

جذب سطحی

مقدمه

اساس پدیده‌های جذب سطحی بر مبنای جداسازی است. فرآیند جداسازی عکس اختلاط است و فرآیند اختلاط در راستای قانون دوم ترمودینامیک صورت می‌پذیرد. برای تفکیک نیاز به انرژی زیادی است، بنابراین انرژی در فرآیندهای تفکیک نقش مهمی ایفا می‌کند. بنابراین هزینه مربوط به انرژی در کل فرآیند یک درصد عمده‌ای را به خود اختصاص می‌دهد. امروزه انواع و اقسام فرآیندهای جداسازی گسترش یافته است. از این دست فرآیندها می‌توان به تقطیر، کریستالیزاسیون و جذب سطحی اشاره کرد. مثال‌های زیر نمایانگر طبیعت عمومی جداسازی خواهد بود و کاربردهای اصلی آن را نشان می‌دهد. در حالت جداسازی گازی از فرآیند جذب برای رطوبت زدایی هوا و دیگر گازها، بو زدایی و جداسازی ناخالصی‌ها از گازهای صنعتی مانند دی‌اکسید کربن استفاده می‌شود. از فرآیندهای جداسازی مایع می‌توان رطوبت زدایی بنزین، زنگ زدایی محصولات نفتی و جداسازی آلاینده‌های سمی از آب را نام برد. محدوده عملیات می‌تواند از چند گرم ماده جاذب در آزمایشگاه تا چندین تن جاذب در کارخانه‌های صنعتی تغییر نماید.

تکنولوژی‌هایی که از سطح جامد برای جداسازی استفاده می‌کنند عبارتند از:

- جذب سطحی (Adsorption)
- تعویض یونی (Ion - Exchange)
- کروماتوگرافی (Chromatography)

تعویض یونی (Ion - Exchange)

فرآیند تعویض یونی، واکنش شیمیایی بین یون‌های داخل فاز مایع و یون‌های فاز جامد می‌باشد. یونهای خاصی در داخل مایع ترجیحاً توسط مبدل یونی جامد جذب می‌شود و به خاطر این که باید حالت خنثای الکتریکی برقرار گردد، مبدل جامد یونهای را به داخل مایع آزاد کرده که جایگزین یون‌های جذب شده گردد. فرآیند تبادل یونی به طور عمده در نرم سازی آب، حذف مواد معدنی، نمک زدایی، حذف نیتروژن به کار می‌رود. تعویض برگشت پذیر یون‌ها بین جامد و محلول الکترولیت باعث تفکیک و جداسازی حل شونده‌های الکترولیت می‌شود. این حالت در اصل یک واکنش شیمیایی است ولی در اثر متقابل بین یونها و جامد و همچنین نفوذ یونها در فاز جامد وجود دارد.

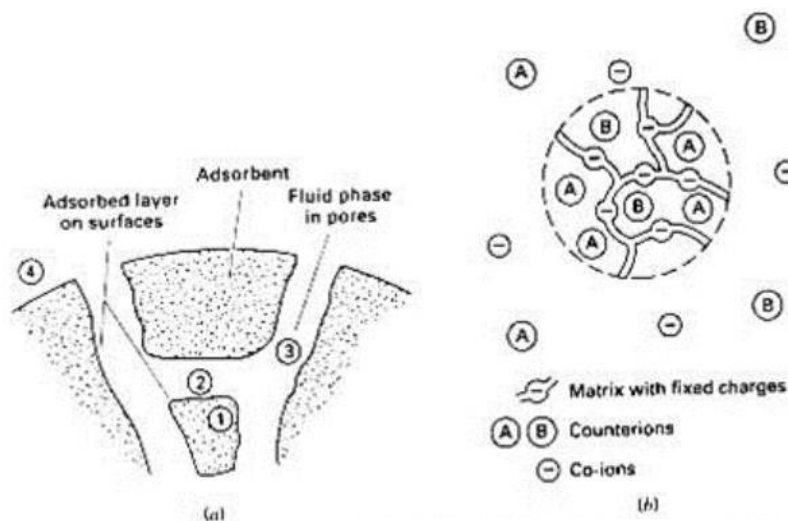
کروماتوگرافی (Chromatography)

یک عملیات جداسازی دیگر، کروماتوگرافی است. از این روش بیشتر برای جداسازی مواد بیولوژیکی استفاده می‌کنند. کروماتوگرافی روشی است برای جدا کردن اجزای یک مخلوط. در این روش معمولاً مخلوط که به صورت مایع یا گاز است از یک لوله یا شبکه گذرانده می‌شود، سرعت حرکت اجزای تشکیل دهنده مخلوط در لوله یا شبکه مختلف است (با توجه به عناصر

دیواره داخلی لوله یا شبکه) در نتیجه مخلوط به اجزای تشکیل دهنده تجزیه شده و هر جزء جداگانه خارج می‌شود. در کروماتوگرافی دو فاز وجود دارد فاز ثابت و فاز متحرک. فاز ثابت در واقع اجزای درون لوله یا شبکه جداسازی را تشکیل می‌دهند و فاز متحرک مربوط به ماده‌ای است که می‌خواهد مورد تجزیه و تخلیص قرار بگیرد.

جذب سطحی Adsorption

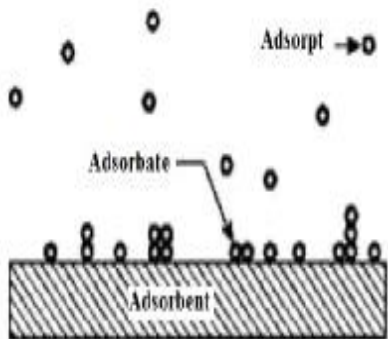
جذب سطحی یک فرآیند جداسازی است که در آن برخی از اجزاء فاز سیال به سطح یک جاذب سطحی جامد منتقل می‌شوند. معمولاً ذرات ریز جاذب در بستر ثابتی نگه داشته می‌شوند و سیال به صورت پیوسته از میان بستر عبور داده می‌شود تا جامد تقریباً سیر شود و دیگر نتوان به جداسازی مورد نظر دست یافت. جذب سطحی را می‌توان تمایل مولکولهای فاز سیال برای چسبیدن به سطح جامد تعریف کرد. در جذب سطحی از جامد متخلخل استفاده می‌شود که این منافذ سطح بسیار زیادی را ایجاد می‌کنند. یعنی فقط سطح خارجی نداریم و تخلخل نیز داریم و هرچه قدر سطح جاذب افزایش یابد، مقدار ظرفیت جذب نیز افزایش می‌یابد. برای سیستم جذب سطحی از ذرات با تخلخل زیاد استفاده می‌شود.



شکل 1) عملیات جداسازی توسط سطح جامد، (a) جذب سطحی، (b) تعویض یونی

در عملیات جذب از قابلیت بعضی از جامدات در جذب بعضی از مواد موجود در محلول روی سطح استفاده می‌شود. به این شکل اجزای یک محلول گازی یا مایع را می‌توان از هم جدا کرد. عامل اساسی در سیستم جذب، جاذب است. جاذب پدیدآورنده فناوری جذب سطحی است. در گذشته استفاده از جاذب‌ها بر مبنای سعی و خطا استوار بوده که با انجام آزمایش کیفیت آنها اندازه گیری می‌شد، اما امروزه در بررسی‌های انجام شده از لحاظ علمی ساختار منافذ و تخلخل و انرژی‌های سطحی و دیگر پارامترهای یک جاذب را از پیش تعیین می‌کنند و بر مبنای آن جاذب را استفاده می‌کنند. در ساختار مولکولی منظم مقدار جذب افزایش می‌یابد و میزان انتخاب پذیری نیز زیاد می‌شود. امروزه بشر قادر است مواد را در حد نانومتری از هم جدا کند.

در فرآیند جذب سطحی، جاذب را Adsorbent، ماده جذب شده را Adsorbate و مواد معلق را Adsorpt می‌نامیم.



شکل 2) اجزای فرآیند جذب سطحی

اساس پدیده جذب سطحی

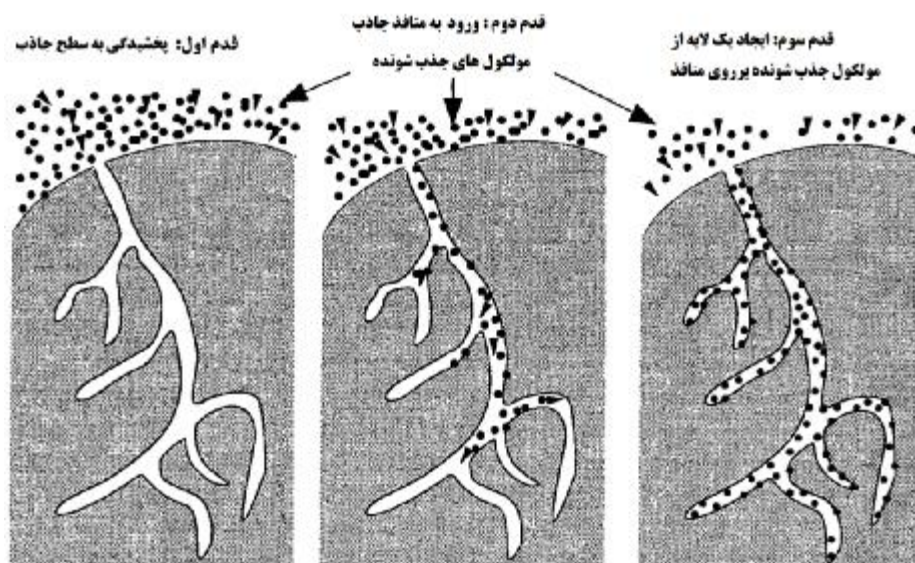
به طور کلی پدیده جذب سطحی به خاطر خواص موجود بر روی سطح جامد اتفاق می‌افتد. این خواص دارای دو منشأ می‌باشد. (1) پدیده ناپیوستگی (discontinuity): به این مفهوم است که خواص سطح جاذب از خواص بقیه جاذب متفاوت است در واقع اتم‌های سطح از اتم‌های توده متفاوت هستند. (2) اتم‌های سطح جامد غیر اشباع (Unsaturated) هستند. این پدیده به این مفهوم است که در زیر سطح اتم‌های جامد با اتم‌های مجاور پیوند سطحی ایجاد کرده است اما در سطح اتم‌ها از بالا آزاد هستند و توانایی ایجاد پیوند با مولکول‌های دیگر را دارند. از این رو یک حالت تمایل برای رسیدن به حالت اشباع در مولکول‌های سطح وجود دارد. بنابراین خاصیت جذب سطحی در آن ایجاد می‌شود.

ویژگی‌های پدیده جذب سطحی عبارتند از:

- این پدیده در سیستم‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی قابل اجرا است.
- برای خالص سازی در سیستم‌های گاز و مایع بصورت صنعتی قابل استفاده است.
- برای سیستم‌های تصفیه آب و فاضلاب و برطرف کردن آلودگی هوا قابل استفاده است.
- مثالهای اولیه جذب سطحی، شامل فرآیند جذب برای بازیافت هیدروکربن‌های آروماتیک در سال 1950 می‌باشد.
- امروزه با پیشرفت علم و تکنولوژی، جذب با استفاده از جاذبهای جدید با قابلیت جذب بسیار بالا صورت می‌پذیرد.

مکانیسم جذب

هر جاذب یک سطح درونی و یک سطح بیرونی دارد. سطح بیرونی جاذب قابل توجه نیست اما منافذ و سطوح داخلی سطح قابل توجهی را ایجاد می کنند. مراحل جذب در سطوح درونی در شکل 3 نشان داده شده است:



شکل 3) مراحل جذب در سطوح درونی

در مرحله اول و یا پخشیدگی جذب شونده به سطح جاذب، مولکولی که می خواهد جذب شود، خودش را از توده سیال به سطح جاذب می رساند. شکل وسط بیانگر پخشیدگی درونی (Internal diffusion) است که در آن مولکول مورد نظر وارد مجراهای مشخص شده در شکل می گردد. در مرحله آخر یک لایه از مولکول جذب شونده بر روی منافذ قرار می گیرد. بدین ترتیب عمل جذب تکمیل می شود. به طور کلی عمل جذب بیشتر به صورت واکنش رفت و برگشت انجام می گیرد. بدین ترتیب که هم جذب و هم دفع به طور همزمان انجام می شوند تا سرانجام به تعادل برسند.

به طور کلی پدیده جذب گرمازا است و انرژی حاصل بیانگر قدرت جذب است. این واکنش به صورت برگشت پذیر انجام می شود. بدین ترتیب که ما با اعمال یک شرایط خاصی جذب را انجام می دهیم و با تغییر وضعیت عملیات باعث می شویم که ماده مورد نظر از سطح جاذب دفع شود. این کار معمولاً با فشار و تغییرات آن صورت می پذیرد. هنگامی که فشار زیاد باشد جذب انجام می شود و با ایجاد خلأ جامد جذب شده از سطح جاذب جدا شده و عملیات دفع آن صورت می گیرد. همچنین با حرارت نیز می توان این کار را انجام داد بدین ترتیب که وقتی حرارت را کاهش می دهیم چون عملیات گرمازا است جذب بهتر صورت می گیرد و زمانی که دما افزایش یابد عملیات دفع انجام می شود.

انواع جذب سطحی

1- جذب فیزیکی یا جذب واندروالس (Physical Adsorption):

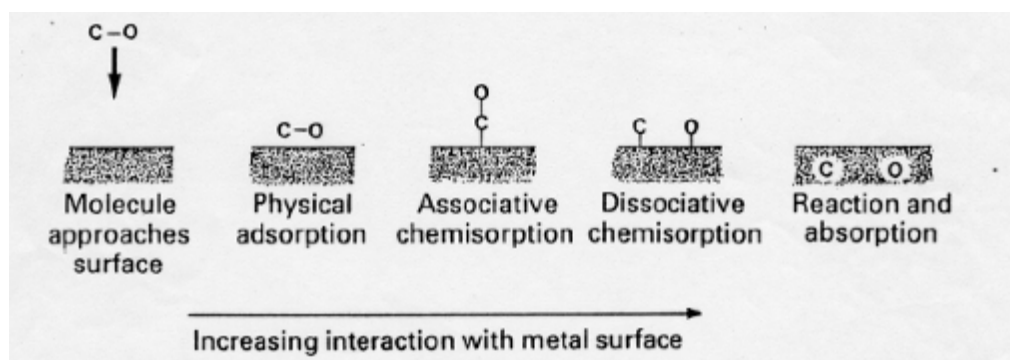
یک پدیده برگشت پذیر است که نتیجه نیروهای جاذبه بین مولکول‌های جامد و ماده جذب شده است. بین مولکول‌ها انواع نیروهای درونی وجود دارد و یکی از این نیروها، واندروالس است. این نیروی بسیار ضعیفی است که دو مولکول را به همدیگر جذب می‌کند. اما این نیرو تبادل الکترون و تشکیل پیوند شیمیایی را شامل نمی‌شود. این نیروی فیزیکی بسیار ضعیف است. برای مثال وقتی نیروی جاذبه بین یک جامد و یک گاز بیشتر از نیروهای بین مولکول‌های گاز باشد، گاز روی سطح جامد جمع و متراکم می‌شود. ماده جذب شده در شبکه کریستالی جامد نفوذ نمی‌کند و در آن حل نمی‌شود، بلکه در سطح باقی می‌ماند. در هر حال اگر جامد دارای تخلخل و لوله‌های موئین زیادی باشد، ماده جذب شده، در صورتی که جامد را تر کند، به داخل این شکاف‌ها نفوذ نمی‌کند.

2- جذب شیمیایی یا جذب سطحی فعال شده (Chemical Adsorption):

جذب شیمیایی یا جذب سطحی فعال شده نتیجه فعل و انفعالات شیمیایی جامد و ماده جذب شده است. قدرت پیوند شیمیایی حاصل به طور قابل توجهی در حالات مختلف تغییر می‌کند و شناسایی ترکیبات شیمیایی عملاً مشکل است ولی نیروهای چسبندگی معمولاً بیشتر از آن چیزی است که در جذب فیزیکی وجود دارد. این پیوند شیمیایی قوی است و حدود 100 برابر جذب فیزیکی انرژی جذب دارد. حرارت آزاد شده در جذب شیمیایی معمولاً زیاد و در حدود حرارت یک واکنش شیمیایی است. فرآیند عموماً برگشت ناپذیر است و با دفع و جداسازی اولیه ماده جذب شده، تغییر شیمیایی در آن مشاهده می‌شود.

دو نوع جذب شیمیایی وجود دارد: 1- جذب مولکولی : Associative chemical adsorption

2- جذب تفکیک شده Dissociative chemical adsorption : بسیار قوی‌تر از جذب شیمیایی Associative است. برای درک این دو مفهوم به شکل 4 توجه کنید.



شکل 4) شماتیکی از انواع مختلف جذب سطحی کربن مونوکسید بر روی سطح جامد

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.

جاذب ها و پدیده جذب سطحی

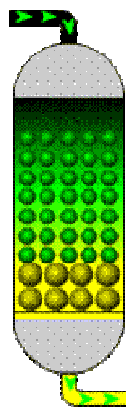
اکثر جاذب ها موادی بسیار متخلخل هستند و جذب سطحی عمدتاً روی دیواره حفره ها و یا مکان های مشخص در داخل ذره صورت می پذیرد. از آنجا که حفره ها بسیار کوچک هستند، مساحت سطح داخلی چندین مرتبه بزرگتر از مساحت خارجی است و ممکن است به $2000 \text{ m}^2/\text{g}$ برسد. اختلاف در جرم مولکولی، شکل و یا قطبیت باعث می شود برخی از مولکول ها محکمتر از سایرین روی سطح حفظ شوند یا ممکن است حفره ها کوچکتر از آن باشند که مولکول های درشت تر را بپذیرند، در نتیجه مواد از هم جدا می شوند. در بسیاری از موارد، اجزاء جذب شونده (یا جذب شده) به اندازه کافی محکم نگه داشته می شوند تا جداسازی کامل آن جزء از سیال همراه با جذب بسیار کم سایر اجزا ممکن باشد آنگاه می توان احیاء جاذب را انجام داد تا ماده جذب شده به صورت غلیظ یا تقریباً خالص بدست آید.

طبیعت جاذبها

جامدهای جاذب معمولاً به شکل گرانول مصرف می شوند و قطر آنها از 50 میکرومتر تا 12 میلیمتر متغیر است. جامدها باید براساس کاربرد و موقعیت مصرف بعضی خواص مهندسی را داشته باشند. آنها باید مقاومت و سختی خوبی داشته باشند تا در اثر حمل و نقل و همچنین وزن خود در بستر خرد نشوند. خاصیت جذب جاذبها یک مسئله دیگر است. جذب یک پدیده عمومی است و تمام جامدها، گازها و بخارات را به مقداری جذب می کنند. ولی در اهداف صنعتی فقط برخی از جامدات ظرفیت جذب لازم را دارند. از آنجا که جامدات در خواص مربوط به جذب مواد خاص بسیار اختصاصی و ویژه عمل می کنند، به نظر می رسد که طبیعت شیمیایی جامدات با خواص جذب آنها ارتباط داشته باشد. وجود سطح زیاد در واحد جرم برای جاذب های مفید ضروری است. در جذب گازی، سطح واقعی، سطح ذرات گرانول نیست بلکه سطح بزرگتری است که داخل سوراخ ها و یا شکاف ها را شامل می شود. این سوراخ ها معمولاً خیلی کوچک هستند و در حدود چند مولکول قطر دارند ولی تعداد زیاد آنها باعث تولید سطح بزرگتری برای جذب می شود.

طراحی آزمایش های جذب

یک سیستم جذب را به صورت زیر در نظر می گیریم:



شکل 5) نمایی از یک سیستم جذب سطحی

یک سیستم جذب متشکل از جاذب و یک سیال ورودی و یک محصول است که از سیستم خارج می‌شود. در سیال ورودی بعضی از اجزاء وجود دارند که ما می‌خواهیم تعدادی از آنها جذب شده و تعدادی جذب نشده خارج گردند. با توجه به اهمیت این موضوع باید فاکتورهایی که در آزمایش جذب تأثیر دارند مشخص شوند. این عوامل عبارتند از:

الف) خصوصیات جاذب

ب) خصوصیات جذب شونده

ج) خصوصیات محیط جذب

در حقیقت ما به سه دسته داده نیاز داریم و هر کدام از این موارد جایگاه خود را دارد. در قسمت الف باید جاذب‌های مختلف را شناخت. می‌توان به انواع مختلف سطوح جاذب را دسته بندی نمود. به عنوان مثال بر مبنای عکس العمل جاذب نسبت به جذب و دفع آب، می‌توان آنها را به دو دسته آبدوست و آبگریز دسته بندی نمود. یک دسته بندی دیگر این است که جاذبها را براساس اندازه منافذ دسته بندی کنیم. مثلاً منافذ میکرو، ماکرو و یا مزو. در جاذب‌های با منافذ میکرو (Micro porous)، اندازه منافذ بین صفر تا دو نانومتر است. جاذبهای با منافذ مزو (Meso porous) دارای منافذ بین دو تا پنجاه نانومتر هستند. در جاذب‌های با منافذ میکرو اندازه منافذ بالاتر از 50 نانومتر است. یک دسته بندی دیگر، دسته بندی شیمیایی است. مثلاً جاذب‌هایی بر مبنای اسید و یا جاذب‌هایی بر مبنای باز.

هم خواص فیزیکی و هم خواص شیمیایی جاذب‌ها در فرآیند جذب سطحی اهمیت دارد. خواص شیمیایی شامل نوع گروه‌های عاملی است که بر روی سطح جاذب هستند. خاصیت یونیزه شدن سطح جاذب نیز در خواص جاذب اثرگذار است.

خواص فیزیکی جاذب نیز اهمیت دارد، زیرا جاذب هم می‌تواند اشکال مختلف داشته باشد، به صورت پودر و یا دانه بندی باشد. از خواص فیزیکی مساحت جاذب برای جذب است و توزیع منافذ نیز از دیگر خصوصیات فیزیکی آن به شمار می‌رود.

بعضی از انواع مواد جاذب که به طور گسترده در صنعت به کار می‌روند عبارتند از: 1- کربن فعال از سوختن برخی مواد از قبیل چوب، زغال سنگ هسته یا پوست بعضی میوه ها، استخوان و... به دست می‌آید. این جاذب از دسته غیر قطبی‌ها می‌باشد و تمایل کمی به جذب آب و قدرت بالایی در جذب هیدروکربن‌ها دارد. 2- آلومینای فعال که از آلومینیوم اکساید ساخته می‌شود و در شکل‌های مختلفی از دانه‌های کوچک ناهموار تا دانه‌های منظم صاف موجود می‌باشد. این جاذب از دسته قطبی‌ها می‌باشد و در

میان جاذب‌های محکم و قوی قرار دارد. 3- سیلیکاژل یا اکسید سیلیسیوم یک جسم پرمفد گرانول بوده و از واکنش شیمیایی بین سیلیکات سدیم (شیشه مایع) و اسید سولفوریک ساخته می‌شود. این جاذب هم از دسته قطبی‌ها است. سیلیکاژل از نظر ساختاری بدون شکل است ولی از نظر ظاهری شبیه دانه های کریستال به نظر می‌آید. سیلیکاژل یک جاذب بی بو، بی مزه و غیر سمی است. 4- مولکولارسیوها یا الک‌های مولکولی، از لحاظ شیمیایی شبیه به آلومیناها می‌باشند و دارای حفره‌هایی یکسان می‌باشد در حالی که آلومیناها دارای حفره‌هایی با اندازه و شکل متفاوت هستند. 5- زئولیت‌ها: از سیلیکات‌های آبدار نوع داربستی شمرده می‌شوند و به صورت شبکه کریستالی شامل اکسیژن و آلومینیوم یا سیلیس هستند که به صورت ساختمانی چهار بعدی درآمده اند. قابلیت تعویض یونی زئولیت‌ها بسیار زیاد است.

اگر به فهرست جاذب‌ها نگاه کنیم، بیشتر شاهد اکسیدهای فلزی هستیم. مثل آلومینای فعال و یا سیلیکاژل. در رابطه با جاذب شونده مشخصات شیمیایی آن اهمیت زیادی دارد. این مشخصات شامل اندازه، شکل و ... می‌باشد. اندازه مولکولی که می‌خواهد جذب شود بر روی سرعت جذب اثر دارد. هرچه مولکول بزرگتر باشد، حلالیت آن در محیط جذب کمتر شده و تمایل بیشتری دارد که از محیط خارج شود و بر روی جاذب سریعتر جذب می‌شود. از سوی دیگر هرچه مولکول بزرگتر باشد، هنگام جذب فضای بیشتری را بر روی جاذب می‌گیرد. بنابراین گاهی کوچک‌تر بودن مولکول‌ها به نفع ما است. شکل مولکول نیز در مقدار حلالیت اثر دارد. پس سرعت جذب تابعی از شکل و اندازه مولکول‌های جذب شونده می‌باشد. خواصی از محیط جذب که تأثیر زیادی در جذب سطحی دارند بسیار زیاد است. برای مثال pH محلول، وجود سایر رقبا در محیط، دمای محیط و ... پس از اجرای آزمایش‌های جذب دو دسته اطلاعات مهم بدست می‌آید: ظرفیت جذب و میزان جاذب مورد نیاز.

انواع سیستم‌های جذب

1- پیمانه ای (Slurry)

2- ستونی (Column)

در آزمایش‌های پیمانه‌ای جاذب به صورت پودر است، با محلول مخلوط شده و پس از انجام عمل جذب، جاذب فیلتر می‌شود. مزایای آن عبارتند از: 1- استفاده از مقدار دلخواه جاذب برای رسیدن به غلظت مورد نظر، 2- جذب به صورت انتخابی است، 3- سرمایه گذاری اولیه کمتر است. 4- به شیوه های مختلف قابل اجرا هستند. سیستم‌های پیمانه‌ای بسیار ساده هستند و در مقیاس تجاری و بزرگ اجرا نمی‌شوند. از این روش بیشتر برای ایده گرفتن از اطلاعات جذب جهت طراحی‌های دیگر استفاده می‌شود. در آزمایش‌های ستونی سیال با جاذب درون یک ستون تماس دارند و جاذب به صورت گرانول است. یک عیب سیستم‌های ستونی این است که اگر سیال ورودی دارای مواد معلق زیادی باشد، باعث ایجاد انسداد در ستون و افت فشار می‌شود.

تبادل ، منحنی‌های همدمای جذب

اگر ماده جذب شونده و جاذب مدت زمان کافی با هم در تماس باشند، تعادلی بین مقدار ماده جذب شده و مقدار ماده باقی‌مانده در سیال برقرار می‌شود. منحنی همدمای جذب رابطه تعادلی بین غلظت در فاز سیال و غلظت در ذرات جامد در دمای مشخص است. غلظت گازها اغلب به صورت درصد مولی و یا فشار جزئی بیان می‌شود. غلظت مایعات اغلب برحسب واحدهای جرم مانند قسمت در میلیون (ppm) بیان می‌گردد. غلظت ماده جذب شده روی جامد به صورت جرم جذب شده به واحد جرم جاذب اولیه مشخص می‌شود.

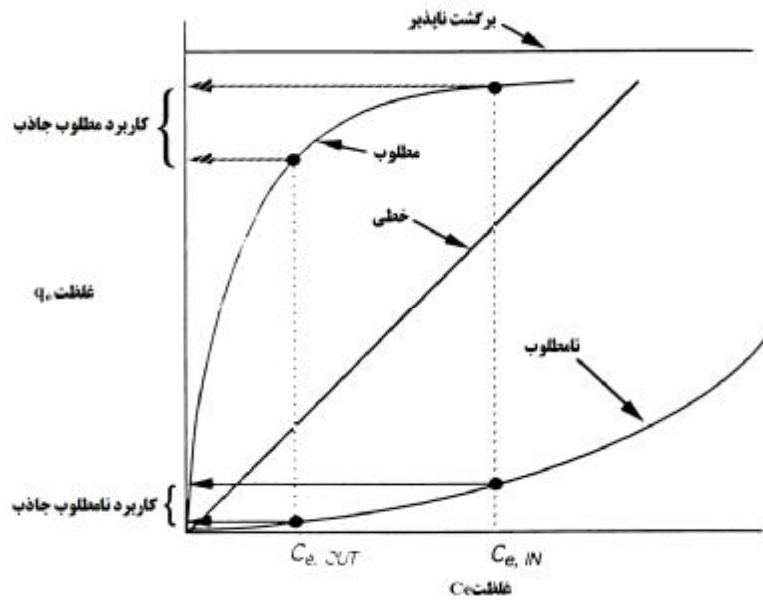
رابطه تعادلی بوسیله ایزوترم‌ها توصیف می‌شود. اگر عبارات زیر را بدین شکل تعریف نماییم:

Q_e : جرم ماده جذب شده (در حالت تعادل) به ازای جرم جاذب

C_e : غلظت تعادلی در محلول زمانی که مقدار ماده جذب شده برابر با Q_e باشد.

انواع منحنی‌های همدمای

برخی از اشکال شاخص منحنی‌های همدمای به صورت نمودارهای حسابی در شکل 5 نشان داده شده اند. منحنی همدمای خطی از مبدأ می‌گذرد و در آن مقدار ماده جذب شده متناسب با غلظت آن در سیال است. منحنی‌های همدمایی که انحناى آنها رو به بالا است مطلوب خوانده می‌شوند زیرا می‌توان بار نسبتاً زیادی را از سیالی با غلظت کم بدست آورد. حالت حدی یک منحنی همدمای مطلوب جذب برگشت ناپذیر است که در آن مقدار ماده جذب شده تا غلظت‌های بسیار پایین، مستقل از غلظت است. با افزایش دما، مقدار ماده جذب شده در تمام سیستم‌ها کاهش می‌یابد، در نتیجه می‌توان با بالا بردن دما ماده جذب شده را حتی از سیستم‌های برگشت پذیر نیز جدا کرد. اما وقتی جذب بسیار مطلوب و یا برگشت ناپذیر است در مقایسه با منحنی‌های همدمای خطی، واجدبی به دمای بسیار زیادی نیاز دارد. منحنی همدمایی که انحناى آن رو به پایین است، نامطلوب خوانده می‌شود چرا که بار نسبتاً کمی از ماده جذب شده بر روی جامد می‌نشیند.



شکل (5) برخی از ایزوترم‌های معمول

منحنی همدمای لانگمویر از رابطه $W = W_{\max} \left(\frac{Kc}{1 + Kc} \right)$ به دست می‌آید که در W بار ماده جذب شونده، c غلظت در سیال و K ثابت جذب است. این منحنی همدمای از نوع مطلوب است وقتی که K بزرگ و $Kc \geq 1$ باشد و هنگامی که $Kc < 1$ باشد منحنی همدمای تقریباً خطی است. منحنی همدمای لانگمویر با فرض وجود یک سطح یکنواخت به دست آمده است که فرض درستی نیست ولی این رابطه برای گازهایی که به دشواری جذب می‌شوند پاسخ خوبی می‌دهد. برای منحنی‌های همدمای بسیار مطلوب، رابطه تجربی فروندلیچ $W = bc^m$ که در آن b و m اعداد ثابت هستند و $m < 1$ است، غالباً انطباق بیشتری دارد.

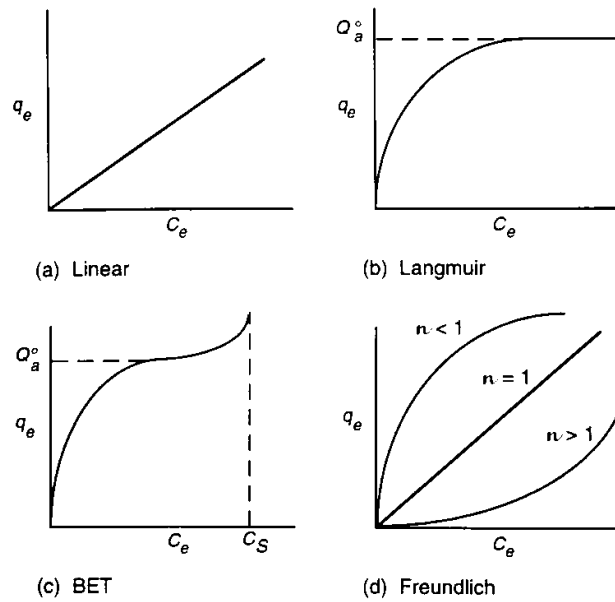
منحنی همدمای جذب عموماً برای یک جزء منفرد داده می‌شود ولی بسیاری از کاربردها دربرگیرنده مخلوط‌های چندجزئی است. منحنی همدمای لانگمویر به راحتی با اضافه کردن جملاتی به مخرج برای چند ماده جذب شونده اصلاح می‌شود:

$$W_1 = W_{\max} \left(\frac{K_1 c_1}{1 + K_1 c_1 + K_2 c_2 + \dots} \right)$$

اما همانگونه که قبلاً نیز به آن اشاره شد، این معادله برای موادی که محکم جذب می‌شوند چندان رضایت بخش نیست.

مدل‌های ایزوترم

شکل 6 نشان می‌دهد که چهار مدل ایزوترم وجود دارد.



ایزوترم جذب سطحی

رابطه‌ی میان مقدار ماده جذب شده (q) و غلظت آن ماده در فاز سیال (C)، در دمای T را ایزوترم جذب سطحی در دمای T گوئیم.