتالیست‌های WGS

کاتالیست‌های بر پایه مس در کنار مزایایی که دارند از مشکل غیرفعال شدن[۷] رنج می‌برند. سه دلیل عمده برای این پدیده گزارش شده است:

- تف جوشی گرمایی که منجر به کاهش سطح ویژه نانوکاتالیستی می‌شود.
- مسموم شدن توسط گوگرد که مسدود شدن نواحی فعال نانوکاتالیستی و کاهش سرعت جابه‌جایی واکنش‌دهنده‌هایی که بر روی سطح جذب شده‌اند را در پی دارد.
- مسموم شدن توسط کلر که تف جوشی نانوکاتالیست و در نتیجه درشت شدن ذرات ماده فعال را سرعت می‌بخشد.

ازاین‌رو در کنار استفاده از نانوکاتالیست‌های مرسوم و سنتی مس-روی همواره تلاش‌های فراوانی برای معرفی

نانوکاتالیست‌هایی با بازده بالاتر، پایداری و انتخاب‌پذیری بیش‌تر موردتوجه بوده است. این تلاش‌ها در دو دسته کلی قرار می‌گیرند:

- معرفی نانوکاتالیست‌هایی با ترکیب شیمیایی جدید از طریق بررسی اثر توأمان ماده فعال و پایه نانوکاتالیست بر روی ویژگی‌های مطلوب نانوکاتالیست
- استفاده از نانوساختارها

ازاین‌رو از طرفی نانوکاتالیست‌های نوینی بر پایه سریا (CeO_2)، نانوکاتالیست‌های جدید بر پایه کربن و نانوکاتالیست‌های بر پایه فلزات نجیب، معرفی شده‌اند و از طرف دیگر، نانوکاتالیست‌های مرسوم و یا نانوکاتالیست‌های جدید در ابعاد نانومتری تولید و موردبررسی قرار گرفته‌اند. در نتیجه می‌توان گفت که فناوری نانو مسیرهای فراوانی را برای بهبود خواص این دسته از نانوکاتالیست‌ها گشوده است. در زمینه بهبود خواص نانوکاتالیست WGS، هم بر روی ماده فعال نانوکاتالیستی و هم بر روی پایه نانوکاتالیست، تمرکز شده است. در مورد تأثیر فناوری نانو بر روی نانوکاتالیست‌ها می‌توان گفت که با کوچک شدن اندازه ذرات در ابعاد نانومتری، سطح ویژه فعال بیشتری جهت فرایندهای نانوکاتالیستی در دسترس قرار می‌گیرد [۱، ۳].

در کنار نانوکاتالیست‌های بر پایه آهن و مس نانوکاتالیست‌های بر پایه نیکل، کبالت، مولیبدن، طلا، پلاتین، رودیم و روتنیم از دیگر مواد فعال نانوکاتالیستی برای واکنش WGS محسوب می‌شوند. همچنین مرسوم‌ترین پایه نانوکاتالیست‌ها در این حوزه، ZnO، Al_2O_3 و SiO_2 هستند. پایه نانوکاتالیست‌های TiO_2 و CeO_2 نیز جزء پایه نانوکاتالیست‌های نوین هستند که به دلیل توانایی در ذخیره‌سازی اکسیژن، خواص عالی به‌عنوان پروموتر ایفا کرده‌اند. کبالت و مولیبدن به لحاظ مقاومت در برابر مسموم شدن با گوگرد خواص مناسبی را از خود نشان داده‌اند. فلزات نجیب نیز فعالیت نانوکاتالیستی بالایی برای واکنش WGS دارند اما فعالیت نانوکاتالیستی آن‌ها به شدت به پایه نانوکاتالیست وابسته است [۱، ۴].

یکی از موادی که به شدت به‌عنوان پایه نانوکاتالیست برای جایگزینی با نانوکاتالیست‌های مرسوم WGS مدنظر قرار دارد، سریا (CeO_2) است. گرچه سریا و مواد بر پایه سریا فعالیت نانوکاتالیستی مناسبی برای واکنش WGS از خود نشان نداده‌اند اما به دلیل وجود جای خالی اکسیژن و ذخیره‌سازی اکسیژن در داخل ساختار خود، مشاهده شده است که در هنگامی که به‌عنوان پایه نانوکاتالیست مورداستفاده قرار می‌گیرد، به خوبی به‌عنوان یک پروموتر می‌تواند میزان فعالیت نانوکاتالیستی را افزایش دهد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد مس یکی از نانوکاتالیست‌های مرسوم LTS است. پژوهش‌ها نشان داده است که مس، چه به‌صورت ذرات بر روی سطح سریا به‌عنوان پایه نانوکاتالیست و چه به‌صورت مس عنصری حل شده در ساختار سریا، فعالیت نانوکاتالیستی مناسبی از خود نشان داده است [۱].

همچنین مشاهده شده است که اگر چه طلا در ابعاد بزرگ در واکنش WGS فعالیت نانوکاتالیستی اندکی از خود نشان می‌دهد اما نانوذرات طلا بر روی پایه نانوکاتالیست سریا، نه تنها فعالیت نانوکاتالیستی دارند بلکه بازده واکنش بالایی را از خود نشان می‌دهند. بازده واکنش نانوکاتالیستی در ابعاد نانومتری، بیش از مقدار طلا متأثر از اندازه ذرات طلاست. اندازه نانوذرات طلا در این حالت با توجه به روش تولید، ۲ تا ۶ نانومتر است و بیش‌ترین

فعالیت نانوکاتالیستی را نانوذرات طلای ۲ نانومتری از خود نشان داده است. با آلاییدن[۸] نانوکاتالیست طلا-سریا با فلزات La و Gd نیز شاهد افزایش فعالیت نانوکاتالیستی خواهیم بود [۱, ۴].

استفاده از سریا به‌عنوان پایه نانوکاتالیست و نشاندن نانوذرات فلزات واسطه (Fe، Ni، Cr و...) یا فلزات نجیب (Pd، Pt و...) بر روی آن از دیگر تلاش‌هایی است که برای معرفی یک نانوکاتالیست بهینه برای فرایند WGS در حال انجام است. در این دسته از نانوکاتالیست‌ها سریا نیز می‌تواند نانوساختار باشد که استفاده از نانوساختارهای تک‌بعدی مانند نانوالیاف سریا به‌عنوان پایه نانوکاتالیست به شدت موردتوجه قرار دارد [۱].

از دیگر مسیرهای مبتنی بر فناوری نانو برای دستیابی به نانوکاتالیست‌های WGS بهینه می‌توان به نانوکاتالیست‌های با پایه نانوکاتالیست کربنی اشاره کرد. کربن فعال یکی از پایه نانوکاتالیست‌های مناسبی است که برای این دسته از نانوکاتالیست‌ها به نحو مطلوبی عمل می‌کند. فعالیت نانوکاتالیستی کربن فعال همراه با نانوذرات آهن اکسید، مس و فلزات نجیب، بر روی واکنش WGS نتایج مناسبی در پی داشته است. همچنین نانولوله کربنی به‌عنوان پایه نانوکاتالیست با انواع مواد فعال فلزی و اکسید فلزی، موردبررسی قرار گرفته است [۱, ۳].

محصولات داخلی

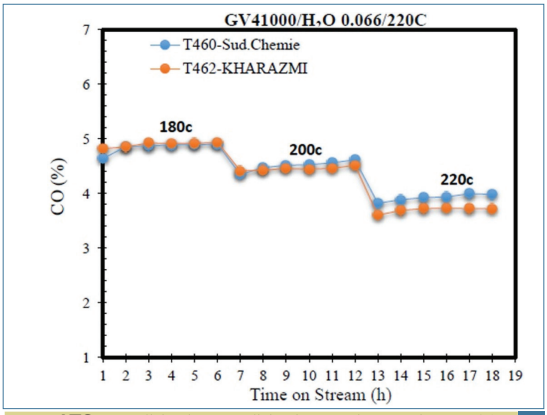
با توجه به اهمیت نانوکاتالیست انتقال آب-گاز دما پایین برای کشور و محدودیت‌هایی که در تأمین آن وجود دارد، شرکت گسترش فناوری خوارزمی یکی از شرکت‌های فناور و تواناست که این نوع نانوکاتالیست در آن بومی‌سازی شده است. شرکت دانش‌بنیان گسترش فناوری خوارزمی با بیش از ۱۵ سال سابقه پژوهش و فناوری، فعالیت خود را در جهت توسعه دانش فنی تولید نانوکاتالیست‌های صنعتی در ایران، رسماً از سال ۱۳۸۹ آغاز کرد و در حال حاضر موفق به تولید طیف گسترده‌ای از نانوکاتالیست‌های مورداستفاده در صنعت فولاد، پالایش و پتروشیمی شده است [۶].

خوارزمی گسترش فناوری

علاوه بر نانوکاتالیست انتقال آب-گاز دما پایین، انواع نانوکاتالیست‌های ریفرمینگ احیای مستقیم، انواع نانوکاتالیست ریفرمینگ دارای کاربرد در پالایشگاه‌ها و صنایع پتروشیمی، نانوکاتالیست اتوترمال، نانوکاتالیست انتقال آب ـ گاز دما بالا، نانوکاتالیست‌های پیش ریفرمینگ، نانوکاتالیست‌های متاناسیون، نانوکاتالیست‌های سنتز متانول و نانوکاتالیست‌های هیدرودیسولفوریزاسیون از دیگر محصولات این شرکت است [۲].

فلز فعال نانوکاتالیستی در نانوکاتالیست LTS تولید شده توسط گسترش فناوری خوارزمی، مس است که پس از احیای نانوکاتالیست درون راکتور و تبدیل اکسید مس به مس، خاصیت نانوکاتالیستی پیدا می‌کند. برای بیشینه کردن کارایی این نانوکاتالیست‌ها لازم است که آن‌ها بیشترین سطح فعالیت نانوکاتالیستی را داشته باشند. با ورود فناوری نانو به این صنعت و تولید نانوکاتالیست‌های با سطح فعال قابل توجه، تحولی عظیم در کارایی آن‌ها به‌وجود آمده است. دستیابی به ریزساختار نانو حاوی ذرات با ابعاد کمتر از ۲۰ نانومتر در این محصول سطح فعال بیشتر برای محصول و به دنبال آن اکتیویته بیشتری را به همراه داشته است. به‌منظور بررسی خاصیت

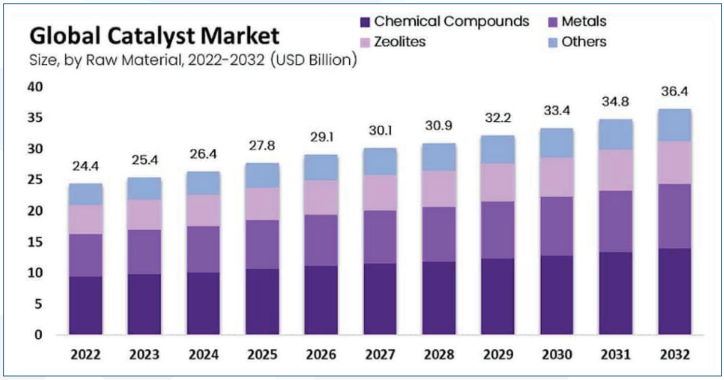
نانوکاتالیستی این محصول، آزمون در سیستم نانوکاتالیستی (Catatest) روی نمونه تولید شده و یک نمونه صنعتی (شرکت Sud-Chemie) انجام و گازهای خروجی با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی اندازه‌گیری شد. مقایسه نتایج حاصل از آزمون نانوکاتالیستی نمونه تولید شده و نمونه صنعتی، بیانگر انطباق بسیار مناسب این دو محصول است (شکل ۲) [۲].



شکل ۲- مقایسه خاصیت نانوکاتالیستی نانوکاتالیست LTS شرکت گسترش فناوری خوارزمی و شرکت Sud Chemie [۲].

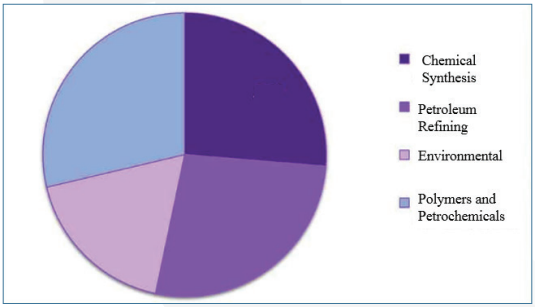
بازار داخلی و جهانی نانوکاتالیست‌ها

اندازه بازار جهانی نانوکاتالیست‌ها در سال ۲۰۲۲، ۲۴٫۲ میلیارد دلار بوده است که با رشد سالانه ۴٫۲ درصد تا سال ۲۰۳۲ به ۳۶٫۴ میلیارد دلار افزایش خواهد یافت. به لحاظ جنس نانوکاتالیست‌ها مشاهده می‌شود که نانوکاتالیست‌های فلزی پس از ترکیبات شیمیایی، بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۳) [۷].



شکل ۳- اندازه بازار نانوکاتالیست ها در بازه زمانی سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۳۲ به تفکیک مواد اولیه [۷].

از منظر کاربرد، نانوکاتالیست‌ها در چهار کاربرد عمده تقسیم‌بندی می‌شوند: سنتز شیمیایی، پالایش نفت، کاربردهای محیط‌زیستی و پلیمر و پتروشیمی که از میان آن‌ها در سال ۲۰۲۲، سنتز شیمیایی با ۲۶٫۳ درصد، بیش‌ترین سهم بازار را در اختیار داشته است (شکل ۴) [۷].



شکل ۴- بازار جهانی نانوکاتالیست‌ها در طی یک سال به تفکیک حوزه کاربرد [۷].

همان‌طور که مشاهده می‌شود بازار نانوکاتالیست‌ها بازار روبه رشدی است. به‌طور خاص در مورد نانوکاتالیست‌های انتقال آب-گاز نیز بازار روبه رشدی پیش‌بینی می‌شود. توسعه صنایع مصرف‌کننده هیدروژن همچون نفت، گاز و پتروشیمی، صنایع شیمیایی و صنایع فلزی و همچنین توجه فراوان به هیدروژن به‌عنوان سوخت پاک، دو پیشران اصلی در جهت رشد و توسعه این نانوکاتالیست‌ها محسوب می‌شوند.

در بازار داخلی نیز به دلیل توسعه صنعت پتروشیمی، بازار روبه رشدی برای نانوکاتالیست‌های LTS پیش‌بینی می‌شود. به‌عنوان مثال با توجه به تعداد واحدهای فعلی و برنامه آتی توسعه تولید آمونیاک در ایران (مجموعاً ۱۴ واحد)، تولید نانوکاتالیست واحد LTS حائز اهمیت فراوان است. ازاین‌رو لازم است تا نیازهای اساسی و استراتژیک این صنعت (همچون نانوکاتالیست) در داخل کشور تأمین و تولید شود. میزان مصرف سالانه نانوکاتالیست انتقال دما پایین یا LTS در کشور ۳۵۰ تن در سال است و با احتساب قیمت خرید این نانوکاتالیست از منابع خارجی که در حدود ۲۰ یورو به ازای هر کیلوگرم است، بومی‌سازی تولید این محصول می‌تواند علاوه بر افزودن دانش فنی تولید یک محصول استراتژیک صنعتی به توانمندی‌های کشور، سالیانه از ارزبری معادل ۷ میلیون یورو جلوگیری کند [۶].

پی‌نوشت‌ها

۱ Water-Gas Shift (WGS)

۲ Syn-Gas

۳ Steam Reforming

۴ High Temperature Shift Catalysts

۵ Low Temperature Shift Catalysts

۶ Structural Promoter

۷ Deactivation

۸ Doping

منابع

۱ D. B. Pal, R. Chand, S. Upadhyay, and P. Mishra, "Performance of water gas shift reaction catalysts: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 93, pp. 549-565, 2018.

۲ Nanoproduct, کاتالیست انتقال آب-گاز دما پایین, ۱۳۹۸.

۳ E. Baraj, K. Ciahotný, and T. Hlinčík, "The water gas shift reaction: Catalysts and reaction mechanism," *Fuel*, vol. 288, p. 119817, 2021.

۴ P. Ebrahimi, A. Kumar, and M. Khraisheh, "A review of recent advances in water-gas shift catalysis for hydrogen production," *Emergent Materials*, vol. 3, pp. 881-917, 2020.

۵ Khwarizmico, "https://khwarizmico.com/products/petrochemical-catalysts/ammonia-units; واحدهای آمونیاک", ۱۴۰۲

۶ Nanoproduct, "https://nanoproduct.ir/news/66302, فناوری نانو کاتالیست‌ها را کارآمدتر می‌کند", ۱۳۹۸.

۷ Market.Us, "https://market.us/report/catalyst-market/," 2023.

از مجموعه گزارش‌های صنعتی فناوری‌نانو در صنعت حوزه نفت منتشر شده است:

■ کاربردهای صنعتی نانوذرات در بهبود خواص روانکاری

■ تأثیر استفاده از فناوری نانو در عملکرد کاتالیست‌های پایه آلومینا و کاهش هزینه‌های ناشی از آن