





دانشگاه اصفهان
دانشکده فنی و مهندسی
گروه مهندسی شیمی

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی شیمی

**بررسی تعادل جذب بخار آب بر روی نانولوله‌های کربنی چند دیواره
عامل‌دار شده**

استاد راهنما:
دکتر محمد رضا طلایی

استاد مشاور:
دکتر احمد رضا خسروپور

پژوهشگر:
ریحانه حشمت نژاد

مرداد ماه ۱۳۹۰

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات
و نوآوری های ناشی از پژوهش موضوع این پایان نامه
متعلق به دانشگاه اصفهان است.



دانشگاه اصفهان
دانشکده فنی و مهندسی
گروه مهندسی شیمی

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی شیمی خانم
ریحانه حشمت نژاد تحت عنوان:

بررسی تعادل جذب بخار آب بر روی نانولوله‌های کربنی چند دیواره
عامل دار شده

در تاریخ ۱۳۹۰/۵/۸ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

- ۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتر محمدرضا طلایی با مرتبه‌ی علمی دانشیار امضا
- ۲- استاد مشاور پایان نامه دکتر احمدرضا خسروپور با مرتبه‌ی علمی دانشیار امضا
- ۳- استاد داور داخل گروه دکتر امیرحسین نوارچیان با مرتبه‌ی علمی دانشیار امضا
- ۴- استاد داور خارج از گروه دکتر ارجمند مهربانی با مرتبه‌ی علمی استاد امضا

امضای مدیر گروه



ممنون و قدر دانی:

بزرگترین پاس شایسته اوست که بزرگتر از آن است که وصف شود.

پاسکوارم از

یادوران بهیشتی، پدر و مادرم و صمیمی ترین دوست و بهرام، همسر مهربانم دکتر محمد محمودزاده

استاد گرانیدگروه مهندسی شیمی، بخصوص استاد ارجمندم جناب آقای دکتر محمد رضا طلائی که با دقت نظر و تیزبینی هدایت این پیمان نامه را بر عهده داشتند.

جناب آقای دکتر احمد رضا خسروپور، استاد مشاور محترم که با صبر و حوصله فراوان در همه مشورتها و هر چه بهتر این پیمان نامه راه گشا بودند.

جناب آقای مهندس محسن غلامی که تجربیات خود را در جهت انجام هر چه بهتر این پیمان نامه در اختیار بنده قرار دادند.

جناب آقای دکتر امیر حسین نوارچیان و جناب آقای دکتر ارجمند مهربانی که برای داوری این پیمان نامه قبول زحمت نمودند و وقت گرانهای خود را در اختیار این جانب قرار دادند.

خواهر و برادر نازنینم، مهندس احسان و عاطفه حشمت نژاد که همواره خواهر کوچکشان را پشتیبانی نموده اند.

همدوستان خوبم، بخصوص دوست قدیمی و عزیزم سرکار خانم مهندس مریم مرادی به خاطر همه مهربانیهایش در طی این سال ها.

نزدیک به هفت سال تحصیل در دانشگاه اصفهان طبیعتاً خاطرات بسیار زیادی را رقم می زند و جانب آن که این استید و دوستانم هستند که در همه این خاطرات نقش بسزایی دارند که همواره برایشان آرزوی سربلندی و تندرستی دارم.

ریحانه حشمت نژاد - مرداد ماه ۱۳۹۰

تقدیم به

مہرو ماہم، پدر و مادرم

ہمسفر مہربانم، ہمسرم

و نورد و چشمانم، خواہر و برادرم

چکیده

با توجه به اهمیت نم زدایی از گاز طبیعی در صنعت پالایش گاز، ارائه یک جاذب مناسب برای نم زدایی از گاز به شیوه جذب سطحی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به دلیل ساختار مناسب و وجود خلل و فرج بسیار و منظم در نانولوله‌های کربنی، این مواد دارای خواص منحصر به فردی به عنوان جاذب هستند، اما ضعف نانولوله‌های کربنی به عنوان جاذب رطوبت، ظرفیت کم جذب آن‌ها می‌باشد. در این پژوهش نانولوله‌های کربنی به عنوان جاذب رطوبت انتخاب شده اند که برای اصلاح ظرفیت جذب آن‌ها از بین روش‌های موجود همچون حرارت دهی، آغشته سازی و عامل دار کردن نانولوله‌ها از روش عامل دار کردن استفاده شده است. برای این منظور، گروه عاملی سولفونیک اسید به عنوان یک نم‌زدای بسیار قوی انتخاب گردید و طی واکنشی گروه عاملی هیدروکسیل (OH) با گروه عاملی سولفونیک اسید (OSO_3H)، جایگزین گردید. با آزمایش‌هایی همچون آنالیزعنصری (CHNS)، آنالیز حرارتی (TGA, DTG) و طیف سنجی FTIR، تشکیل گروه عاملی سولفونیک بر سطح نانولوله‌های کربنی تأیید گردید. با انجام آزمایش‌های جذب سطحی توسط این دو جاذب، توانایی جذب این دو جاذب در نم زدایی از گاز مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. برای انجام این آزمایش‌ها از یک مخزن ناپیوسته جذب استفاده گردید. ایزوترم‌های تجربی در دو دمای ۱۷ و ۲۳ درجه سانتی گراد و در فشار ۱۰ بار به دست آمدند که نتایج حاصل نشانگر این موضوع هستند که جاذب اولیه نسبت به جاذب سنتز شده دارای میزان جذب بیشتری در رطوبت‌های پایین است اما میزان جذب جاذب سنتز شده در رطوبت‌های میانی به طور ناگهانی افزایش می‌یابد. همچنین در این مطالعه نشان داده شده که ایزوترم‌های تجربی به دست آمده با مدل‌های تعادلی CMMS و CIMF دارای تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی می‌باشند.

کلمات کلیدی: جذب سطحی، بخار آب، نانولوله‌های کربنی عامل دار شده، تعادل.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول: مقدمه

فصل دوم: مروری بر مطالعات قبلی

۵	۱-۲- عملیات جذب سطحی.....
۶	۱-۱-۲- انواع جذب سطحی.....
۶	۲-۱-۲- جذب های مورد استفاده جهت جداسازی و خالص سازی گاز.....
۸	۲-۲- گسترده‌گی پژوهش های انجام شده در زمینه جذب سطحی.....
۸	۳-۲- جذب های متداول برای نم زدایی.....
۹	۴-۲- نانولوله های کربنی.....
۱۰	۱-۴-۲- خواص و کاربردهای نانولوله های کربنی.....
۱۱	۲-۴-۲- نانولوله های کربنی به عنوان جذب.....
۱۲	۵-۲- بهبود ظرفیت جذب نانولوله ها.....
۱۲	۱-۵-۲- بهبود ظرفیت جذب نانولوله ها ی کربنی با KOH.....
۱۳	۲-۵-۲- بهبود ظرفیت جذب نانولوله ها ی کربنی با ذرات فلزی.....
۱۴	۳-۵-۲- بهبود ظرفیت جذب نانولوله ها ی کربنی به وسیله عملیات حرارت دهی.....
۱۵	۴-۵-۲- بهبود ظرفیت جذب نانولوله ها ی کربنی به وسیله عامل دار کردن.....
۱۶	۶-۲- توضیحاتی پیرامون انواع عامل دار کردن نانولوله های کربنی.....
۱۷	۱-۶-۲- عامل دار کردن بیرون ساختاری نانولوله ها به صورت غیر کووالانسی.....
۱۷	۲-۶-۲- عامل دار کردن درون ساختاری نانولوله ها.....
۱۸	۳-۶-۲- عامل دار کردن نانولوله ها با ایجاد پارگی در دیواره نانولوله.....
۱۹	۴-۶-۲- نمونه هایی از عامل دار کردن نانولوله های کربنی به صورت کووالانسی.....
۲۲	۷-۲- استفاده از نانولوله های کربنی به عنوان جذب.....
۲۲	۱-۷-۲- مقایسه جذب نیتروژن و اکسیژن در نانولوله های با انتهای باز و بسته.....
۲۴	۲-۷-۲- جذب بخار آب بر روی نانولوله های کربنی.....
۲۴	۳-۷-۲- جذب متان بر روی نانولوله های کربنی.....
۲۴	۴-۷-۲- اصلاح نانولوله های کربنی توسط روش پلاسما.....

- ۲۴-۷-۲-۵ جذب هیدروژن در نانولوله های کربنی.....
- ۲۵-۷-۲-۶ جذب اکسیژن و دی اکسید نیتروژن بر روی نانولوله های کربنی.....
- ۲۶-۷-۲-۷ جذب رطوبت بر روی حسگرهای نانولوله ای با حساسیت بالا.....
- ۲۶-۷-۲-۸ مطالعه جذب دی اکسید کربن بر روی نانولوله های کربنی عامل دار شده.....
- ۲۶-۷-۲-۹ جذب ترکیبات آلی توسط نانولوله های کربنی.....
- ۲۷-۷-۲-۱۰ اصلاح نانولوله های کربنی با گروه های آب دوست و آلی دوست.....

فصل سوم: مدل های تعادلی

- ۳۰-۱-۳ مدل Dubinin-Serpinsky(DS).....
- ۳۱-۲-۳ مدل Cooperative multimolecular sorption(CMMS).....
- ۳۲-۳-۳ مدل D.D.DO.....
- ۳۳-۴-۳ صورت های اصلاح شده معادله D.D.DO.....
- ۳۵-۵-۳ مدل سیپس و مدل هیبرید سیپس- لانگمویر.....

فصل چهارم: بخش تجربی (مواد، دستگاه ها، روش ها)

- ۳۷-۱-۴ انتخاب گروه عاملی مناسب جهت عامل دار کردن نانولوله های کربنی.....
- ۳۷-۲-۴ روش آزمایشگاهی عامل دار کردن نانولوله های کربنی.....
- ۳۹-۳-۴ آزمایش های انجام شده بعد از خالص سازی نانولوله های کربنی عامل دار شده.....
- ۳۹-۱-۳-۴ طیف سنجی مادون قرمز.....
- ۴۰-۲-۳-۴ تجزیه حرارتی TGA و DTG.....
- ۴۰-۳-۳-۴ آنالیز عنصری CHNS.....
- ۴۰-۴-۴ دستگاه آزمایشگاهی عملیات جذب سطحی بخار آب.....

فصل پنجم: نتایج و تحلیل آن ها

- ۴۲-۱-۵ نتایج آزمایش های انجام شده بعد از خالص سازی نانولوله های کربنی عامل دار شده.....
- ۴۲-۱-۱-۵ نتایج طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه.....
- ۴۴-۲-۱-۵ نتایج آنالیز جرمی حرارتی TGA و DTG.....
- ۴۷-۳-۱-۵ محاسبه جرم گروه عاملی به وسیله نمودار های آنالیز حرارتی.....

- ۴۸..... ۴-۱-۵- نتیجه آنالیز عنصری CHNS
- ۴۹..... ۲-۵- ایزوترم های تجربی جذب بخار آب.....
- ۴۹..... ۳-۵- تطبیق مدل های تعادلی مناسب با ایزوترم های تجربی نمونه شاهد و نمونه اصلی و تحلیل پارامترهای به دست آمده.....
- ۵۴..... ۴-۵- بحث بر روی نتایج

فصل ششم: پیشنهاد و نتیجه گیری

- ۵۸..... ۱-۶- پیشنهادها.....
- ۵۹..... ۲-۶- نتیجه گیری.....
- ۶۰..... پیوست
- ۶۴..... منابع.....

فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲- گسترده‌گی پژوهش های انجام شده در زمینه جذب سطحی گاز در طی بیست سال.....	۸
شکل ۲-۲- طرح‌واره شکل ساختمانی نانولوله های کربنی.....	۱۰
شکل ۳-۲- چهار منطقه ویژه جذب گاز بر روی دسته نانولوله ها با انتهای باز.....	۱۱
شکل ۴-۲- طرح‌واره فرایند فعال سازی نانولوله کربنی با KOH.....	۱۳
شکل ۵-۲- طرح‌واره مدل ساختاری جذب گاز در دسته نانولوله های کربنی تک دیواره.....	۱۴
شکل ۶-۲- روش های متفاوت عامل دار کردن نانولوله ها.....	۱۶
شکل ۷-۲- دو نما از نانولوله کربنی برای زدودن یک اتم کربن.....	۱۸
شکل ۸-۲- نانولوله کربنی اکسید شده به روش کووالانسی.....	۱۹
شکل ۹-۲- نانولوله کربنی فلورینه شده به روش کووالانسی.....	۲۰
شکل ۱۰-۲- طرح‌واره رادیکاله کردن نانولوله‌های کربنی.....	۲۰
شکل ۱۱-۲- طرح‌واره آمیده و آمینه کردن نانولوله های تک دیواره.....	۲۱
شکل ۱۲-۲- خلاصه ای از انواع گروه های عاملی به کار برده شده برای عامل دار کردن نانولوله های کربنی به روش کووالانسی.....	۲۳
شکل ۱۳-۲- طرح‌واره عامل‌دار کردن نانولوله‌های کربنی با گروه‌های عاملی آلدوست و آلی‌دوست.....	۲۷
شکل ۱-۴- طرح‌واره واکنش عامل دار کردن نانولوله کربنی با گروه سولفونیک اسید.....	۲۸
شکل ۲-۴- طرح‌واره دستگاه آزمایشگاهی جذب سطحی.....	۴۱
شکل ۱-۵- طیف FTIR مربوط به نمونه شاهد.....	۴۳
شکل ۲-۵- طیف FTIR مربوط به نمونه اصلی.....	۴۳
شکل ۳-۵- نمودار مشترک هر دو طیف FTIR.....	۴۳
شکل ۴-۵- نمودار TGA و DTG مربوط به نمونه شاهد مرطوب.....	۴۵
شکل ۵-۵- نمودار TGA و DTG مربوط به نمونه شاهد خشک شده.....	۴۶
شکل ۶-۵- نمودار TGA و DTG مربوط به نمونه اصلی مرطوب.....	۴۶
شکل ۷-۵- نمودار TGA و DTG مربوط به نمونه اصلی خشک شده.....	۴۶
شکل ۸-۵- ایزوترم های جذب بخار آب بر روی نمونه شاهد در دمای 17°C و 23°C	۵۰
شکل ۹-۵- ایزوترم های جذب بخار آب بر روی نمونه اصلی در دمای 17°C و 23°C	۵۰

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۷	جدول ۱-۲- جاذب های متداول و تجاری برای جداسازی گاز.....
۷	جدول ۲-۲- دسته بندی کیفی گازهای جذب شونده با توجه به قدرت جذب آن ها
۲۸	جدول ۳-۲- خلاصه ای از کاربرد های متفاوت نانولوله های کربنی به عنوان جاذب.....
۳۸	جدول ۴-۱- مشخصات نانولوله کربنی خریداری شده از شرکت هوریکان.....
۴۸	جدول ۵-۱- نتایج حاصل از آنالیز عنصری CHNS.....
۵۲	جدول ۵-۲- پارامترهای مدل CMMS برای نمونه شاهد و نمونه اصلی در دمای 17°C و 23°C
۵۴	جدول ۵-۳- پارامترهای مدل CIMF برای نمونه شاهد و نمونه اصلی در دمای 17°C و 23°C

فصل اول

مقدمه

جایگاه منحصر به فرد گاز طبیعی به عنوان ماده اولیه جدید برای تولید محصولات کلیدی و همچنین به عنوان منبع انرژی برکسی پوشیده نیست و با توسعه صنعت گاز، نفت به عنوان یکی از منابع مهم انرژی به جایگاه پایین تری در حال نزول است. با توجه به گرایش جهانی به جایگزینی گاز به جای نفت در سال های آتی، بهینه سازی فرآیندهای فراورش گاز در سال های اخیر بسیار مورد توجه بوده است. در طی این فرآیندها، برخی ناخالصی های موجود در گاز حذف می گردد. ناخالصی های گاز طبیعی را به طور کلی می توان به صورت زیر دسته بندی کرد:

- مایعات همراه گاز

- ترکیبات گوگرد دار (سولفید هیدروژن و مرکاپتان ها)

- بخار آب

- دی اکسید کربن

- هیدروکربن های سنگین

آب به عنوان یکی از ناخالصی های موجود در گاز، سرچشمه مشکلات بسیاری می باشد. تبدیل بخار آب موجود در گاز به هیدرات ها و خوردگی ناشی از حضور آب، از جمله مسائل مطرح در انتقال و فراورش می باشد. لذا جداسازی آب از گاز فرآیندی ضروری به شمار می رود. گاز حاصل از چاه ها پس از جداسازی اولیه به صورت اشباع از آب به پالایشگاه ها تحویل می گردد. بخار آب موجود در محلول گاز می بایست طی فرآیندی

ویژه تحت عنوان عملیات نم زدایی و یا رطوبت زدایی از گاز طبیعی جدا گردد. جداسازی بخار آب از گاز طبیعی به طور سنتی با استفاده از روش جذب در محلول های آبنگیر نظیر گلایکول ها انجام می شد. اما اخیراً با گسترش جاذب های سطحی مؤثری نظیر زئولیت های رده A، استفاده از فرآیند جذب سطحی به منظور رطوبت زدایی از گاز طبیعی در حال جایگزینی با روش های سنتی می باشد. متداولترین و مناسب ترین مواد جاذب که در صنعت کاربرد دارند عبارتند از:

- آلومینا

- سیلیکاژل

- کربن فعال

- زئولیت ها

از ویژگی های کلیدی یک جاذب سطحی مناسب، توانایی جاذب در ایجاد ظرفیت بالا و سینتیک (دینامیک) مناسب است که نانولوله های کربنی به دلیل سینتیک مناسب، دارای پتانسیل لازم جهت به کارگیری در این فرآیند می باشند. مهمترین مشکل این ذرات، ظرفیت پایین جذب بخار آب است که یکی از راه های افزایش ظرفیت جذب نانولوله های کربنی عامل دار نمودن آن ها می باشد. عامل دار نمودن به طور کلی به معنای نشان دادن گروه های عاملی بر سطح نانولوله های کربنی است که این گروه ها مکان هایی جهت جذب مولکول های قطبی بخار آب ایجاد می کنند. بنابراین چنانچه بتوان یک گروه عاملی مناسب را به عنوان یک گروه نم زدا بر روی سطوح نانولوله های کربنی (به وسیله برقراری پیوندهای شیمیایی قوی) قرار داد، انتظار می رود ظرفیت جذب بخار آب توسط این جاذب ها به طور قابل ملاحظه ای افزایش یابد.

هدف نهایی از این پژوهش ارایه یک جاذب مناسب برای نم زدایی از گاز طبیعی می باشد. با توجه به توسعه صنعت نانو و کسب دانش فنی در ساخت و تولید نانولوله های کربنی در کشور توسط پژوهشکده هایی همچون پژوهشکده صنعت نفت و با توجه به عدم وجود دانش فنی تولید زئولیت ها، کار بر روی نانولوله های کربنی بعنوان جایگزین می تواند کشور را از وابستگی به واردات زئولیت رها نماید. این جاذب ها در صنایع گاز و در مرحله آب زدائی دارای کاربرد است. انجام این پژوهش به منزله گامی در جهت به کار گیری نانولوله های کربنی تولید شده در کشور به منظور کاربرد در صنعت گاز می باشد.

در این پژوهش دو گروه عاملی قطبی نم زدا به منظور اصلاح ظرفیت جذب نانولوله ها انتخاب شدند، که هدف مقایسه بین نانولوله های عامل دار شده توسط گروه های هیدروکسیل و سولفونیک اسید از نقطه نظر جذب بخار آب می باشد. (گروه هیدروکسیل به عنوان یک نم زدای متوسط و گروه سولفونیک اسید به عنوان یک

نم زدای بسیار قوی معرفی می‌شوند.) معیار این مقایسه، ظرفیت نهایی جذب در رطوبت‌های بالا و ظرفیت جذب در رطوبت‌های پایین تر گاز است.

در این پژوهش به بررسی برهمکنش ناخالصی‌های دیگر موجود در گاز طبیعی با بخار آب پرداخته نشده است و عملیات جذب سطحی تک جزئی مد نظر می‌باشد. بدیهی است ادامه این پژوهش می‌تواند شامل بررسی اثراتی نظیر بر همکنش اجزاء دیگری نظیر H_2S و مرکاپتان با بخار آب در عملیات جذب سطحی باشد.

گزارشی که در پیش رو است شامل فصل‌های زیر می‌باشد:

ابتدا در فصل دوم بعد از اشاره مختصری به پدیده جذب سطحی و جاذب‌های صنعتی متداول، به ساختار نانولوله‌های کربنی به عنوان جاذب اشاره می‌شود، سپس توضیحاتی پیرامون مبحث عامل دار کردن نانولوله‌های کربنی به عنوان روشی برای اصلاح ظرفیت جذب نانولوله‌ها، بر اساس مطالعات پیشین داده می‌شود. همچنین در ادامه، استفاده از نانولوله‌های کربنی عامل دار شده به عنوان جاذب، بر اساس مطالعات و منابع موجود آورده شده است. در فصل سوم مدل‌های ترمودینامیکی مناسب برای سیستم آب- نانولوله کربنی بر اساس مقالات و منابع موجود ارائه می‌شود. در فصل چهارم نیز، به معرفی مواد مورد نیاز برای انجام آزمایشات تجربی، ذکر آزمایشات ضروری و دستگاه‌های مورد نیاز برای انجام این پژوهش پرداخته شده است. در فصل پنجم، نتایج و بحث بر روی آن‌ها آورده شده است. این فصل شامل ارائه نتایج حاصل از انجام آزمایش بر روی جاذب سنتز شده، ارائه ایزوترم‌های جذب، نتایج تطابق داده‌های تعادلی با مدل‌های ترمودینامیکی و تحلیل پارامترهای آن‌ها، بحث و توجیه رفتار ایزوترم‌های جذب می‌باشد. در فصل ششم نیز پیشنهادها و نتیجه‌گیری کلی این پژوهش آورده شده است.

فصل دوم

بررسی پدیده جذب سطحی بر اساس مطالعات پیشین

وجود بخار آب به عنوان یک ماده قطبی در گاز طبیعی باعث بروز خوردگی و تشکیل هیدرات در خطوط لوله می شود، لذا می بایست قبل از ورود گاز به شبکه انتقال، رطوبت آن حذف گردد. تا کنون روش های متفاوتی اعم از جذب به وسیله مایع و جذب به وسیله جامد به منظور حذف بخار آب از گاز طبیعی توسعه یافته و بهبود داده شده است. هنگامیکه نقطه شبنم بسیار پایین مورد نیاز باشد، روش جذب سطحی دارای صرفه اقتصادی بیشتری است (Raghvan et al., 1974).

برای نم زدایی از گاز طبیعی می توان از روش های زیر استفاده نمود:

۱- جذب آب به وسیله مایعات آبرگیر: در این روش گاز مرطوب در یک برج جذب با یک مایع جاذب نظیر انواع گلایکول ها در تماس قرار می گیرد و رطوبت خود را از دست می دهد.

۲- نم زدایی با استفاده از غشاء: در این روش از یک سیستم پوسته و لوله استفاده می شود. لوله میانی از جنس غشاء قابل تراوش می باشد در حالی که پوسته از جنس فلز است. گاز با فشار بالا وارد فضای حلقوی می شود. ضمن عبور گاز از این فضا، اجزاء نفوذپذیرتر گاز مثل بخار آب یا CO_2 از درون غشا به لوله میانی تراوش می کنند. به این ترتیب گاز خشک از خروجی فضای حلقوی خارج می گردد و اجزاء تراوش شده در خروجی لوله میانی جمع آوری می شوند.

۳- نم‌زدایی به وسیله سرمایش: نم‌زدایی از گاز طبیعی، به وسیله سرمایش و در حضور متانول، به منظور جلوگیری از تشکیل جامد، قابل انجام است.

۴- نم‌زدایی به وسیله آبگیرهای طبیعی نظیر CaCl_2 : کلسیم کلراید به عنوان یک جاذب، قابل استفاده برای نم‌زدایی از گاز طبیعی است. با عبور گاز مرطوب از بستری از کلسیم کلراید بدون آب، جذب بخار آب صورت می‌گیرد. این جذب فیزیکی و شیمیایی است بگونه ای که آب جذب شده با کلرید کلسیم ترکیب شده و تولید هیدراتهای مختلفی ($\text{CaCl}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) می‌نماید.

۵- جذب سطحی آب به وسیله جاذب های صنعتی: در این روش گاز مرطوب از روی بستری از جاذب جامد عبور می‌کند و بر روی سطوح جانبی و خلل و فرج جاذب تجمع پیدا می‌کند (GPSA, 1994).

همان گونه که عنوان شد، یکی از متداول‌ترین روشهای نم‌زدایی از گاز طبیعی در گذشته استفاده از جاذب های مایع نظیر گلایکول‌ها بوده است که امروزه این روش بوسیله روش نم‌زدایی توسط جاذب جامد در حال جایگزینی است. در مقایسه با روش نم‌زدایی بوسیله گلایکول روش جذب جامد (جذب سطحی) دارای مزایای زیر است:

- ۱- توانایی ایجاد نقطه شبنم بسیار پایین.
- ۲- سادگی طراحی و عملکرد واحد.
- ۳- عدم بروز مشکلاتی نظیر خوردگی و کف کردن.
- ۴- هزینه نه چندان زیاد، برای نم‌زدایی مقادیر کم گاز (Raghvan et al., 1974).

۲-۱- عملیات جذب سطحی

در عملیات جذب سطحی، از قابلیت بعضی جامدات در جذب بعضی از مواد موجود در محلول روی سطح آن‌ها استفاده می‌شود. به عنوان مثال در حالت جداسازی گازی از فرآیند رطوبت زدایی هوا و دیگر گازها، بوزدایی و جداسازی ناخالصی‌ها از گازهای صنعتی مثل دی‌اکسید کربن و جداسازی مخلوطی از هیدروکربن های گازی مانند مخلوطی از متان، اتیلن، اتان، پروپیلن و پروپان استفاده می‌شود. از جمله کاربردهای مهم صنعتی جذب سطحی رطوبت زدایی بنزین، رنگ زدایی محصولات نفتی و جداسازی هیدروکربن های آروماتیکی و پارافینی می‌باشند. محدوده عملیات جذب سطحی می‌تواند از مقادیر بسیار ناچیز ماده جاذب (میلی گرم) در آزمایشگاه‌ها تا چند هزار کیلوگرم در کارخانه های صنعتی تغییر نماید (Lee & Zwiebel, 1971).

۲-۱-۱- انواع جذب سطحی

جذب روی یک سطح جامد به علت نیروی جاذبه اتم ها یا گروه های عاملی موجود در سطح آن جامد می باشد، پدیده جذب سطحی بر اساس قدرت جاذب به دو دسته جذب فیزیکی و شیمیایی طبقه بندی می گردد. (۱) جذب فیزیکی یا جذب واندروالسی: یک پدیده برگشت پذیر است که نتیجه نیروهای جاذبه واندروالسی بین مولکول های جامد و ماده جذب شده می باشد. هنگامی که نیروهای جاذبه بین مولکول های سطحی یک جامد و مولکول های گاز بیشتر از نیروهای بین مولکولی گاز باشد، گاز روی سطح جامد جمع و متراکم می شود. در عملیات جذب سطحی صنعتی، این بازگشت پذیری به منظور احیای جاذب برای استفاده مجدد و بازیابی ماده جذب شده و یا تفکیک مخلوط ها مهم می باشد. فرآیند جذب سطحی برگشت پذیر به گازها محدود نمی شود بلکه در مایعات هم مشاهده شده است (Ponic et al., 1974).

(۲) جذب شیمیایی یا جذب سطحی فعال شده: نتیجه فعل و انفعال شیمیایی بین مولکول های ماده جذب شونده و گروه های عاملی فعال موجود در سطح جامد است. قدرت پیوند شیمیایی حاصل به طور قابل توجهی در حالات مختلف تغییر می کند و شناسایی ترکیبات شیمیایی پس از پیوند عملاً مشکل است، ولی نیروهای پیوندی معمولاً بیشتر از آن چیزی است که در جذب فیزیکی وجود دارد. حرارت آزاد شده در عملیات جذب شیمیایی معمولاً محسوس و در حدود حرارت یک واکنش شیمیایی است. فرآیند عموماً برگشت ناپذیر است و با دفع و جداسازی ماده اولیه جذب شده، تغییر شیمیایی در آن مشاهده می شود. برای یک ماده، در دمای کم ممکن است جذب فیزیکی و در دمای زیاد جذب شیمیایی رخ دهد و هر دو پدیده نیز ممکن است در یک زمان اتفاق بیفتند (Clark, 1970).

۲-۱-۲- جاذب های مورد استفاده جهت جداسازی و خالص سازی گاز

مهم ترین عامل در عملکرد یک بستر جذب سطحی نوع جاذبی است که در آن بکار گرفته شده است. زئولیت ها، کربن فعال، آلومینا سیلیکات، غربال های مولکولی، آلومینا فسفات ها، آلومینای فعال، سیلیکاژل، رزین های پلیمری و معدنی، جاذب های آلی و کامپوزیت های فلزی- آلی، مهمترین جاذب ها در حوزه فرآورش گاز به شمار می روند (Li et al., 2009). جدول ۱-۲ جاذب های متداول و تجاری را برای جداسازی گازها معرفی می کند.

جدول ۲-۱- جاذب های متداول و تجاری برای جداسازی گاز (Sircar, 2006)

ماده متخلخل	اندازه خلل و فرج (Å)	ساختار و طبیعت جاذب	موارد کاربردی
سیلیکاژل	قطر متوسط ۲۰-۳۰	آمورف، دارای تخلخل های میکرو و مزو، با اشکال و اندازه های متفاوت	- خشک کردن گاز - بازیابی هیدروژن از پالایش گاز
آلومینای فعال	قطر متوسط ۲۰-۵۰	آمورف، دارای تخلخل های میکرو و مزو، با اشکال و اندازه های متفاوت و دارای مکان های پایه و اسیدی	- زدودن ترکیبات آلی فرار - جداسازی نیتروژن و اکسیژن
کربن فعال	قطر توزیع شده ۳-۱۰۰	آمورف، دارای تخلخل های میکرو و مزو، با اشکال و اندازه های متفاوت، دارای قطبیت متفاوت و موضعی بر روی سطوح	- زدودن ترکیبات آلی - سولفور زدایی از گاز
غربال های مولکولی	قطر متوسط ۳-۵	آمورف، دارای تخلخل میکروپور	- جداسازی نیتروژن و اکسیژن - جداسازی متان از دی اکسید کربن
ژئولیت های X و A	قطر متوسط ۳A: ۳ ۴A: ۴ ۵A: ۴/۹ NaX: ۷/۵ CaX: ۱۰	کریستالی، دارای تخلخل های میکروپور و ساختار متخلخل یکنواخت	- خشک کردن گاز - سولفور زدایی - جداسازی پارافین های نرمال از ایزوپارافین ها و هیدروکربن های حلقوی

همچنین در جدول ۲-۲، گازهای جذب شونده بر اساس قدرت جذبشان طبقه بندی شده اند.

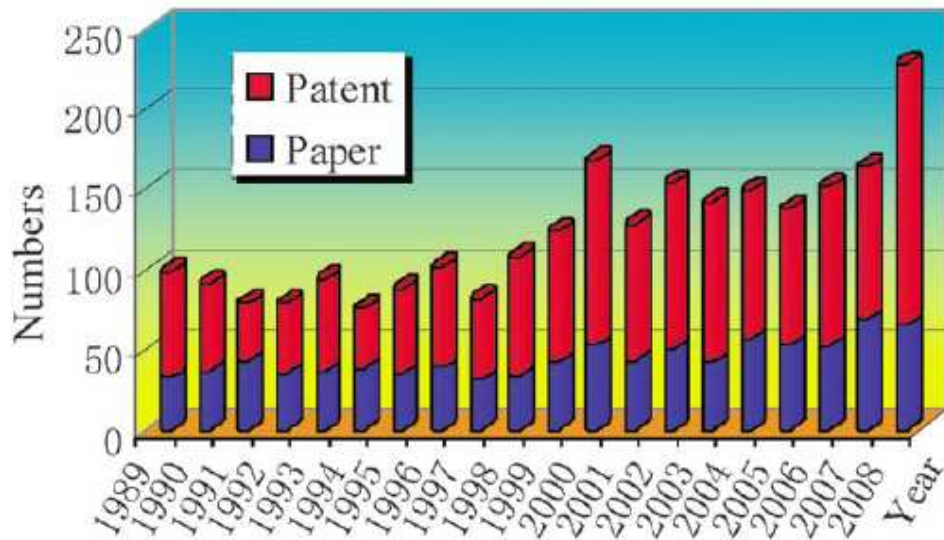
جدول ۲-۲ دسته بندی کیفی گازها و بخارهای معمول با توجه به قدرت جذب آن ها (Kerry, 2007)

قدرت جذب	گاز
بسیار پایین	He, H ₂
متوسط	Ar, O ₂ , N ₂
بالا	CO, CH ₄ , C ₂ H ₆ , CO ₂ , C ₃ H ₈ , C ₂ H ₄
بسیار بالا	C ₃ H ₆ , C ₄ H ₈ , H ₂ S, NH ₃ , H ₂ O

۲-۲- گسترده‌گی پژوهش‌های انجام شده در زمینه جذب سطحی

از زمان پیدایش زئولیت‌های سنتزی در سال ۱۹۴۰ و به دنبال آن ضرورت به کارگیری جاذب‌های متنوع و گسترش عملیات‌های بر پایه جذب سطحی، جذب سطحی به یکی از راه‌حل‌های کلیدی جداسازی گاز در صنعت تبدیل گردید (Rouquerol et al., 1999).

آمار فعالیت‌های پژوهش‌های انجام شده در زمینه عملیات جذب سطحی در شکل ۲-۱ آمده است.



شکل ۲-۱- گسترده‌گی پژوهش‌ها انجام شده در زمینه جذب سطحی گاز در طی بیست سال

(Li et al., 2009)

۲-۳- جاذب‌های متداول برای نم زدایی

جاذب‌های جامد متفاوتی نظیر زئولیت‌ها، سیلیکاژل و آلومینا به منظور نم‌زدایی قابل به کارگیری هستند. در دهه‌های اخیر، پژوهش‌ها گسترده‌ای پیرامون عملیات نم‌زدایی با استفاده از جاذب‌های جامد به صورت آزمایشگاهی و نظری مورد انجام قرار گرفته است. همچنین تعادل و دینامیک جذب بخار آب در بسترهای زئولیتی، سیلیکاژل، آلومینا و زغال فعال به طور وسیعی مورد مطالعه قرار گرفته است.

از بین جاذب‌های موجود، پژوهش‌های اندکی بر روی نم‌زدایی با کمک نانولوله‌های کربنی صورت گرفته است. با توجه به ویژگی‌های مثبت این جاذب، به کارگیری آن در عملیات نم‌زدایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در ادامه به توضیح ساختار نانولوله‌های کربنی پرداخته می‌شود.