





دانشگاه اصفهان

دانشکده فنی مهندسی

گروه مهندسی شیمی

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی شیمی

مدل‌سازی دینامیک فرایند حذف آب از گاز طبیعی به روش جذب سطحی روی

زئولیت 5A

استاد راهنما:

دکتر محمدرضا طلایی خوزانی

پژوهشگر:

مریم مشایخ پور

مرداد ماه ۱۳۸۹

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



دانشگاه اصفهان

دانشکده فنی مهندسی

گروه مهندسی شیمی

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی شیمی

خانم مریم مشایخ پور تحت عنوان

مدل سازی دینامیک فرایند حذف آب از گاز طبیعی به روش جذب سطحی روی

زئولیت 5A

در تاریخ ۸۹/۵/۱۸ توسط هیات داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتر محمدرضا طلایی خوزانی با مرتبه‌ی علمی دانشیار امضا

۲- استاد داور داخل گروه دکتر امیر رحیمی با مرتبه‌ی علمی دانشیار امضا

۳- استاد داور خارج از گروه دکتر احمد محب با مرتبه‌ی علمی دانشیار امضا



تقدیم به پدر و مادرم:

که ساختمان موفقیت‌هایم بر کوه رنج‌هایشان بنا شد و راستی قامت‌م در خمیدگی
قامتشان تبلی یافت. آنان که فروغ نگاهشان، فرزانی وجودشان، روشنی رویشان و
غروب غم‌هایشان، سرمایه‌های جاودان زندگی من است.

تقدیم به خواهر و برادرم:

که همیشه همراه و امیدبخش زندگیم هستند.

تشکر و قدردانی:

سپاس و ستایش مخصوص خالق بی‌همتایی است که الطاف بی‌کرانش لحظه لحظه زندگی‌ام را در بر گرفته و فضل بی‌قیاسش در مراحل دشوار زندگی شامل عالم گشته که اگر عنایت بی‌منت او نبود، رساندن این بار به سر منزل مقصود غیر ممکن می‌نمود.

اکنون که این پژوهش به زیور چاپ آراسته می‌گردد، بر خود لازم می‌دانم تا مطابق سنت حسنه سپاسگزاری، والاترین مراتب سپاس خویش را به مضر استاد فرزانه جناب آقای دکتر محمدرضا طلایی که صبورانه مرا در مراحل سخت و دشوار این پژوهش راهنمایی نمودند، تقدیم نمایم.

همچنین مراتب سپاس خود را به جناب آقای مهندس مسکن غلامی که مرا در این مهم یاری نمودند، تقدیم می‌کنم.

چکیده

در این مطالعه فرایند جذب سطحی گاز طبیعی متشکل از ۴ جزء H_2O ، CO_2 ، CH_4 و N_2 در یک بستر پر شده از جاذب زئولیت 5A مورد بررسی قرار گرفته است.

با استناد به مطالعات پیشین از حل معادلات بقای انرژی و مومنتم صرف نظر شده است و فرایند هم‌فشار و هم‌دما فرض شد. شبیه‌سازی فرایند شامل حل همزمان معادلات بقای جرم در بستر قرص و کریستال است. با استناد به مطالعات پیشین برای حل معادلات قرص از مدل نفوذ استفاده شده است. به کارگیری این مدل باعث پیچیدگی و زمان‌بر شدن حل می‌شود. زیرا در هر نقطه گسسته از بستر معادلات قرص برای هر جزء باید به طور کامل حل شود. در این مطالعه سعی شد با انتخاب روش عددی مناسب برای حل معادلات، تا حدی به کاهش زمان برای شبیه‌سازی فرایند کمک شود زیرا روش‌های عددی بر دقت و زمان اجرا تاثیر گذارند. به این منظور دو روش عددی اختلاف محدود و اورتوگونال کولوکیشن جهت شبیه‌سازی به کار گرفته شدند. روش اورتوگونال کولوکیشن برای حل معادلات غیر خطی مناسب است و در تعداد نقاط کولوکیشن کمتر از روش‌های معمول مانند اختلاف محدود، حجم محدود و... قادر به پیش‌بینی صحیح نتایج هستند.

نتایج نشان داد که روش اورتوگونال کولوکیشن برای حل معادلات قرص مناسب‌تر از روش اختلاف محدود است و همچنین روش اختلاف محدود جهت حل معادلات بستر مناسب‌تر از روش اورتوگونال کولوکیشن است. به همین دلیل از روش ترکیبی (روش اورتوگونال کولوکیشن برای حل معادلات قرص و روش اختلاف محدود برای بستر) برای شبیه‌سازی فرایند استفاده شد. سپس به بررسی اثر پارامترهای عملیاتی مختلف مانند سرعت جریان ورودی، دما، ترکیب درصد اولیه اجزا و نوع جاذب بر نتایج مدل پرداخته شد.

کلمات کلیدی: جذب سطحی، گاز طبیعی، بستر پر شده، شبیه‌سازی، روش‌های عددی، اختلاف محدود،

اورتوگونال کولوکیشن

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول: پیش در آمد

- ۱-۱ نم زدایی ۲
- ۲-۱ فرایند جذب سطحی ۳
- ۳-۱ جاذب های تجاری ۴
- ۱-۳-۱ بوکسیت فعال ۴
- ۲-۳-۱ آلومینای فعال ۵
- ۳-۳-۱ سیلیکاژل ۵
- ۴-۳-۱ غربال های مولکولی ۵
- ۵-۱ بیان مسئله ۸
- ۶-۱ معرفی بخش های مختلف پایان نامه ۹

فصل دوم: مروری بر کارهای پیشین

- پیش در آمد ۱۰
- ۱-۲ مروری بر مطالعات پیشین ۱۰

فصل سوم: معادلات حاکم بر سیستم

- پیش در آمد ۱۹
- ۱-۳ مدل سازی ۲۰
- ۲-۳ درجه آزادی سیستم ۲۰
- ۳-۳ معادله حالت ۲۲
- ۴-۳ مدل سازی فرایند جذب سطحی ۲۳
- ۱-۴-۳ معادله ی بقای جرم در بستر ۲۴
- ۲-۴-۳ معادله ی بقای جرم در فضای ماکروپور ۲۵

| | |
|---------|--|
| ۲۶..... | ۳-۴-۳ معادله انتقال جرم در فضای میکروپور..... |
| ۲۷..... | ۴-۴-۳ رابطه تعادلی جذب سطحی |
| ۲۸..... | ۵-۳ پارامترهای مدل |
| ۲۸..... | ۱-۵-۳ ضریب پراکندگی محوری |
| ۲۹..... | ۲-۵-۳ ضریب نفوذ موثر در فضای متخلخل قرص جاذب |
| ۲۹..... | ۱-۲-۵-۳ فاکتور اعوجاج حفره |
| ۳۰..... | ۲-۲-۵-۳ ضریب نفوذ نودسن |
| ۳۱..... | ۳-۲-۵-۳ ضریب نفوذ مولکولی |
| ۳۳..... | ۱-۳-۳-۵-۳ اثر فشار بر ضریب نفوذ مولکولی دو جزئی گازها..... |
| ۳۵..... | ۴-۵-۳ نفوذ در مخلوط گاز چند جزئی |
| ۳۶..... | ۵-۵-۳ ویسکوزیته |
| ۳۷..... | ۶-۵-۳ اثر فشار بر ویسکوزیته گاز خالص |
| ۳۸..... | ۷-۵-۳ ضریب نفوذ در کریستال جاذب |

فصل چهارم: روش های عددی

| | |
|---------|-------------------------------------|
| ۳۹..... | پیش درآمد |
| ۴۰..... | ۱-۴ روش باقیمانده وزنی |
| ۴۲..... | ۲-۴ روش کلوکیشن |
| ۴۴..... | ۳-۴ روش اورتوگونال کلوکیشن |
| ۴۴..... | ۱-۳-۴ چند جمله ای های متعامد |
| ۴۶..... | ۲-۳-۴ نحوه انتخاب تابع آزمایش |
| ۴۷..... | ۳-۳-۴ سیستم متقارن |
| ۵۰..... | ۴-۳-۴ سیستم نامتقارن |

| | |
|---|----|
| ۴-۴ گسسته سازی معادلات حاکم بر سیستم..... | ۵۲ |
| ۱-۴-۴ معادله بقای جرم در بستر..... | ۵۲ |
| ۱-۴-۴ معادله بقای جرم در قرص جاذب..... | ۵۳ |
| ۵-۴ حل همزمان معادلات..... | ۵۴ |

فصل پنجم: نتایج

| | |
|---|----|
| پیش درآمد..... | ۵۶ |
| ۱-۵ شبیه سازی فرایند جذب سطحی بر روی یک قرص جاذب..... | ۵۶ |
| ۱-۱-۵ بازه زمانی (Δt) و مکانی (ΔZ)..... | ۵۷ |
| ۲-۵ ارزیابی مدل با داده‌های آزمایشگاهی..... | ۶۲ |
| ۳-۵ نتایج حاصل از شبیه سازی فرایند جذب ۴ جزیی گاز..... | ۶۵ |
| ۱-۳-۵ تعداد نقاط گسسته (nZ)..... | ۶۶ |
| ۲-۳-۵ شبیه سازی بستر جذب با استفاده از روش ترکیبی..... | ۷۰ |
| ۲-۳-۵ بررسی اثر پارامترهای مختلف بر منحنی شکست H_2O | ۷۵ |

فصل ششم: خلاصه مطالب، نتیجه گیری و پیشنهادات

| | |
|-------------------------|----|
| پیش درآمد..... | ۸۱ |
| ۱-۶ مروری بر تحقیق..... | ۸۱ |
| ۲-۶ پیشنهادات آتی..... | ۸۳ |
| منابع و مآخذ..... | ۸۴ |

فهرست شکل‌ها

| عنوان | صفحه |
|--|------|
| شکل ۱-۱- انسداد لوله انتقال گاز به علت تشکیل هیدرات..... | ۲ |
| شکل ۱-۲- مقایسه ظرفیت تعادلی جذب آب توسط جاذب های غربال مولکولی ۵A..... | ۸ |
| شکل ۱-۳- تصویر شماتیک از یک بستر پر شده..... | ۸ |
| شکل ۲-۳- تصویر یک المان در بستر..... | ۲۰ |
| شکل ۳-۳- مراحل جذب در یک بستر پر شده توسط زئولیت..... | ۲۲ |
| شکل ۳-۴- اثر فشار و دما بر روی ضریب نفوذ دو جزئی (رابطه تاکاهاشی)..... | ۳۴ |
| شکل ۱-۵- بررسی اثر بازه زمانی Δt بر میزان جذب CO_2 | ۵۸ |
| شکل ۲-۵- بررسی اثر بازه زمانی Δt بر میزان جذب CO_2 | ۵۸ |
| شکل ۳-۵- بررسی اثر تعداد نقاط گسسته‌سازی بر میزان جذب CO_2 در فاصله $r = \frac{R_p}{2}$ از مرکز قرص..... | ۵۹ |
| شکل ۴-۵- بررسی اثر تعداد نقاط گسسته‌سازی بر میزان جذب CO_2 در فاصله $r = \frac{R_p}{2}$ از مرکز قرص..... | ۵۹ |
| شکل ۵-۶- نمودار تغییرات میزان جذب اجزا در فاصله $r = \frac{R_p}{2}$ از مرکز قرص جاذب..... | ۶۰ |
| شکل ۵-۷- نمودار تغییرات میزان جذب اجزا در فاصله $r = \frac{R_p}{2}$ از مرکز قرص جاذب..... | ۶۱ |
| شکل ۵-۸- نمودار تغییرات جذب کل همه اجزا در قرص جاذب..... | ۶۲ |
| شکل ۵-۹- نمودار تغییرات جذب کل همه اجزا در قرص جاذب..... | ۶۲ |
| شکل ۵-۱۰- مقایسه مدل با داده های آزمایشگاهی جذب ۳ جزئی N_2 و CO_2 ، H_2O | ۶۳ |
| شکل ۵-۱۱- مقایسه مدل با داده های آزمایشگاهی جذب ۳ جزئی N_2 و CO_2 ، H_2O | ۶۴ |
| شکل ۵-۱۲- مقایسه بین تعداد نقاط گسته در جهت محوری بر تغییرات غلظت H_2O | ۶۶ |
| شکل ۵-۱۳- مقایسه تعداد نقاط گسسته در جهت محوری بر تغییرات غلظت CO_2 | ۶۷ |
| شکل ۵-۱۴- مقایسه تعداد نقاط گسسته در جهت محوری بر تغییرات غلظت H_2O | ۶۷ |
| شکل ۵-۱۵- مقایسه بین تعداد نقاط گسته در جهت محوری بر تغییرات غلظت CO_2 | ۶۸ |
| شکل ۵-۱۶- تغییرات غلظت H_2O در مرکز بستر نسبت به زمان با $nz=15$ | ۶۸ |

- شکل ۵-۱۷- تغییرات غلظت CO_2 در مرکز بستر نسبت به زمان با $nz=15$ ۶۹
- شکل ۵-۱۸- تغییرات غلظت H_2O در نقاط ورودی، میانی و خروجی بستر ۷۰
- شکل ۵-۱۹- تغییرات غلظت CO_2 در نقاط ورودی، میانی و خروجی بستر ۷۱
- شکل ۵-۲۰- تغییرات غلظت CO_2 در زمان کوتاه در نقاط ورودی، میانی و خروجی بستر ۷۱
- شکل ۵-۲۱- تغییرات میزان جذب H_2O در نقاط ورودی، میانی و خروجی بستر ۷۲
- شکل ۵-۲۲- تغییرات میزان جذب CO_2 در نقاط ورودی، میانی و خروجی بستر ۷۲
- شکل ۵-۲۴- تغییرات میزان جذب CH_4 در نقاط ورودی، میانی و خروجی بستر ۷۳
- شکل ۵-۲۵- تغییرات میزان جذب N_2 در نقاط ورودی، میانی و خروجی بستر ۷۴
- شکل ۵-۲۶- تغییرات میزان جذب اجزا در انتهای بستر نسبت به زمان ۷۴
- شکل ۵-۲۷- تغییرات غلظت H_2O نسبت به زمان در دماهای مختلف ۷۵
- شکل ۵-۲۸- تغییرات غلظت H_2O در سرعت های ورودی مختلف ۷۶
- شکل ۵-۲۹- اثر ترکیب درصد ورودی H_2O ۷۷
- شکل ۵-۳۰- تغییرات غلظت H_2O در انتهای بستر ۷۷
- شکل ۵-۳۱- تغییرات غلظت CO_2 در انتهای بستر ۷۸
- شکل ۵-۳۲- تغییرات غلظت CO_2 در زمان های کوتاه در انتهای بستر ۷۸
- شکل ۵-۳۳- تغییرات میزان جذب اجزا در انتهای بستر ۷۹
- شکل ۵-۳۴- تغییرات غلظت H_2O در انتهای بستر ۷۹
- شکل ۵-۳۵- تغییرات غلظت CO_2 در انتهای بستر ۸۰
- شکل ۵-۳۶- تغییرات میزان جذب اجزا در انتهای بستر ۸۰

فهرست جدول‌ها

| عنوان | صفحه |
|--|------|
| جدول ۱-۱- خواص غربال‌های مولکولی..... | ۷ |
| جدول ۱-۲- خلاصه مطالعات پیشین | ۱۷ |
| جدول ۱-۳- پارامترهای ایزوترم جذب اجزاء بر روی زئولیت ۵A | ۲۷ |
| جدول ۲-۳- مدل‌های تقریب فاکتور اعوجاج | ۳۰ |
| جدول ۳-۳- مثالی از مدل‌های تقریب اعوجاج | ۳۰ |
| جدول ۴-۳- ثوابت رابطه (۳-۳۹) | ۳۲ |
| جدول ۵-۳- پارامترهای ضریب نفوذ در کریستال زئولیت ۵A | ۳۸ |
| جدول ۱-۴- توابع وزن مربوط به روش‌های عددی کولوکیشن، گلرکین، حداقل مربعات | ۴۱ |
| جدول ۲-۴- چند جمله‌ای لژاندر انتقالی | ۴۱ |
| جدول ۳-۴- ریشه‌های چند جمله‌ای لژاندر انتقالی | ۴۶ |
| جدول ۴-۴- چند جمله‌ای ژاکوبی | ۴۷ |
| جدول ۵-۴- ریشه‌های چند جمله‌ای ژاکوبی | ۴۷ |
| جدول ۱-۵- ترکیب درصد گاز | ۵۷ |
| جدول ۲-۵- شرایط جریان گاز و مشخصات قرص جاذب | ۵۷ |
| جدول ۳-۵- مقایسه بین زمان‌های اجرا برای هر دو روش | ۶۰ |
| جدول ۴-۵- شرایط آزمایش | ۶۳ |
| جدول ۵-۵- مقایسه بین زمان‌های اجرا برای شکل‌های (۵-۱۰) و (۵-۱۱) | ۶۵ |
| جدول ۶-۵- شرایط آزمایش | ۶۵ |
| جدول ۷-۵- مقایسه بین زمان‌های اجرا برای شکل‌های (۵-۱۲) تا (۵-۱۵) | ۷۰ |

فصل اول

پیش در آمد

از آنجا که گاز طبیعی یکی از منابع مهم تولید انرژی در صنعت، انتقال و مصارف خانگی می‌باشد، تولید و توزیع آن از اهمیت زیادی برخوردار است. گاز طبیعی عمدتاً از متان (۸۰ تا ۹۰ درصد)، مقدار کمی اتان، پروپان و بوتان تشکیل شده است. علاوه بر این ترکیبات، گاز اغلب شامل ترکیبات دیگری نظیر H_2O و CO_2 نیز می‌باشد که وجود این ترکیبات در گاز باعث ایجاد مشکلاتی در حین انتقال و مصرف می‌شود. چون گاز طبیعی اغلب به صورت اشباع از آب از مخازن خارج می‌شود، تغییر اندکی در دما و یا فشار گاز باعث میعان آب و یا تشکیل هیدرات^۱ می‌شود. هیدرات‌ها ترکیباتی بسیار شبیه به یخ هستند که از پیوند بین مولکول‌های آب و گاز حاصل شوند. تشکیل هیدرات در حین انتقال گاز باعث انسداد خطوط لوله در نتیجه قطع دائمی جریان گاز می‌شود (شکل ۱-۱). علاوه بر تشکیل هیدرات، حضور آب مایع در خطوط لوله باعث خوردگی لوله می‌شود. CO_2 نیز دارای خاصیت خوردندگی است بنابراین حذف آن ضروری است. به علت مشکلات جدی که در اثر حضور این مواد در گاز ایجاد می‌شود، فرایندهایی که به منظور جداسازی این ترکیبات در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند، بسیار حائز اهمیت هستند (McMillan and Considine, 1999).

¹ Hydrat



شکل ۱-۱- انسداد لوله انتقال گاز به علت تشکیل هیدرات

۱-۱ نم زدایی^۱

نم زدایی گاز طبیعی به معنای حذف رطوبت موجود در گاز می باشد. نم زدایی مانع از تشکیل هیدرات های گاز در نتیجه انتقال مناسب و کاهش خوردگی می شود. روش های مختلفی جهت نم زدایی از گاز طبیعی در مقیاس صنعتی وجود دارد که مهمترین آن ها به این ترتیب می باشد:

۱- سرمایش مستقیم^۲

۲- جذب سطحی^۳

۳- جذب توسط مایع^۴

در فرایند جذب سطحی از جاذب های جامدی نظیر (مانند غربال های مولکولی (زئولیت^۵، سیلیکاژل^۶ و بوکسیت^۷ و...) استفاده می شود و در فرایند جذب توسط مایع از مواد آبدوستی مانند دی اتیلن^۸ و تری اتیلن گلیکول^۹ به عنوان جاذب استفاده می شود.

در صورتی که هدف، نم زدایی از حجم زیادی از گاز برای رسیدن به نقطه شبنم ۴۰ تا ۱۴۰ درجه فارنهایت باشد، سیستم های جذب مایع از نظر اقتصادی مناسب تر هستند اما اگر نقطه شبنم بالاتر از ۱۸۰ درجه فارنهایت

¹ Dehydration
² Direct Cooling
³ Adsorption
⁴ Absorption
⁵ Zeolite
⁶ Silica Gel
⁷ Bauxite
⁸ Diethylene
⁹ Triethylene Glycols

مدنظر باشد، واحدهای جذب سطحی مناسب تر هستند. اگر چه هزینه‌ی اولیه و عملیاتی واحدهای جذب با جامد نسبت به واحدهای گلايکول گران تر است، اما این واحدها دارای مزایای زیر هستند:

- ۱- ایجاد نقطه شبنم بسیار پایین
 - ۲- عدم حساسیت نسبت به تغییرات کم دما، فشار و شدت جریان گاز
 - ۳- سادگی عملیات و طراحی واحد
 - ۴- مشکلات کمتر در رابطه با خوردگی و تولید کف^۱
- علاوه بر موارد ذکر شده، واحدهای گلايکول به تجهیزات جانبی مانند برج تقطیر جهت احیای مجدد حلال نیاز دارند در حالی که در واحدهای جذب توسط جامد احیای جاذب در همان برج جذب صورت می‌گیرد (Kohl and Nielsen, 1997).

۱-۲ فرایند جذب سطحی

همان‌طور که اشاره شد در فرایند جذب سطحی از جاذب‌های جامد برای جذب اجزاء نامطلوب استفاده می‌شود. به طور کلی فرایند جذب سطحی در جامدات به دو صورت جذب شیمیایی و جذب فیزیکی صورت می‌گیرد. در جذب شیمیایی معمولاً یک پیوند نسبتاً قوی کووالانسی، یونی و یا حداقل یک پیوند هیدروژنی تشکیل می‌شود. در فرایند جذب فیزیکی مولکول‌های سیالات مختلف به علت نیروی وان‌دروالس و/ یا نیروی الکتروستاتیک روی مکان‌های فعال سطوح برخی جامدات قرار می‌گیرند. به دلیل تفاوت در قطبیت و اندازه مولکول بین جامد و سیال، مولکول‌های مایع یا گاز، زمانی که با سطح جامد تماس پیدا می‌کنند، به آن می‌چسبند (Rahman, 1992).

جذب فیزیکی به علت برگشت پذیر بودن دارای اهمیت ویژه‌ای است. در این مطالعه منظور از جذب، جذب فیزیکی است.

داشتن خواص زیر برای جاذب‌های فیزیکی مطلوب است:

- ۱- ظرفیت بالای جذب (تعادل مناسب)
- ۲- نرخ انتقال جرم بالا (سینتیک مناسب)
- ۳- احیای آسان و ارزان

¹ Foaming

- ۴- مقاومت کم در برابر جریان گاز (در نتیجه کم بودن افت فشار در طول سیستم)
- ۵- مقاومت مکانیکی بالا جهت جلوگیری از خرد شدن و تولید گرد و مقاومت بالا در هنگام مرطوب شدن
- ۶- ارزان بودن، نداشتن خاصیت خوردگی، غیر سمی بودن، از نظر شیمیایی خنثی بودن و تغییر حجم اندک در حین جذب و دفع
- بسیاری از جامدات قادر به جذب گازها هستند اما تنها تعدادی از آنها قابل استفاده در صنعت هستند. در ادامه به معرفی برخی از این جاذب‌های تجاری پرداخته می‌شود.

۳-۱ جاذب‌های تجاری

جاذب‌های تجاری که به طور وسیع در فرایند نم‌زدایی به کار می‌روند، به ترتیب افزایش قیمت به صورت زیر می‌باشند:

۱- بوکسیت فعال^۱

۲- آلومینای فعال^۲

۳- سیلیکاژل^۳

۴- غربال‌های مولکولی^۴

کربن فعال^۵ نیز یکی از جاذب‌های تجاری است که به طور گسترده در فرایندهای جذب مورد استفاده قرار می‌گیرد اما این جاذب برای جداسازی آب مناسب نمی‌باشد. در زیر به توضیح مختصری در مورد این جاذب‌ها پرداخته می‌شود.

۱-۳-۱ بوکسیت فعال

بوکسیت فعال شده از حرارت دادن بوکسیت در شرایط کنترل شده و تبخیر شدن آب موجود در آن، حاصل می‌شود. اصلی‌ترین ترکیب بوکسیت تری‌هیدرات آلومینا^۶ می‌باشد.

¹ Activated Bauxite

² Activated Alumina

³ Silica Gel

⁴ Molecular Sieves

⁵ Activated Carbon

⁶ Alumina Tryhydrate

مهمترین مزیت این جاذب ارزان بودن آن و عمده‌ترین عیب آن ظرفیت پایین در جذب آب در مقابل سایر جاذب‌های تجاری است (Kohl and Nielsen, 1997).

۱-۳-۲ آلومینای فعال

جاذب آلومینا به‌طور معمول جهت حذف آب از جریان گاز در صنعت استفاده می‌شود. در سطح این جاذب سایت‌های فعالی برای جذب مولکول‌های قطبی مانند آب وجود دارد. گونه‌های مختلفی از آلومینا موجود است اما معمولاً از ۷-آلومینا برای خشک کردن استفاده می‌شود (Do, 1998).

۱-۳-۳ سیلیکاژل

سیلیکاژل از تجمع محلول کلئیدی اسید سیلیک ساخته شده است و ترکیب شیمیایی آن به‌صورت $SiO_2 \cdot NH_2O$ بیان می‌شود. حضور گروه‌های هیدروکسیلی باعث افزایش درجه قطبیت سطح این ماده می‌شوند و در نتیجه جذب آب، الکل‌ها، فنل‌ها، آمین‌ها و هیدروکربن‌های اشباع نشده نسبت به مولکول‌های غیرقطبی افزایش می‌یابد (Rahman, 1992).

۱-۳-۴ غربال‌های مولکولی

تفاوت عمده غربال‌های مولکولی با جاذب‌های معمولی توانایی در جذب انتخاب شده مولکول‌ها می‌باشد. در این‌گونه جاذب‌ها فرایند جذب براساس تفاوت در اندازه مولکول‌ها صورت می‌گیرد. این جاذب‌ها دارای ظرفیت جذب نسبی بالا در غلظت‌های کم مواد هستند و دارای تمایل زیاد برای جذب اجزاء غیر اشباع و قطبی می‌باشند. اگرچه غربال‌های مولکولی طبیعی مدت زیادی است که کشف شده‌اند اما این نوع جاذب تا زمان تولید غربال‌های مولکولی مصنوعی از اهمیت تجاری برخوردار نشدند (Kohl and Nielsen, 1997). غربال‌های مولکولی قدرت بالایی در نم‌زدایی و خالص سازی گاز دارند. اگرچه غربال‌های مولکولی از جاذب‌های دیگر نسبتاً گرانتر هستند اما مزایای زیر را به همراه دارند:

۱- ظرفیت بالای جذب در رطوبت نسبی بسیار پایین گاز

۲- قابل استفاده در دماهای بالا

۳- توانایی در جذب انتخابی آب

۴- مناسب در دفع ناخالصی‌های مشخص به همراه آب

۵- قابل کاربرد در خشک سازی آدیاباتیک

۶- توانایی تولید نقطه شبنم بسیار پایین

غربال‌های مولکولی تجاری عموماً به گروهی از زئولیت‌های معدنی (به عنوان نمونه فلزات قلیایی هیدراته یا آلومینوسیلیکات‌های قلیایی) که به منظور دفع آب تبلور و فعال شدن حرارت داده می‌شوند، گفته می‌شود. حفره‌های این جاذب دارای ابعاد مولکولی است و باعث غربال کردن مولکول‌ها می‌شود. ساختار زئولیت‌ها از کریستال‌هایی تشکیل شده است که دارای ساختار مکعبی محکمی هستند و در مرحله حرارت دادن خراب نمی‌شوند. بنابراین نتیجه فعال‌سازی تولید شبکه‌ای از کانال‌های متصل به هم است. در حدود ۴۰ نوع زئولیت شناخته شده است که تنها سه نوع مصنوعی آن به طور وسیع در کاربردهای تجاری استفاده می‌شوند:

۱- زئولیت نوع A

۲- فاجوسیت^۱

۳- پنتاسیل^۲

حفره‌های زئولیت A از حلقه‌های ۸ عضوی اکسیژن‌دار تشکیل شده است. قطر روزنه‌های این زئولیت ۳ انگستروم برای 3A، ۳/۸ انگستروم برای 4A و ۴/۳ انگستروم برای 5A است. فاجوسیت به دو صورت یافت می‌شود. نوع X و Y، که حلقه‌های این دو نوع از ۱۲ عضو اکسیژن‌دار تشکیل شده‌اند. حفره‌های این دو نوع زئولیت تقریباً بزرگ هستند و قطر روزنه‌های آن‌ها در حدود ۸/۱ انگستروم است. تفاوت نوع X و نوع Y تنها در نسبت سیلیسیم به آلومینیوم است. این نسبت چگالی کاتیون را کنترل می‌کند. نوع پنتاسیل دارای حلقه‌های ۱۰ عضوی است که قطر روزنه‌های آن در حدود ۶ انگستروم است. خواص چهار نوع غربال مولکولی که در صنعت کاربرد بیشتری دارند در جدول ۱-۱ ارائه شده است. شکل ۱-۲ مقایسه بین ظرفیت تعادلی جذب آب توسط جاذب‌های غربال مولکولی 5A، سیلیکاژل، آلومینای فعال و بوکسیت فعال در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت تعادلی جذب آب توسط غربال مولکولی 5A نسبت به دیگر جاذب‌ها (در درصد‌های وزنی بسیار پایین آب) بیشتر می‌باشد.

¹ Faujasite

² Pentasil

جدول ۱-۱- خواص غربال‌های مولکولی

انواع غربال‌های مولکولی تجاری

| نوع جاذب | قطر حفره‌ها (انگسترون) | چگالی قرص‌ها $\frac{lb}{ft^3}$ | ظرفیت جذب آب (درصد ونی) | نوع جذب‌شونده‌ها | Molecules excluded | کاربردهای متداول |
|----------|---------------------------|-----------------------------------|----------------------------|--|---|--|
| 3A | ۳ | ۴۷ | ۲۰ | | اتان و هیدروکربن‌های سنگین‌تر | آب‌گیری از هیدروکربن‌های اشباع نشده |
| 4A | ۴ | ۴۵ | ۲۲ | H_2S, CO_2, SO_2 C_2H_4, C_2H_6, C_3H_6 | پروپان و هیدروکربن‌های سنگین‌تر | خشک کردن سیستم‌های سرمایشی و غیره. خشک کردن هیدروکربن‌های اشباع |
| 5A | ۵ | ۴۳ | ۲۱/۵ | n-C ₄ H ₉ OH | ترکیبات ایزو، حلقه‌های دارای ۴ کربن و بزرگتر | جداسازی n-پارافین از هیدروکربن‌های حلقوی شاخه‌دار |
| 13X | ۱۰ | ۳۸ | ۲۸/۵ | Di-n-Propylamin | (C ₄ F ₉) ₃ N و مولکول‌های بزرگتر | جذب هم‌زمان آب، H ₂ S و دی‌اکسید کربن |