نانو و صنعت

مجموعه گزارش‌های صنعتی فناوری نانو • گزارش شماره ۲۴۷ حوزه تجهیزات

مروری بر کاربردها و فناوری‌های به‌روز دستگاه BET

INDnano.ir
ستاد ویژه توسعه فناوری نانو • www.nano.ir

شناسنامه

ستاد ویژه توسعه فناوری‌نانو

گروه رصد و تولید محتوای بخش ترویج صنعتی

طراحی و اجرا:	توسعه فناوری مهرویژن	تلفن:	۰۲۱-۶۳۱۰۰
نظارت:	داود قرایلو	نمابر:	۰۲۱-۶۳۱۰۶۳۱۰
پست الکترونیک:	IND@nano.ir	صندوق پستی:	۳۴۴-۱۴۵۶۵
تهیه‌کننده:	امید الهی؛ شرکت توسعه مهندسی الماسواره دانش	پایگاه اینترنتی:	www.nano.ir www.INDnano.ir
سال انتشار:	۱۴۰۱	اینستاگرام نانو و صنعت:	@INDnano.ir

فهرست مطالب

- مقدمه ۳
- جذب سطحی ۳
- اندازه‌گیری سطح ویژه با روش BET ۵
- نمونه‌های آنالیز BET ۶
- روش‌های مختلف جذب گازی ۶
- جذب شیمیایی ۷
- جذب کروماتوگرافیک ۸
- فناوری‌های مختلف دستگاه‌های BET ۸
- جمع‌بندی ۱۱

مقدمه

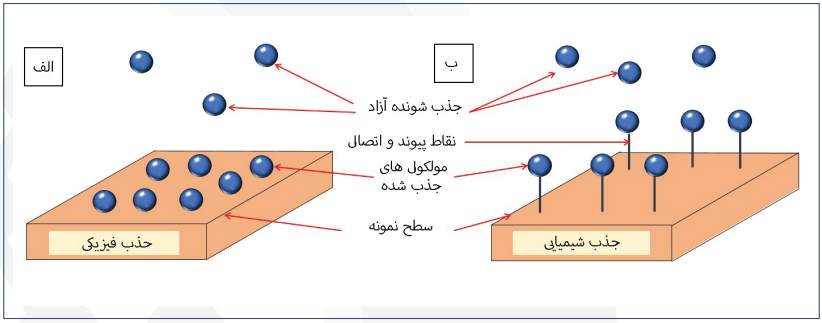
یکی از ویژگی‌های بسیار مهم مواد که تعیین‌کننده تعداد زیادی از دیگر خاصیت‌های ماده است، تخلخل[1] و سطح ویژه ماده است. سطح ماده در واقع قسمتی است که یک ماده جامد به واسطه آن می‌تواند با محیط اطرافش برهمکنش داشته باشد. سطح ویژه می‌تواند با کاهش ابعاد ماده (اتفاقی که معمولاً در نانومواد می‌افتد) افزایش پیدا کند. همچنین از طریق ایجاد تخلخل و منافذ در ماده نیز می‌توان سطح ویژه آن را افزایش داد. مقدار سطح ویژه مواد برای کاربردهای کاتالیستی، جاذب‌ها و رهایش دارو اهمیت بسیار زیادی دارد. سطح ویژه مواد بسیاری از پدیده‌های سطحی (مانند جذب) را کنترل می‌کند.

دستگاه BET (مخفف نام سه محقق: Teller، Emmett، Brunauer) دستگاهی است که برای اندازه‌گیری تخلخل و سطح ویژه مواد مورد استفاده قرار می‌گیرد. این دستگاه بر اساس تئوری جذب BET کار می‌کند که به افتخار سه دانشمند ارائه‌کنندهٔ آن با نام‌های برونر[2]، امت[3] و تلر[4] نام‌گذاری شده است. اساس این روش بر پایه میزان جذب گاز به صورت یک تک لایه روی سطح ماده است. به طور کلی (و با مقداری ساده‌سازی) هرچه مقدار بیشتری گاز توسط ماده جذب شود، به این معناست که سطح آن ماده بیشتر است. (زیرا فرض بر آن است که گاز به سطح ماده جذب می‌شود) [۱]

امروزه دستگاه‌های اندازه‌گیری سطح BET به صورت گسترده‌ای برای محاسبه و اندازه‌گیری سطح ویژه مواد متخلخل مورد استفاده قرار می‌گیرند و یکی از ابزارهای بسیار مهم برای پژوهشگران هستند.

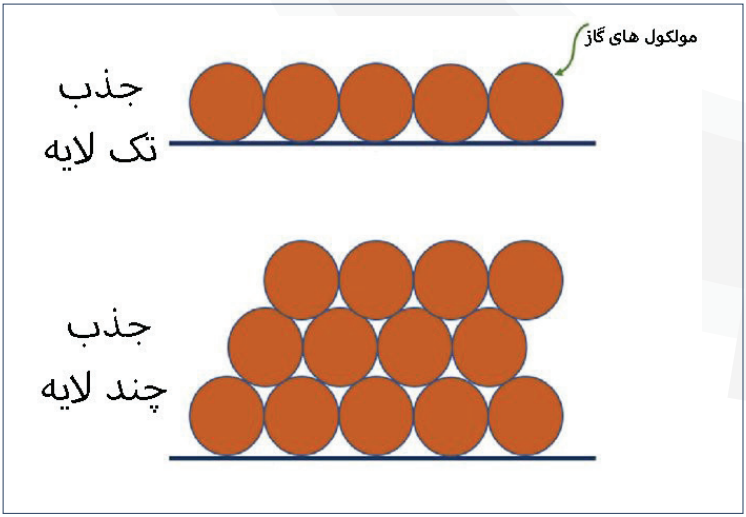
جذب سطحی

جذب سطحی به طور کلی با دو سازوکار جذب فیزیکی[5] و جذب شیمیایی[6] صورت می‌گیرد. این دو روش بر اساس نوع برهمکنش‌های بین مولکول و سطح از هم جدا می‌شوند. به این صورت که در جذب فیزیکی، برهمکنشی که بین سطح و مولکول وجود دارد، برهمکنش فیزیکی (معمولاً از جنس نیروی واندروالسی) است و در جذب شیمیایی این برهمکنش از جنس شیمیایی است. در شکل ۱ تفاوت این دو نوع جذب با یکدیگر نمایش داده شده است.



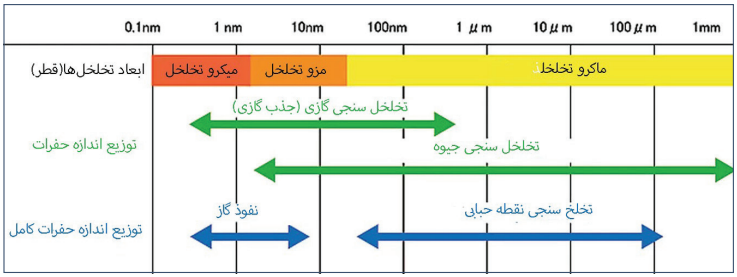
شکل ۱- تفاوت جذب فیزیکی (الف) و جذب شیمیایی (ب)[۲]

در جذب فیزیکی، به دلیل آنکه پیوند بین سطح و مولکول از نوع ضعیف واندروالس است، با انرژی خیلی کمی می‌توان مولکول را از سطح جدا کرد. این نوع جذب معمولاً با سرعت زیادی بین فاز گازی و سطوح صورت می‌گیرد. همچنین با اعمال خلأ در محدوده ۱۰-۸ تا ۱۰-۱۰ پاسکال می‌توان اطمینان حاصل کرد که سطح عاری از هرگونه مولکولی با اتصال فیزیکی به سطح است. پس به طور کلی می‌توان گفت که جذب فیزیکی بازگشت‌پذیر است و می‌توان با افزایش دما یا کاهش فشار منجر به واجذب[۷] سطحی شد. البته جذب فیزیکی سطحی تنها به صورت یک لایه صورت نمی‌گیرد و ممکن است چند لایه مولکول روی همدیگر قرار گیرند؛ اما نکته‌ای که حائز اهمیت است این است که با داشتن اطلاعات دقیق جذب سطحی، می‌توان اطلاعاتی مانند سطح ویژه، ابعاد تخلخل‌ها و توزیع اندازه تخلخل‌ها را به دست آورد.[۳]



شکل ۲- جذب تک لایه و چند لایه مولکول‌های گازی روی سطح [۴]

از طرف دیگر، در جذب شیمیایی پیوندهای والانس دخیل هستند و این جذب تنها در یک تک لایه صورت می‌پذیرد. به همین دلیل نیز این نوع جذب برای مشخصه‌یابی سطح کاتالیست‌ها گزینه مناسبی است.
روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری مقدار تخلخل‌ها و اندازه آن‌ها وجود دارد. هرکدام از این روش‌ها ممکن است برای بازه‌های مختلفی مناسب باشند. در شکل ۳، قابلیت اندازه‌گیری هر کدام از روش‌ها نشان داده شده است.

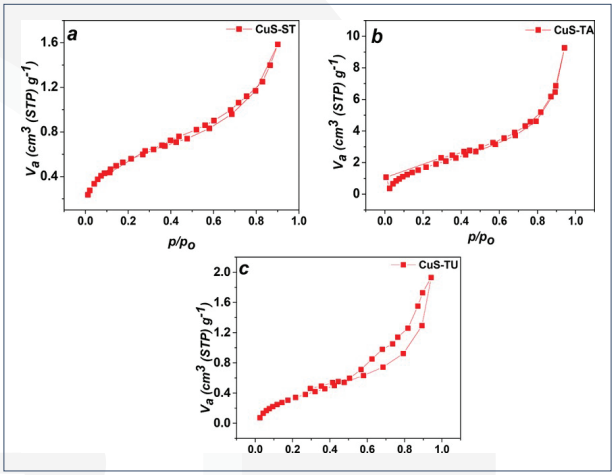


شکل ۳- روش‌های اندازه‌گیری ابعاد حفرات نمونه [۵]

اندازه‌گیری سطح ویژه با روش BET

وقتی راجع به مساحت سطح مواد صحبت می‌کنیم، منظورمان سطح بیرونی یک شی جامد است که شامل تخلخل‌های خارجی آن نیز می‌شود. بسیاری از روش‌های قدیمی که می‌توانستند برای این منظور استفاده شوند، در زمینه اندازه‌گیری سطح تخلخل‌ها با مشکل مواجه می‌شدند. همان‌طور که پیشتر اشاره شد، جذب فیزیکی فرایندی برگشت‌پذیر است. با استفاده از این فرایند و تخمین میزان پوشش تک لایه سطوح و همچنین با در نظر گرفتن میزان گازی که برای تشکیل تک لایه روی سطوح نیاز است و همچنین ابعاد آن‌ها و تعداد مولکول‌ها، می‌توان سطح را اندازه‌گیری کرد.

در این روش منحنی هم‌دمای[۸] جذب گاز رسم می‌شود و به کمک معادله BET، می‌توان میزان گاز جذب شده به لایه سطحی اول و در نتیجه مساحت سطح را محاسبه کرد. منحنی‌های هم‌دما مقدار جذب را برحسب فشار نسبی نشان می‌دهند. نمونه‌ای از این منحنی‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- منحنی‌های هم‌دما برای نمونه‌های مختلف سولفید مس[۶]

توضیحات محاسبات دقیق و فرمول‌هایی که در این روش مورد استفاده قرار می‌گیرد از حوصله این گزارش خارج است و تنها اصولی اولیه که برای آشنایی با عملکرد دستگاه مشخصه‌یابی BET لازم است، برای خواننده ارائه می‌شود.

نمونه‌های آنالیز BET

تمیز بودن سطح شی مورد اندازه‌گیری پیش از انجام آنالیز اهمیت زیادی دارد. به این دلیل که ممکن است مولکول‌هایی به صورت فیزیکی یا شیمیایی روی سطح نشسته باشند و حضور آن‌ها باعث می‌شود که اندازه‌گیری انجام شده نتایج درستی از میزان تخلخل‌ها و سطح ویژه ماده به دست ندهد. برای حذف کردن مولکول‌هایی که از قبل روی سطح قرار دارند، پروتکل‌های مشخصی وجود دارد که در آن دما، فشار و زمان مشخص شده است.
برای بسیاری از نمونه‌ها، می‌توان این کار را با اعمال خلأ و یا عبور دادن یک گاز خنثی از داخل ساختار انجام داد. در هر دوی این روش‌ها معمولاً دما بالا برده می‌شود تا این فرایند تسریع شود. دستگاه‌های مختلف ممکن است قابلیت گاززدایی[۹] نمونه با استفاده از یکی از این دو روش یا هردوی آن‌ها را داشته باشند.
فرض در آنالیز BET بر این است که برهمکنش بین گاز وارد شده و نمونه، تنها به صورت جذب فیزیکی است. به همین دلیل تا زمانی که این شرایط صادق باشد، می‌توان از این روش برای اندازه‌گیری تخلخل نمونه استفاده کرد. معمولاً گاز مورد استفاده در این روش نیز یک گاز خنثی (مانند نیتروژن یا آرگون) است. البته لازم به ذکر است که دستگاه‌های صنعتی برای اندازه‌گیری جذب دیگر گازها از قبیل هیدروژن، دی‌اکسید کربن و متان نیز موجود هستند. اندازه‌گیری جذب گازهای نیتروژن و دی‌اکسید کربن به دلیل برهمکنش قوی‌تری که با سطح دارند و تغییرات فشار بیشتر نسبت به گازی مانند هیدروژن بسیار راحت‌تر است.[۷]

روش‌های مختلف جذب گازی

چند روش مختلف برای جذب گاز و رسم منحنی هم‌دما در این آنالیز وجود دارد. از منحنی دمایی رسم شده می‌توان بسیاری از ویژگی‌های سطحی نمونه را به دست آورد که یکی از آن‌ها محاسبه سطح ویژه با استفاده از روش BET است. در واقع شاید بهتر باشد به جای آنکه این دستگاه را BET بنامیم، با نام «اندازه‌گیری جذب گاز» به این دستگاه اشاره کنیم، چرا که کاری که این دستگاه انجام می‌دهد، تهیه نمودار هم‌دمای جذب گاز در نمونه است و بر اساس آن، یکی از روش‌هایی که می‌توانیم برای محاسبه سطح ویژه استفاده کنیم، BET است. در ادامه به توضیح سه روش اصلی که برای جذب گاز مورد استفاده هستند، اشاره خواهد شد.
زمانی که جذب گاز روی سطح جامد صورت می‌گیرد، دو اتفاق می‌افتد. یکی اینکه فشار گاز کاهش پیدا می‌کند و دیگری اینکه وزن جامد افزایش می‌یابد. در نتیجه برای اندازه‌گیری جذب گاز، می‌توان از حداقل دو روش استفاده کرد. یکی روش وزنی[۱۰] و دیگری روش حجمی[۱۱]. در روش حجمی نمونه در داخل یک محفظه با حجم مشخص قرار دارد و تغییرات فشار آن اندازه‌گیری می‌شود. در نهایت داده‌ها در یک دمای مشخص جمع‌آوری شده و منحنی هم دمای جذب بر حسب فشار یا P/P۰ (P۰ فشار بخار اشباع گاز است) رسم می‌شود.[۷]
معمول‌ترین روش برای اندازه‌گیری جذب گاز توسط یک ماده جامد، روش حجمی است. این روش همچنین با نام روش Sieverts نیز شناخته می‌شود. قانونی به نام قانون Sieverts وجود دارد که غلظت گاز جذب شده در فلزات

را با فشار ارتباط می‌دهد.
در روش وزنی از یک ترازوی دقیق استفاده می‌شود و تغییرات وزن نمونه گزارش می‌شود تا با استفاده از آن منحنی جذب هم دما رسم شود.
در روش حجمی، دمایی که فرایند در آن صورت می‌گیرد معمولاً دمایی پایین (نزدیک به ۷۷ کلوین) است اما مزیتی که روش وزنی دارد این است که می‌توان در دماهای نزدیک به دمای محیط نیز از آن استفاده کرد.
در طی فرایند جذب معمولاً مقدار مشخصی از گاز وارد شده و به آن زمان کافی برای رسیدن به تعادل داده می‌شود و همین اتفاق در چند نقطه به وقوع می‌پیوندد. به این روش و شرایط اندازه‌گیری، روش ایستا[۱۲] گفته می‌شود. روش‌های خودکاری به وجود آمده‌اند که در آن‌ها گاز به صورت مداوم و با سرعت کم وارد شده و امکان جذب هم‌زمان آن فراهم می‌شود. در این روش جذب در شرایط نیمه-تعادلی[۱۳] صورت می‌گیرد. البته در روش ایستا، روش اندازه‌گیری می‌تواند از طریق وزنی باشد. به این صورت که میزان تغییرات وزن نمونه مورد بررسی قرار گرفته و در نتیجه جذب گازی از طریق آن محاسبه می‌شود.

جذب شیمیایی

در روش جذب شیمیایی، بین گاز وارد شده و سطح پیوند شیمیایی برقرار خواهد شد. این جذب تفاوت زیادی با جذب فیزیکی دارد. در این روش دیگر فرایند بازگشت‌پذیر نخواهد بود و با اعمال خلأ، گاز از سطح جدا نمی‌شود. همچنین در این روش تنها یک لایه جذب و پیوند به صورت کووالانسی وجود خواهد داشت. نکته دیگر که در این روش حائز اهمیت است، این است که این جذب در دمای بالا بیشتر اتفاق می‌افتد. (برخلاف جذب فیزیکی) جذب شیمیایی تنها در نقاط فعال که قابلیت برقراری پیوند دارند، اتفاق می‌افتد.
بررسی خواص کاتالیست‌ها از مهم‌ترین کاربردهای روش جذب شیمیایی است که در آن‌ها دقیقاً قسمت فعال کاتالیست ارزیابی می‌شود. این فرایند می‌تواند به دو صورت استاتیک و دینامیک انجام شود. در فرایند استاتیک گاز به درون محفظه وارد شده تا با سطح پیوند برقرار کند. پس از مدتی، با اعمال خلأ بخشی از گاز که به صورت فیزیکی پیوند خورده است، جدا می‌شود و می‌توان مقدار دقیق جذب شیمیایی را محاسبه کرد. در روش دینامیکی، جریانی از گاز وارد شده و از نمونه عبور داده می‌شود. پس از عبور جریان از محفظه نمونه، مقدار گاز موجود که قابلیت پیوند با سطح را داشته مجدداً مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و از طریق تغییر در مقدار گاز می‌توان میزان جذب شده را محاسبه کرد.[۸]
گازهایی که برای جذب شیمیایی استفاده می‌شوند، لزوماً گازهای نجیب نیستند. چراکه نیاز است تا بتوانند با سطح پیوند برقرار کنند. از معروف‌ترین گازهایی که برای جذب شیمیایی استفاده می‌شوند، می‌توان به کربن مونوکسید (CO) و اکسیژن (O_2) اشاره کرد.
دستگاه‌هایی که قابلیت اندازه‌گیری جذب شیمیایی را دارند، دارای کوره‌هایی با دمای بالا هستند که به برقراری پیوند کمک می‌کنند. همچنین ایجاد دمای بالا، احتمال برقراری پیوند فیزیکی و ایجاد خطا در اندازه‌گیری را کاهش می‌دهد.

جذب کروماتوگرافیک

روش جذب کروماتوگرافیک[۱۴] روش دیگری برای اندازه‌گیری جذب است. به طور کلی ممکن است خواص ماده با دما تغییر کند و به همین دلیل نیز نیاز باشد تا اندازه‌گیری جذب ماده در دمای محیط انجام شود. روشی که برای اندازه‌گیری جذب در شرایط دلخواه می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد، IGC است.

در روش IGC، یک گاز حامل به همراه مقدار مشخصی از ذرات (که قرار است جذب سطح شوند) به صورت یک ضربان[۱۵] به نمونه اعمال می‌شوند. در این حالت بر اساس زمان جذب، خواص موردنظر ارزیابی می‌شوند. این حالت به مقدار زیادی مشابه یک روش کروماتوگرافی عمل می‌کند.

فناوری‌های مختلف دستگاه‌های BET

دستگاه‌های اندازه‌گیری جذب گازی امروزی ممکن است دارای فناوری‌های متفاوتی باشند که برخی از آن‌ها را نسبت به برخی دیگر برتری می‌دهد. از این دست موارد که تعیین‌کننده کیفیت و عملکرد دستگاه‌ها هستند، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

• قابلیت گاززدایی از نمونه

همان‌طور که پیشتر به آن اشاره شد، نمونه‌ها قبل از اندازه‌گیری، باید تحت فرایند گاززدایی قرار بگیرند تا سطوح آن‌ها از ناخالصی زدوده شود. این قابلیت در عمده دستگاه‌های اندازه‌گیری جذب گازی وجود دارد که خود این دستگاه‌ها دارای قابلیت گاززدایی از نمونه هستند. روش گاززدایی آن‌ها می‌تواند به شکل عبور یک گاز از نمونه و یا ایجاد خلأ برای جدا شدن ناخالصی‌ها از سطح باشد. (برخی از دستگاه‌ها هر دو روش را برای گاززدایی از نمونه پشتیبانی می‌کنند)

همچنین در حین این فرایند در بسیاری از موارد به نمونه گرما نیز اعمال می‌شود. به همین دلیل ماکزیمم دمای گاززدایی نیز می‌تواند یکی از فاکتورهای تمییزدهنده بین دستگاه‌های مختلف باشد.

بعضی دستگاه‌ها می‌توانند میزان این گاززدایی را با استفاده از ترازوی دقیق و اندازه‌گیری تغییر وزن آن‌ها اندازه‌گیری و مشخص کنند.

• قابلیت مشخصه‌یابی هم‌زمان چند نمونه

بسیاری از دستگاه‌های امروزی دارای چندین محفظه مختلف برای بارگذاری نمونه هستند. این ویژگی این امکان را به دستگاه می‌دهد که چندین نمونه را به صورت مجزا و هم‌زمان مشخصه‌یابی کند و در نتیجه عملکرد دستگاه برای چند نمونه بسیار سریع‌تر از دستگاه‌های تک نمونه خواهد بود.

• قابلیت استفاده از گازهای مختلف

با توجه به نوع نمونه، ممکن است لازم باشد تا از گازهای مختلفی برای جذب استفاده شود. برخی از دستگاه‌ها امکان استفاده از گازهای مختلف برای اندازه‌گیری را فراهم می‌کنند. معمولاً لیست این گازها در برگه اطلاعات مربوط به دستگاه‌ها موجود است. برای تخلخل‌ها با ابعاد متفاوت، گازهای متفاوتی ممکن است مناسب باشند.

• نرم‌افزار مناسب

نرم‌افزاری که توسط شرکت‌های سازنده به همراه دستگاه ارائه می‌شود، تأثیر زیادی روی تحلیل آنالیزها و راحتی کار با دستگاه دارد. نرم‌افزارهایی که معمولاً توسط شرکت‌های معتبر ارائه می‌شود، دارای امکانات فراوانی هستند که از این امکانات می‌توان به داشتن پروتکل‌های پیش‌فرض زیاد و مبتنی بر استانداردها برای انجام تست و همچنین فرایند گاززدایی اشاره کرد. همچنین برای تحلیل نیز ابزارهایی قدرتمند را در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهند که بتوانند با روش‌های مختلف از قبیل BET اقدام به محاسبه دقیق خصوصیات نمونه از قبیل سطح ویژه کنند. (تمام این محاسبات توسط خود نرم‌افزار انجام می‌شود و نیازی به تحلیل یا محاسبات دستی نخواهد بود)

• روش اندازه‌گیری

همان‌طور که پیشتر به آن اشاره شد، روش‌های اندازه‌گیری متفاوتی برای اندازه‌گیری جذب گاز وجود دارند که مهم‌ترین وجه تمایز دستگاه‌های مختلف، همین روش اندازه‌گیری جذب آن‌ها است. خود این موضوع تعیین‌کننده بسیاری دیگر از قابلیت‌ها و محدودیت‌های دستگاه است.

• دمای کاری

کمترین و بیشترین دمای کاری دستگاه اهمیت زیادی دارد. عمده دستگاه‌ها امکان اندازه‌گیری در دماهای خیلی پایین (نزدیک به ۷۰-۸۰ کلوین) را که نزدیک به دمای جوش گاز مورد استفاده است، دارند. اما در هر حال بازه دمای کاری دستگاه اهمیت زیادی در دقت اندازه‌گیری جذب آن دارد.

شکل ۵- دستگاه اندازه‌گیری سطح ویژه و آنالیز جذب و دفع شیمیایی

• دستگاه‌های BET داخل و خارج کشور

در حال حاضر از جمله دستگاه‌های آنالیز جذب گاز که در کشور تولید می‌شود، می توان به دستگاه BET ساخت شرکت توسعه حسگرسازان آسیا اشاره کرد. این شرکت از سال ۱۳۸۰ کار خود را شروع کرده است و عمدتاً در زمینه تولید حسگر فعالیت می‌کند. این شرکت دستگاه اندازه‌گیری سطح ویژه (BET) و آنالیز دفع و جذب شیمیایی (با نام تجاری nanoSORD) را تولید کرده است که در شکل ۵ این دستگاه قابل مشاهده است.

از قابلیت‌های دستگاه nanoSORP می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: [۹], [۱۰]

- سازگار با گازهای H_2 ، O_2 ، CO ، CO_2 ، NO ، NO_2 ، SO_2 ، NH_3 ، N_2 ، Ar ، Kr ، He؛
- دبی گاز تا ۲۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه؛
- دارای ۵ ورودی گاز؛
- حجم حلقه ۵۰۰ میکرولیتر؛
- بیشترین دمای منتل: ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد؛
- بیشترین دمای کوره: ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد؛
- تعیین سطح ویژه تا ۲۰۰۰ مترمربع بر گرم؛
- قابلیت احیای با برنامه دمایی (Temprature Programmed Reduction, TPR)؛
- قابلیت اکسایش با برنامه دمایی (Temprature Programmed Oxidation, TPO)؛
- قابلیت جذب و دفع برنامه‌ریزی شده دمایی (Temprature Programmed Desorption, TPD).

از شرکت‌های خارجی و جهانی مطرح در زمینه تولید دستگاه اندازه‌گیری جذب گاز نیز می‌توان به شرکت‌های MicroTrack، 3P Instruments، Anton Paar و AZO Materials اشاره کرد.

جمع‌بندی

دستگاه اندازه‌گیری جذب گاز دستگاهی است که می‌تواند خواص متعددی از ماده را که عمدتاً به واکنش‌پذیری و تخلخل ماده مرتبط هستند در اختیار پژوهشگران و صنعتگران قرار دهد. یکی از روش‌هایی که برای اندازه‌گیری سطح ویژه استفاده می‌شود، BET است که سطح ویژه ماده را با آنالیز داده‌های خروجی دستگاه محاسبه می‌کند. دستگاه‌های BET امروزی دارای قابلیت‌های مختلفی هستند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به قابلیت گاززدایی از نمونه، قابلیت مشخصه‌یابی هم‌زمان چند نمونه، قابلیت استفاده از گازهای مختلف برای جذب، رابط کاربری مناسب برای تحلیل نتایج و بازه دمای کاری گسترده اشاره کرد. در حال حاضر شرکت ایرانی در زمینه ساخت دستگاه‌های اندازه‌گیری جذب گازی (شرکت توسعه حسگرسازان آسیا) دستگاهی با نام تجاری NanoSORD تولید کرده است. این دستگاه تنها قابلیت آنالیز هم‌زمان یک نمونه را دارد اما از نظر دقت و گازهای قابل استفاده، به نظر می‌رسد در مقایسه با نمونه‌های خارجی از کیفیت مناسبی برخوردار باشد.

پی‌نوشت‌ها

۱ Porosity
۲ Brunauer
۳ Emmett
۴ Teller
۵ Physisorption
۶ Chemisorption
۷ Desorption
۸ Isotherm
۹ Degassing
۱۰ Gravimetric Gas Adsorption Technique
۱۱ Volumetric Gas Adsorption Technique
۱۲ Static
۱۳ Quasi-equilibrium
۱۴ Chromatographic Adsorption Technique
۱۵ Pulse

مراجع

۱ K. S. . Sing, “Adsorption methods for the characterization of porous materials,” Adv. Colloid Interface Sci., vol. 76–77, pp. 3–11, Jul. 1998, doi: 10.1016/S0001-8686(98)00038-4.

۲ A. B. D. Nandiyanto et al., “Isotherm adsorption characteristics of carbon microparticles prepared from pineapple peel waste,” Commun. Sci. Technol., vol. 5, no. 1, pp. 31–39, Jul. 2020, doi: 10.21924/cst.5.1.2020.176.

۳ M. Naderi, “Surface Area,” in Progress in Filtration and Separation, Elsevier, 2015, pp. 585–608.

۴ I. Mohammed, C. C. Afagwu, S. Adjei, I. B. Kadafur, M. S. Jamal, and A. A. Awotunde, “A review on polymer, gas, surfactant and nanoparticle adsorption modeling in porous media,” Oil Gas Sci. Technol. – Rev. d’IFP Energies Nouv., vol. 75, p. 77, Oct. 2020, doi: 10.2516/ogst/2020063.

۵ “Surface Area & Pore Size Distribution.” https://www.microtrac.com/products/gas-adsorption-measurement/surface-area-pore-size-distribution/.

۶ S. Adhikari, D. Sarkar, and G. Madras, “Hierarchical Design of CuS Architectures for Visible Light Photocatalysis of 4-Chlorophenol,” ACS Omega, vol. 2, no. 7, pp. 4009–4021, Jul. 2017, doi: 10.1021/acsomega.7b00669.

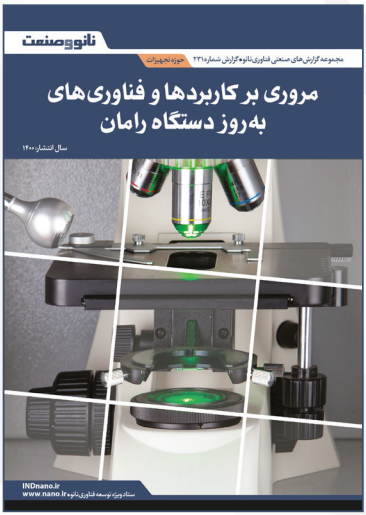
۷ Unknown, “Experimental Adsorption Measurements Methods,” pp. 157–179.

۸ Dynamic Sorption, “Dynamic Sorption Methods.” https://www.dynamicsorption.com/dynamic-sorption-method/ (accessed Apr. 06, 2022).

۹ «دستگاه اندازه‌گیری سطح ویژه (BET) و آنالیز دفع و جذب شیمیایی»، پایگاه اطلاع‌رسانی محصولات فناوری نانو. دستگاه اندازه‌گیری سطح ویژه (BET) و آنالیز دفع و جذب شیمیایی (accessed Apr. 06, 2022). https://nanoproduct.ir/product/1766/

۱۰ شرکت توسعه حسگرسازان آسیا, NanoSORD. /نانوسورد/ (accessed Apr. 06, 2022). http://www.hesgarsazan.com/product

از مجموعه گزارش‌های صنعتی فناوری‌نانو که در حوزه تجهیزات منتشر شده است:



- گزارش صنعتی مروری بر کاربردها و فناوری‌های به‌روز دستگاه رامان
- گزارش صنعتی مروری بر کاربردها و فناوری‌های به‌روز دستگاه DSC