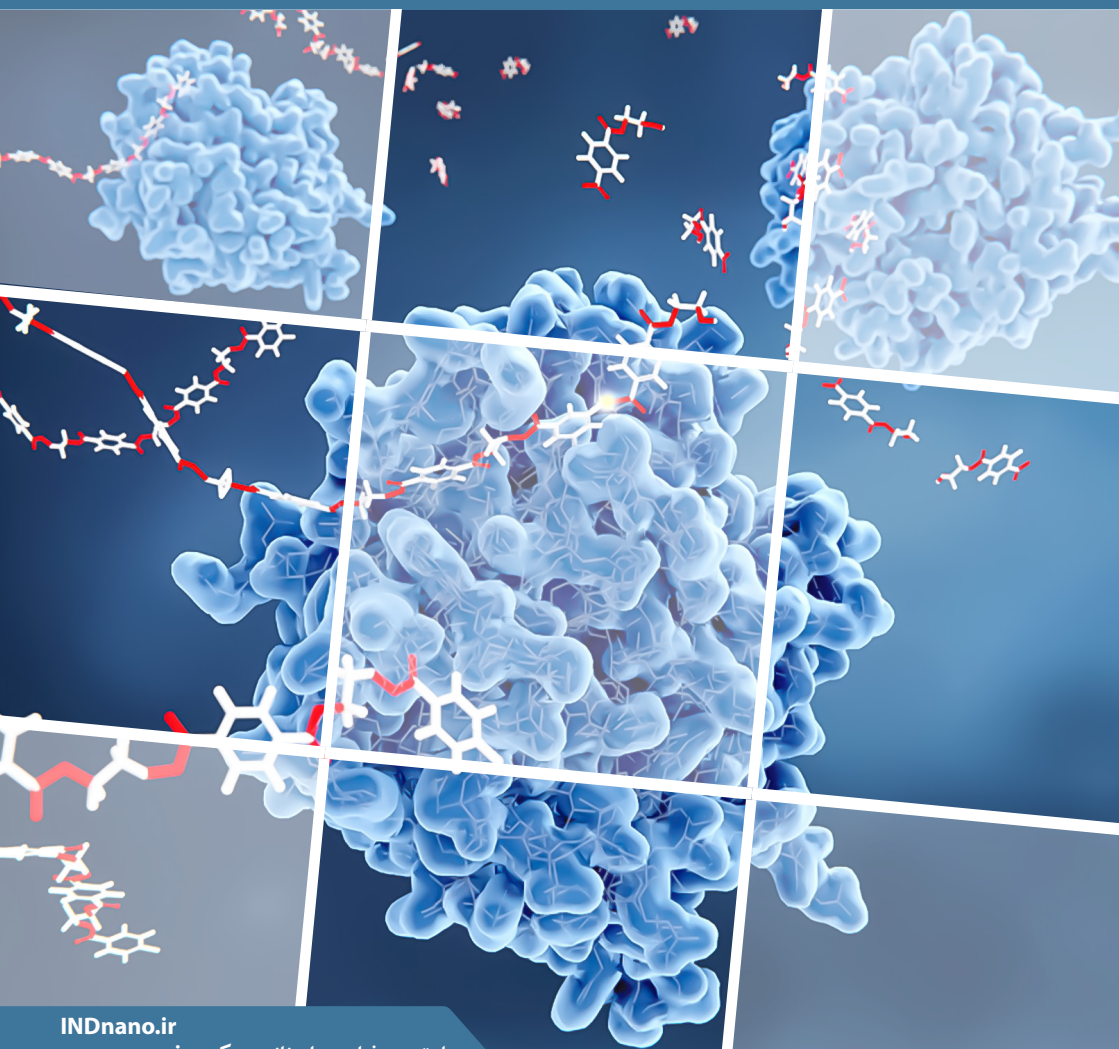




کاربرد نانوکاتالیست‌ها در فرایند هیدروژناسیون صنعتی



شناسنامه

ستاد توسعه فناوری‌های نانو و میکرو

گروه رصد و تولید محتوای بخش ترویج صنعتی

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

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

فهرست مطالب

۳	مقدمه
۳	اهمیت فرایند هیدروژناسیون
۴	روش‌های دیگر و سهم فرایند هیدروژناسیون
۴	شرح فرایند هیدروژناسیون
۵	کاتالیست فرایند هیدروژناسیون
۶	بهبود کاتالیست و نقش نانو
۷	محصولات داخلی
۸	بازار داخلی و جهانی
۹	جمع‌بندی
۹	پی‌نوشت‌ها
۱۰	منابع

مقدمه

فرایند هیدروژناسیون، فرایند هیدروژن دهی به مادهٔ سیرنشده و غیراشباع برای تبدیل آن به مادهٔ اشباع و سیرشده است. این فرایند در کاربردهای مختلفی از جمله تبدیل روغن‌های غذایی مایع به جامد تا افزایش پایداری سوخت به کار می‌رود. فرایند هیدروژناسیون به کاتالیست نیاز دارد و استفاده از فناوری نانو در تولید کاتالیست (نانوکاتالیزور)، مزایای زیادی از کاهش هزینه تا بالا بردن بازدهی فرایند را به آن اضافه خواهد کرد. در گزارش پیش رو، پس از شرح اهمیت و کاربرد فرایند هیدروژناسیون به روش‌های دیگر جایگزین و مزیت هیدروژناسیون نسبت به دیگر روش‌ها پرداخته شده است. در بخش بعد، ویژگی‌های انواع کاتالیست این فرایند برشمرده شده و سپس در مورد تأثیر استفاده از فناوری نانو در بهبود این کاتالیست بحث شده است. در نهایت تولیدکنندگان داخلی نانوکاتالیزورهای این فرایند و بازار آن، معرفی شده است.

اهمیت فرایند هیدروژناسیون

هیدروژناسیون به‌طور گسترده برای کاربردهای مختلف صنایع پتروشیمی، صنایع غذایی، دارو، صنعت چاپ، رنگ و تولید مواد شیمیایی کشاورزی استفاده می‌شود [۱]. شکل ۱، تأثیر فرایند هیدروژناسیون در صنایع مختلف را نمایش می‌دهد.



شکل ۱- کاربرد فرایند هیدروژناسیون در صنایع مختلف [۱]

روش‌های دیگر و سهم فرایند هیدروژناسیون

برای تبدیل ترکیبات غیراشباع دارای پیوندهای دوگانه و سه‌گانه به ترکیبات اشباع، فرایندهای دیگری نیز در شرایط خاصی می‌تواند محصولات مشابه فرایند هیدروژناسیون تولید کند. شکل ۲، برخی از این فرایندها را ارائه می‌دهد.

زیست کاتالیز

با استفاده از میکروارگانیسم‌ها و آنزیم‌ها، ترکیبات غیراشباع را به ترکیبات اشباع تبدیل می‌کنند. این فرایند، شرایط ملایم‌تری (دما و فشار کمتری نسبت به هیدروژناسیون) دارد و گزینش پذیری بالاتری نیز ارائه می‌دهد (گزینش پذیری به این معنی که امکان افزایش واکنش خاصی یا محصول خاصی را بین محصولات دیگر ارائه می‌دهد). با این حال پیچیدگی بیشتری دارد. محدوده کاری پایین‌تری را پوشش می‌دهد و راندمان فرایند آن نیز کمتر است [۱۶، ۱۷].

استفاده از هیدریدهای فلزی

می‌توان از عوامل کاهنده مانند لیتیوم آلومینیوم هیدرید (LiAlH_4) یا بوروهیدرید سدیم (NaBH_4) برای کاهش ترکیبات کربونیل یا آلکن‌ها استفاده کرد و محصولات اشباع مشابهی تولید کرد [۱۵].

روش الکتروکاتالیستی

این روش نوظهور است و با استفاده از الکتریسیته، ترکیبات غیراشباع را به ترکیبات اشباع تبدیل می‌کند. محصولات این فرایند نسبت به روش هیدروژناسیون بدون الکتروکاتالیست، پایدارتر است [۱۸].

واکنش‌های فوتوکاتیور

با استفاده از امواج نوری، واکنش‌های تبدیل ترکیبات غیراشباع رخ می‌دهد. این واکنش‌ها کمتر رایج است [۱۹، ۲۰].

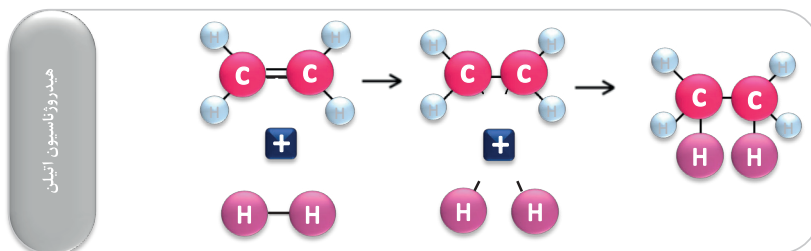
شکل ۲- روش‌های جایگزین فرایند هیدروژناسیون

روش‌های فوق به دلایلی از جمله پیچیدگی و راندمان پایین هنوز به نسبت روش هیدروژناسیون کاربرد گسترده‌تری نیافته‌اند. روش هیدروژناسیون به دلیل مزایایی از جمله فناوری تثبیت شده به دلیل سابقه استفاده طولانی و امکان استفاده در حوزه‌های متفاوت، مقرون به صرفه بودن نسبت به برخی روش‌ها و استفاده برای بسیاری از فرایندهای در مقیاس بزرگ به ویژه در پتروشیمی و تولید مواد غذایی باعث کارآمدی بیشتر آن شده است.

شرح فرایند هیدروژناسیون

در فرایند هیدروژناسیون، در حضور کاتالیست، پیوند دوگانه یا سه‌گانه مولکول‌های آلی، شکسته شده و هیدروژن به آن ماده اضافه می‌شود. به عبارتی در فرایند هیدروژناسیون، هیدروژن دهی به ماده انجام می‌شود. شکل ۳، یک مثال از فرایند هیدروژناسیون را نمایش می‌دهد [۲۱]. مطابق شکل، در حضور کاتالیست، هیدروژن به ماده اتیلن با یک پیوند دوگانه، اضافه می‌شود، در نتیجه پیوند دوگانه شکسته شده و هیدروژن در ساختار ماده قرار می‌گیرد.

این واکنش در شروع، نیاز به انرژی فعال سازی و حرارت دارد ولی پس از شروع واکنش، حرارت آزاد می شود زیرا سطح انرژی ماده با پیوند دوگانه بالاتر است^۲ و با تبدیل به پیوند یگانه، سطح انرژی ماده، پایین آمده و انرژی آزاد خواهد شد، به همین دلیل واکنش هیدروژناسیون گرمازا است.



➤ شکل ۳ - یک مثال از واکنش هیدروژناسیون (تبدیل اتیلن به اتان، [۲۱])

در هیدروژناسیون، ترکیبات آلی غیراشباع مانند آلکن ها و آلکین ها به هیدروکربن های اشباع شده تبدیل می شوند.^۳ واکنش معمولاً در حضور یک کاتالیزور، عمدتاً فلزاتی مانند نیکل، پالادیوم یا پلاتین رخ می دهد که با کاهش انرژی فعال سازی، واکنش را تسهیل می کنند.^۴ انواع مختلفی از هیدروژناسیون انتخابی بر روی مواد انجام می شود، از جمله کاهش پیوند دوگانه یا سه گانه آلکین ($C \equiv C$)، آلکادین ($C = C$)، پیوند غیراشباع نیتروژن-اکسیژن ($N = O$)، پیوند غیراشباع کربن-اکسیژن (هیدروژناسیون $C = O$) و پیوند غیراشباع کربن-نیتروژن ($C = N$) رایج است. این واکنش نه تنها می تواند مواد آلی میانی مهم تولید کند، بلکه ناخالصی ها را نیز از محصولات حذف می کند [۱].

کاتالیست فرایند هیدروژناسیون

در صنعت، واکنش هیدروژناسیون روغن در حضور کاتالیست نیکل در دمای ۱۵۰ تا ۲۲۵ درجه سانتی گراد و فشار ۰/۷ تا ۴/۲ اتمسفر انجام می شود [۲۳]. (فشار هوای جو، ۱ اتمسفر است). کاتالیست های دیگری نیز از جمله کبالت [۳۹]، پالادیوم، پلاتین، روتنیوم و مس نیز برای برخی فرایندهای هیدروژناسیون به کار می روند. بدون حضور کاتالیست، واکنش به انرژی فعال سازی^۵ زیادی نیاز دارد و دمای بسیار بالاتری نیز برای آن لازم است [۲۴]. کاتالیست فرایند هیدروژناسیون، ممکن است به صورت همگن (حل شونده در یک حال) یا ناهمگن به کار رود. برخی از کاتالیست ها در ترکیب با فلزات دیگر در فرایند هیدروژناسیون به کار می روند که کارآمدی آنان را افزایش می دهد. در جدول ۱ خصوصیات، مزایا و معایب برخی از انواع کاتالیست فرایندهای هیدروژناسیون ارائه شده است.

جدول ۱- انواع کاتالیست فرایند هیدروژناسیون

نوع کاتالیزور	مزایا	معایب
نیکل (Ni)	مقرون به صرفه در دسترس فعالیت بالا پایداری بالا [۲۵، ۲۶]	حساسیت به مسمومیت با گوگرد [۲۷]
پالادیوم (Pd)	گزینه پذیرایی بالا (افزایش تولید یک محصول یا واکنش خاص از بین محصولات دیگر) فعالیت بالا پایداری خوب [۲۸] ارجح برای هیدروژناسیون آلکین و نیتروآرن [۲۹]	هزینه زیاد و کمیاب [۲۵] کمبود تحقیقات [۲۸]
پلاتین (Pt)	بازده بالا [۲۶] ارجح برای هیدروژناسیون آلکین و نیتروآرن [۲۹]	هزینه زیاد و کمیاب [۲۵] که آن را برای کاربردهای در مقیاس بزرگ، کمتر امکان پذیر می‌کند.
روتینوم (Ru)	فعالیت و بازده بالا در صورت ترکیب با هیبرید فلزی، گزینه پذیرایی و سرعت بسیار بالاتر [۳۱]	هزینه زیاد و کمیاب [۲۵]
مس (Cu)	دمای پایین تر مورد نیاز [۳۲] گزینه پذیرایی بالا [۳۳]	فعالیت و بازده کمتر [۳۲]

بهبود کاتالیست و نقش نانو

برای بهبود کاتالیست فرایند هیدروژناسیون تحقیقات بسیاری از جمله استفاده از فلزات نانوساختار کمتر متعارف به منظور بهبود توانایی آن‌ها در فعال کردن هیدروژن، استفاده از اکسیدها به عنوان فازهای فعال، استفاده از آلیاژسازی و مواد هیبریدی و... انجام شده است [۲۹]. از میان راهکارهای ذکر شده، فناوری نانو نقش مؤثری در افزایش بازده واکنش دارد. نانوکاتالیزورها، کاتالیست‌هایی در مقیاس نانو هستند (معمولاً ۱-۱۰۰ نانومتر) و می‌توانند فرایندهای هیدروژناسیون را در شرایط ملایم‌تر (دما و فشار کمتر) انجام دهند که موجب کاهش مصرف انرژی و هزینه فرایند است. فناوری نانو امکان توسعه کاتالیزورهایی برای کاربردهای خاص را فراهم می‌کند و دامنه واکنش‌های هیدروژناسیون را گسترش می‌دهد. شکل ۴، مروری بر مزیت‌های کاتالیست بر پایه فناوری نانو را ارائه می‌کند.

نانوکاتالیست‌ها نسبت سطح به حجم بسیار بالاتری دارند که امکان ایجاد مکان‌های فعال بیشتری را برای واکنش فراهم می‌کند و منجر به بهبود فعالیت کاتالیزوری می‌شود.

افزایش سطح فعال [۳۴]

در مقیاس نانو، مکانیک کوانتومی نقش برجسته‌تری دارد. محصور شدن الکترون‌ها در حجم‌های کوچک منجر به کوانتیزه شدن سطوح انرژی می‌شود و بر نحوه توزیع الکترون‌ها در نانوذرات تأثیر می‌گذارد [۳۴]. در سطح نانو، چگالی سطحی انرژی بر روی اتم زیاد شده و الکترون‌ها با انرژی نزدیک به سطح، راحت‌تر منتقل می‌شوند [۳۵].

اثرات کوانتومی

نانوکاتالیست‌ها به دلیل کارایی بالا، اغلب می‌توانند در مقادیر کمتر مورد استفاده قرار گیرند و هزینه‌های مواد را کاهش دهند. اثربخشی آن‌ها در شرایط دما و فشار کمتر نیز می‌تواند هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهد.

هزینه-بارگذاری
کاتالیست کمتر

نانوساختار می‌تواند پایداری حرارتی و مکانیکی کاتالیزورها را بهبود بخشد و منجر به طول عمر بیشتر کاتالیزور و کاهش نیاز به تعویض مکرر شود.

پایداری و طول عمر، مقاومت
در برابر غیرفعال سازی

نانوکاتالیست به دلیل نسبت سطح به حجم بیشتر، اتم‌های سطح بیشتری برای تماس و برهم‌کنش با تکیه‌گاه، در دسترس دارد و نزدیکی نانوذرات به پایه کاتالیست، فرایندهای انتقال الکترون را تسهیل می‌کند. همچنین در مقیاس نانو، ماهیت برهم‌کنش‌های بین نانوذرات فلزی و تکیه‌گاه می‌تواند تغییر کند.

افزایش برهم‌کنش سطح
پایه و ذره

شکل ۴ - مزایای نانوکاتالیست‌ها

محصولات داخلی

شرکت نانو پارس اسپادانا، کاتالیست فرایند هیدروژناسیون را بر پایه فناوری نانو در داخل کشور تولید می‌کند و تاکنون به ۵ مجتمع پتروشیمی اروند، غدیر، آبادان، کارون و شیمی بافت عرضه کرده است [۳۶]. شرکت دانش بنیان نفت و گاز سرو نیز نانوکاتالیست فرایند هیدروژناسیون گوگرد و هیدروژناسیون استیلن را تأمین می‌کند. این شرکت نانوکاتالیست‌های تولیدی خود را به شرکت‌های نفت و گاز داخل از جمله پتروشیمی زاگرس، شیراز، رازی و اراک و کشورهای دیگر مانند روسیه صادر کرده است [۳۷، ۳۸]. مشخصات برخی نانوکاتالیست‌های تولیدی این دو شرکت برای فرایند هیدروژناسیون مطابق جدول ۲ است.

جدول ۲ - تولیدکنندگان نانوکاتالیست هیدروژناسیون در داخل کشور

نام شرکت	نانوپارس اسپادانا	نفت و گاز سرو	نفت و گاز سرو
تصویر کاتالیست تولیدی			
پایه کاتالیست	Al_2O_3	Al_2O_3	Al_2O_3
ذرات فعال کاتالیست	پالادیوم	پالادیوم	کبالت، مولیبیدن
کاربرد	هیدروژناسیون اتیلن	هیدروژناسیون استیلن	هیدروژناسیون ترکیبات گروگرددار

بازار داخلی و جهانی

با توجه به اینکه تنها چند شرکت محدود در دنیا، تولیدکننده این نوع کاتالیست هستند [۴۰] و با توجه به گستردگی کاربرد فرایند هیدروژناسیون، بازار بزرگی پیش روی شرکت های تولیدکننده است. به عنوان مثال، در زنجیره تولید متانول، فرایند هیدروژناسیون در بستر کاتالیستی لازم است که به کارگرفته شود [۴۱]. مطابق جدول ۳، نانوکاتالیست فرایند هیدروژناسیون می تواند برای ۱۵ میلیون تن متانولی که در سال در ایران تولید می شود، مورد نیاز باشد.

جدول ۳ - تولید متانول در کشور در سال ۱۴۰۲ [۴۲]

ظرفیت اسمی تولید متانول (هزار تن)	پالایشگاه	زنجیره تولید
۳۳۰۰	پتروشیمی زاگرس فاز ۱ و ۲ در بندر عسلویه	تولید متانول
۶۶۰	پتروشیمی خارک در جزیره خارک	
۱۰۰۰	پتروشیمی فناوران در بندر ماهشهر	
۱۶۵۰	پتروشیمی مرجان در عسلویه	
۲۳۱۰	پتروشیمی کاوه در بوشهر	
۱۶۵۰	پتروشیمی کیمیا پارس خاورمیانه در عسلویه	
۱۶۵۰	پتروشیمی بوشهر	
۱۶۵۰	پتروشیمی سبلان در عسلویه	
۱۶۵۰	پتروشیمی دنا در عسلویه	
۱۵۶۰۴	جمع کل	

همچنین در سال ۱۴۰۱، بیش از ۹۰ هزار تن هیدروژن در کشور تولید شده است [۴۳]. با توجه به اینکه در زنجیره تولید هیدروژن، فرایند هیدروژناسیون در بستر کاتالیستی استفاده می شود، [۴۴] نانوکاتالیست فرایند هیدروژناسیون می تواند در این زنجیره نیز مورد نیاز باشد. در بخشی دیگر، ایران در سال ۱۴۰۲ نیز ۴۴ میلیون تن آمونیاک در سال تولید کرده است، با توجه به اینکه در زنجیره تولید آمونیاک همچنین فرایند هیدروژناسیون در بستر کاتالیستی استفاده می شود [۴۱]، بازار گسترده ای برای محصولات نانوکاتالیست هیدروژناسیون خواهد بود. به طور کلی، در جهان نیز، تخمین زده شده است که تقریباً ۲۵ درصد از تمام فرایندهای شیمیایی شامل حداقل یک مرحله هیدروژناسیون کاتالیزوری باشد، به طوری که به حدود ۸ درصد از تولید ناخالص داخلی جهان می رسد که گویای بازار بزرگی پیش روی کاتالیست این فرایند است [۲۹].

جمع بندی

فرایند هیدروژناسیون در صنایع مختلفی از تولید مواد غذایی و دارو تا فرایندهای پتروشیمی صنعتی و تولید سوخت کاربرد دارد. در این فرایند ترکیب دارای پیوند دوگانه یا سه گانه به فرآورده اشباع تبدیل می شود. برای تبدیل ماده غیراشباع به اشباع، به جز روش هیدروژناسیون، فرایندهای دیگری مانند زیست کاتالیز، استفاده از هیبرید فلزی، روش الکتروکاتالیستی و واکنش های فوتوکتیو وجود دارد اما فرایند هیدروژناسیون از جمله به دلیل سابقه استفاده بیشتر، کاربرد در مقیاس های بزرگ تر، پیچیدگی کم تر و راندمان بالا، کاربرد گسترده تری تا به امروز داشته است. واکنش به یک کاتالیزور، عمدتاً فلزاتی مانند نیکل، پالادیوم یا پلاتین نیاز دارد. استفاده از فناوری نانو در تولید نانوکاتالیزورها، طول عمر و بازدهی کاتالیست را بالا می برد و موجب کاهش مصرف انرژی و هزینه فرایند خواهد شد. در ایران، دو شرکت نفت و گاز سرو و نانو پارس اسپادانا، کاتالیست این فرایند را بر پایه فناوری نانو تولید می کنند. به طور کلی ۲۵ درصد فرایندهای شیمیایی صنعتی دنیا شامل حداقل یک مرحله هیدروژناسیون کاتالیزوری است، از جمله در صنعت، در زنجیره تولید هیدروژن، زنجیره تولید آمونیاک و زنجیره تولید متانول از فرایند هیدروژناسیون استفاده می شود که همین گویای بازار گسترده ای برای کاتالیست این فرایند است.

پیشنوشت ها

۱ در طی هیدروژناسیون روغن یک اتفاق ناخواسته و نامطلوب ممکن است رخ دهد و آن تولید اسیدهای چرب ترانس است. به دلیل وجود اسید چرب ترانس و ماندن آثار کاتالیست نیکل روی روغن، فرایند هیدروژناسیون روغن، قبل از سال ۱۳۹۷ به مدت ۱۵ سال در ایران ممنوع شد و تغییر کاتالیست یا تغییر طراحی راکتور هیدروژناسیون در تحقیقات دنبال شد [۳۰].

۲ ماده ناپایدارتر است.

۳ اتم کربن حداکثر می تواند به چهار اتم دیگر متصل شود. در صورتی که با یک اتم، پیوند دوگانه تشکیل دهد، از چهار ظرفیت آن، دو پیوند کم شده و دو پیوند باقی می ماند و می تواند به دو اتم دیگر متصل شود. در این صورت نهایتاً به سه اتم متصل شده است (و نه چهار اتم). به چنین مولکولی، غیراشباع می گویند. به یک مولکول دارای کربن که تمام چهار ظرفیت آن در اتصال با چهار اتم دیگر باشد (پیوند دوگانه و سه گانه نداشته باشد)، یک مولکول اشباع شده می گویند.

۴ یک تفاوت واکنش هیدروژناسیون با واکنش هیدروکراکینگ این است با اینکه در هر دو، پیوند دوگانه و سه گانه شکسته شده و هیدروژن به جای آن اضافه می شود ولی در هیدروکراکینگ، مولکول نیز به مولکول های کوچک تر شکسته خواهد شد [۲۲].

۵ انرژی شروع کننده واکنش

منابع

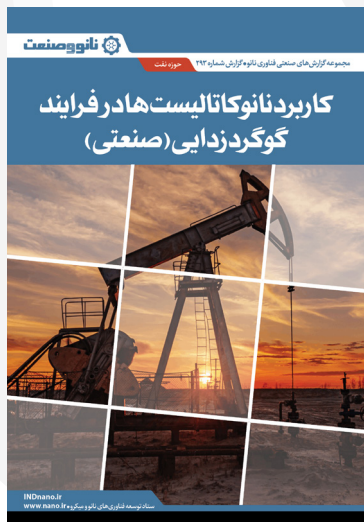
- ۱ Z. Sun et al, Metal single-atom catalysts for selective hydrogenation of unsaturated bonds, Journal of Materials Chemistry A, Issue 9, 2021, 5296-5319
- ۲ <https://www.hamshahronline.ir/news/283132>
- ۳ <https://www.irna.ir/news/82926537>
- ۴ M. Arellano et al., Specialty oils and fats in margarines and low-fat spreads , Food Science, Technology and Nutrition, 2015, Pages 241-2705.
- ۵ Sneha D. Bhandari, et al, Review Regulatory Changes Affecting the Production and Use of Fats and Oils: Focus on Partially Hydrogenated Oils, Volume 97, Issue 8, 2020, Pages 797-815
- ۶ B.J.F. Hudson, FATTY ACIDS | Properties ,Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition (Second Edition), 2003
- ۷ Tinghao Jia, et al. , Impact of deep hydrogenation on jet fuel oxidation and deposition, Fuel, Volume 264, 15 March 2020, 116843
- ۸ H. Zhao et al., The Reactivity and Deactivation Mechanism of Ru@C Catalyst over Hydrogenation of Aromatics to Cyclohexane Derivatives, Volume 5, Issue 14, 2020, Pages 4316-4327.
- ۹ Petroleum Refining: Technology and Economics, J. H. Gary ,G. E. Handwerk, M. J. Kaiser, Fifth Edition, 2004.
- ۱۰ KH Neochem Co. , Enhancing Product Performance through Hydrogenation Technology: Sustainable High Quality for the Long Term. ,
https://www.khneochem.co.jp/en/solution/platform/hydrogenation_technology/
- ۱۱ Testbook Edu Solutions , What is Hydrogenation? Check Industrial Applications & Uses of Hydrogenation Reaction , 2023 ,
- ۱۲ Lei Ma et al. , Highly selective hydrogenation of 3,4-dichloronitrobenzene over Pd/C catalysts without inhibitors, Catalysis Today, Volume 173, Issue 1, 2011, Pages 62-67
- ۱۳ M. Menossi et al. , Hydrogenation of Polybutadiene at High Pressure, Kinetics, Catalysis, and Reaction Engineering, 2022, 61, 1, 236-248
- ۱۴ U. P. Laverdura, Selective Catalytic Hydrogenation of Vegetable Oils on Lindlar Catalyst, ACS Omega 2020, 5, 36, 22901-22913
- ۱۵ S, 19.3: Reductions using NaBH₄, LiAlH₄, LibreTexts libraries,
[https://chem.libretexts.org/Courses/SUNY_Potsdam/Book%3A_Organic_Chemistry_II_\(Walker\)/19%3A_Oxidation_and_Reduction/19.03%3A_Reductions_using_NaBH4%2C_LiAlH4](https://chem.libretexts.org/Courses/SUNY_Potsdam/Book%3A_Organic_Chemistry_II_(Walker)/19%3A_Oxidation_and_Reduction/19.03%3A_Reductions_using_NaBH4%2C_LiAlH4)
- ۱۶ Maria C. Cancellieri et al. , Applications of biocatalytic Cdouble bondC bond reductions in the synthesis of flavours and fragrances, Journal of Biotechnology, Volume 390, 10 July 2024, Pages 13-27
- ۱۷ M. C. Cancellieri et al. , Applications of biocatalytic Cdouble bondC bond reductions in the synthesis of flavours and fragrances, Journal of Biotechnology, Volume 10, 390 July 2024, Pages 27-13
- ۱۸ G. Durin et al. , Review Article Electrocatalytic hydrogenation of unsaturated organic compounds with molecular complexes: Mechanistic views, Current Opinion in Electrochemistry, Volume 41, October 2023, 101371
- ۱۹ R. B. Nasir Baig et al. , Magnetic Fe@g-C₃N₄: A Photoactive Catalyst for the Hydrogenation of Alkenes and Alkynes, ACS Sustainable Chem. Eng. 2016, 4, 3, 1661-1664
- ۲۰ Organic Chemistry, Morrison and Boyd, 7th edition, 1978
- ۲۱ Chemistry Learner, Hydrogenation, <https://www.chemistrylearner.com/chemical-reactions/hydrogenation>
- ۲۲ Petroleum Refining: Technology and Economics, J. H. Gary ,G. E. Handwerk, M. J. Kaiser, Fifth Edition, 2004
- ۲۳ N.A. Zainal, H.H. M., "A review on the chemistry, production, and technological potential of bio-based lubricants", Renewable and Sustainable Energy Reviews, (2018)

- ۲۴ Libre Texts libraries, 10.5: Reaction of Alkenes- Hydrogenationk, [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Organic_Chemistry/Organic_Chemistry_I_\(Liu\)/10%3A_Alkenes_and_Alkynes/10.05%3A_Reaction_of_Alkenes-_Hydrogenation](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Organic_Chemistry/Organic_Chemistry_I_(Liu)/10%3A_Alkenes_and_Alkynes/10.05%3A_Reaction_of_Alkenes-_Hydrogenation)
- ۲۵ P. Ding et al. , A green, cheap and robust method for selective hydrogenation of nitroarenes, Tetrahedron, Volume 167, 7 November 2024, 134269
- ۲۶ S. Ma et al. , Nickel-Catalyzed Efficient Transfer Hydrogenation of Ketones, ChemistrySelect, 2024, 9(19)
- ۲۷ V. Abraham, J.M. deMan, Nickel Catalyst Poisoning by Sulfur in the Form of Allyl Isothiocyanate During the Hydrogenation of Canola Oil, Canadian Institute of Food Science and Technology Journal, Volume 19, Issue 5, December 1986, Pages 235-240
- ۲۸ X. Zhao et al. , Recent Progress in Pd-Based Nanocatalysts for Selective Hydrogenation, ACS Omega 2022, 7, 1, 17-31
- ۲۹ Gianvito Vil et al. , Advances in the Design of Nanostructured Catalysts for Selective Hydrogenation, ChemCatChem 2016, 8, 21 – 33
- ۳۰ X. Zhao et al. , Recent Progress in Pd-Based Nanocatalysts for Selective Hydrogenation, ACS Omega 2022, 7, 1, 17-31
- ۳۱ Yong Wu et al. , A rare earth hydride supported ruthenium catalyst for the hydrogenation of N-heterocycles: boosting the activity via a new hydrogen transfer path and controlling the stereoselectivity, Chem. Sci., 2019,10, 10459-10465
- ۳۲ Yangzhi Xu et al. , Cu-supported nano-ZrZnOx as a highly active inverse catalyst for low temperature methanol synthesis from CO2 hydrogenation, Applied Catalysis B: Environment and Energy, Volume 344, 5 May 2024, 123656
- ۳۳ Yunlong Yao et al. , Highly efficient Cu-based catalysts for selective hydrogenation of furfural: A key role of copper carbide, Renewable Energy, Volume 197, September 2022, Pages 69-78
- ۳۴ P. Prinsen ; R. Luque, Chapter 1: Introduction to Nanocatalysts, Catalysis Series, 2019, Page 1 – 36
- ۳۵ Xing Li et al. , Modulation of metal nanocatalysts for enhanced selectivity of chemoselective reduction and addition hydrogenation, Molecular Catalysis, Volume 540, 1 April 2023, 113028
- ۳۶ <https://www.nipna.ir>
- ۳۷ <https://www.sarvco.ir>
- ۳۸ <https://www.irna.ir/news/84343973>
- ۳۹ Xiaoyong Du et al. , A versatile cobalt catalyst for highly enantioselective hydrogenation of carbonyl compounds, Chem Catalysis, Volume 4, Issue 5, 16 May 2024, 100999
- ۴۰ <https://www.irna.ir/news/85376485>
- ۴۱ <https://sarvco.ir/index.php/fa/design-and-features>
- ۴۲ <https://farhikhtegandaily.com/news/89338>
- ۴۳ تولید ۹۰ هزار تن هیدروژن در شرکت های پتروشیمی، خبرگزاری انرژی پرس، (۱۴۰۲)
- ۴۴ <https://khwarizmico.com/abadan-ref-runing-hydrogen-unit/>

از مجموعه گزارش‌های صنعتی فناوری نانو که در حوزه نفت، گاز و پتروشیمی منتشر شده است:



■ کاربرد نانوکاتالیست‌های ریفرمینگ گازی در صنایع



■ کاربرد نانوکاتالیست‌ها در فرایند گوگردزدایی (صنعتی)



■ تولید صنعتی نانوحسگرهای گازی بر پایه اکسیدهای فلزی



■ کاربرد نانوکاتالیست‌های اکسی کلریناسیون PVC در افزایش کیفیت و بازده تولید PVC