

بررسی جذب بنزن و اتیل بنزن بر روی سیلیکائروژل و کامپوزیت کربن - سیلیکائروژل

اکبر محمدی^۱، جعفر صادق مقدس^{۱*}

۱. مرکز تحقیقات پدیده‌های انتقال، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

مشخصات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: دریافت: ۲۶ تیر ۹۲ دریافت پس از اصلاح: ۲۷ آبان ۹۲ پذیرش نهایی: ۱۸ آبان ۹۳	سیلیکائروژل‌ها به دلیل داشتن سطح ویژه بالا و وجود ابعاد قابل کنترل در مقیاس نانومتری، سرعت و ظرفیت زیادی برای جذب آلاینده‌ها از خود نشان می‌دهند. در این تحقیق با استفاده از روش وزن‌سنجی، سینتیک جذب استاتیکی بنزن و اتیل بنزن بر روی سیلیکائروژل و کامپوزیت کربن فعال - سیلیکائروژل بررسی و نتایج با مدل نیروی محرکه خطی (LDF) تطابق داده شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که سیلیکائروژل بیشترین ظرفیت جذب را در جذب سطحی بنزن ($180 \frac{mg}{g}$) و اتیل بنزن ($30 \frac{mg}{g}$) دارد. همچنین کامپوزیت 0.5 wt. کربن فعال - سیلیکائروژل و کامپوزیت 2 wt. کربن فعال - سیلیکائروژل به ترتیب کمترین ظرفیت جذب را در جذب سطحی بنزن ($1225 \frac{mg}{g}$) و اتیل بنزن ($20 \frac{mg}{g}$) نشان دادند. تحلیل آماری نتایج، حاکی از تطابق قابل قبول منحنی جذب سطحی با مدل نیروی محرکه خطی است.
کلمات کلیدی: سیلیکائروژل ظرفیت جذب تعادلی سینتیک جذب مدل نیروی محرکه خطی	

* عهده دار مکاتبات

jafar.moghaddas@sut.ac.ir

حقوق ناشر محفوظ است.

۱- مقدمه

در میان آلاینده‌های مختلف، ترکیبات آلی فرار (VOCs)^۱ به دلیل سمی و سرطان‌زا بودن مورد توجه هستند. فرآیندهای جداسازی زیادی، مانند اکسیداسیون حرارتی [۳،۲،۱]، اکسیداسیون کاتالیزوری [۶،۵،۴]، بیوفیلتراسیون [۷]، میعان-ساز [۸]، فرآیندهای بازیابی بر پایه غشا [۹] و جذب سطحی [۱۰]، برای پیشگیری از انتشار این مواد بکار برده می‌شوند. اما فرآیندی که عمدتاً مورد استفاده قرار می‌گیرد، جذب سطحی با جاذب‌های دارای مساحت سطح ویژه بالا و امکان استفاده در سیکل‌های متوالی می‌باشد [۱۲،۱۱]. اندازه حفره، سطح ویژه و شیمی سطح حفره، فاکتورهای عمده در فرآیند جذب سطحی می‌باشند. سیلیکات‌روژل‌ها، نانو ساختار و متخلخل بوده، سطح ویژه بالایی دارند و اندازه حفره‌هایشان، بین ۵۰-۲۰ نانومتر می‌باشد. به دلیل داشتن ویژگی‌های منحصر بفرد ذکر شده، جاذب‌های سیلیکات‌روژل به آسانی قابل بازیافت بوده و ظرفیت جذب زیادی را نسبت به جاذب‌های متداول دارند. از طرفی با توجه به این‌که، بخار آب در بسیاری از جریان‌های گازی صنعتی و محیط‌های سر پوشیده وجود داشته و به صورت رقابتی جذب جاذب شده و حتی می‌تواند ظرفیت جذب را تغییر دهد، لذا سیلیکات‌روژل‌های آب‌گریز جاذب فوق‌العاده بخارات BTEX در حضور بخار آب، در مقایسه با جاذب‌های دیگر، مخصوصاً کربن فعال و سیلیکاژل بوده و گزینه خوبی برای فرآیند جذب سطحی می‌باشند [۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷]. به طوری که در سال ۲۰۱۱، Baojuan Dou و همکارانش، با بررسی جذب و دفع بنزن، در حالت ناپیوسته و پیوسته، بر روی سیلیکات‌روژل و کامپوزیت سیلیکات‌روژل-کربن فعال، نشان دادند که این جاذب‌ها، ظرفیت جذب بالایی دارند [۱۷]. این در حالی است که در سال ۲۰۰۸، Gork و همکاران، ظرفیت جذب بالای سیلیکات‌روژل آبدوست و آب‌گریز را برای دو ترکیب فوق‌العاده فرار ۱- منتول و ۲- متوکسی پیرازین، گزارش کرده بودند [۱۸]. ایزوترم جذب، ارتباط بین میزان ماده جذب شده در واحد جرم جاذب در دمای ثابت و غلظت آن در محلول تعادلی بوده و معمولاً به وسیله برهم‌کنش‌های جاذب- جذب شونده، تعریف می‌شود و دانستن آن برای کارهای تجربی ضروری است. معمولاً ایزوترم‌ها نشان‌دهنده‌ی ظرفیت‌های جاذب در غلظت‌های مختلف گاز می‌باشند [۱۰، ۱۹، ۲۰].

۲- تئوری تحقیق

به طور کلی برای تعیین ایزوترم جذب از ۳ روش استفاده می‌شود:

روش حجمی ثابت (ساکن): در این روش، جاذب در یک مخزن غیر قابل نفوذ توسط هوا با فشار اولیه‌ی گاز درونی آن، جا داده می‌شود. وقتی که جذب اتفاق می‌افتد فشار مخزن کاهش یافته، تا زمانی که حالت تعادل برقرار می‌شود. ظرفیت جذب می‌تواند به وسیله‌ی اختلاف فشار اولیه و تعادلی بدست آید. این روش، به روش حجم ثابت یا روش حجمی نیز مشهور است [۲۱].

روش ستون دینامیکی: جاذب در ستون تست پر می‌شود. با جاری شدن جریان گاز حامل (هوا، هلیوم و یا نیتروژن) همراه با غلظت ثابت VOC و آنالیز جریان پایین‌دستی، منحنی شکست بدست می‌آید. ظرفیت جذب به وسیله‌ی اختلاف جرم VOC در ورودی و خروجی محاسبه می‌شود [۲۱].

روش وزن‌سنجی: در این روش، ظرفیت جذب از تغییر وزن جاذب در طی فرآیند جذب بدست می‌آید، در این روش به ترازوی الکترونیکی با دقت بالا نیازمند است. از آنجایی که عدد نشان داده شده توسط ترازو برای کل ترکیبات است، بنابراین این روش تنها برای جذب فیزیکی تک جزئی بکار می‌رود. همچنین، زمانی که جذب همراه با واکنش شیمیایی باشد، تغییر وزن نمی‌تواند نشان‌دهنده ظرفیت جذب باشد [۲۱].

محققین زیادی با بررسی بسترهای جذب، مکانیسم‌های جذب سطحی را بر اساس دو مدل کلی جذب سینتیکی و جذب تعادلی بر روی سطح جاذب، گزارش کرده‌اند. مدل‌های سینتیکی استفاده شده برای بیان مکانیسم جذب به دو گروه زیر تقسیم می‌شوند:

الف) مدل‌هایی که فرض می‌کنند مرحله کنترل‌کننده، انتقال جرم است (نفوذ سطحی همگن، نفوذ حفره و مدل‌های نفوذ غیرهمگن).

ب) مدل‌هایی که فرض می‌کنند جذب به وسیله پدیده-های سطحی کنترل می‌شود.

مدل سینتیکی نیروی محرکه خطی (LDF)^۲ در سال ۱۹۹۵، توسط Gkuekauf معرفی شده است. بر طبق این مدل، سرعت واکنش توسط اختلاف غلظت‌های تعادلی و غیرتعادلی جذب شونده فاز گاز، کنترل می‌شود [۲۰].

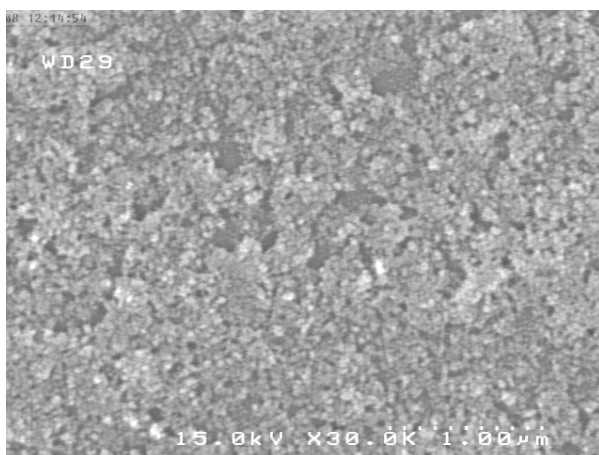
² Linear Driving Force

¹ Volatile Organic Compounds

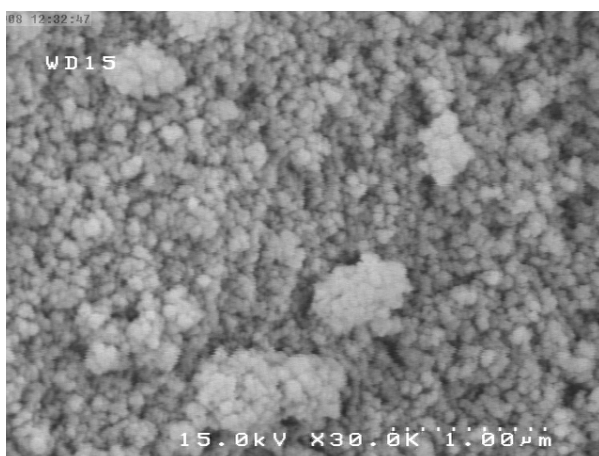
بررسی جذب بنزن و اتیل بنزن بر روی سیلیکائتروژل و کامپوزیت کربن- سیلیکائتروژل

جدول (۱) مشخصات جاذب‌های استفاده شده

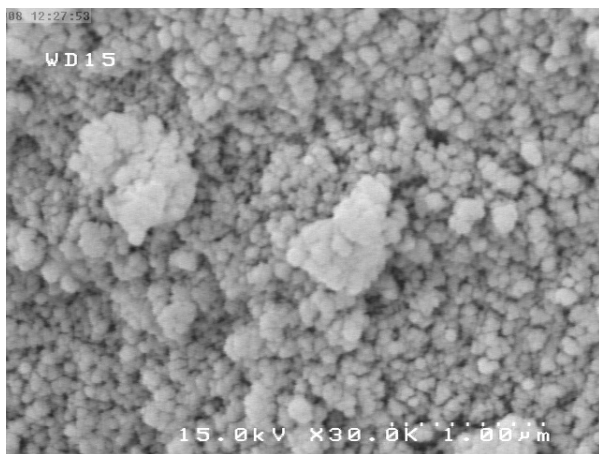
جاذب	سطح ویژه (m ² /g)	قطر متوسط حفره‌ها (nm)	حجم کل حفره‌ها (cm ³ /g)
سیلیکائتروژل	۴۲۷	۱۹/۷۲	۲/۱۱
سیلیکائتروژل حاوی ۰/۵٪ وزنی کربن فعال	۳۶۰	۳۲/۳۸	۲/۹۱
سیلیکائتروژل حاوی ۲٪ وزنی کربن فعال	۳۵۸	۲۹/۵۲	۲/۶۴



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱) تصاویر SEM نمونه (الف) سیلیکائتروژل،
(ب) کامپوزیت wt. ۰/۵٪ کربن- سیلیکائتروژل و
(ج) کامپوزیت wt. ۲٪ کربن- سیلیکائتروژل

در این تحقیق با استفاده از روش وزن‌سنجی، تغییر وزن جاذب با گذشت زمان ثبت شد. سپس داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده، با استفاده از مدل نیروی محرکه خطی مدل-سازي شده و پارامتر جذب محاسبه شد.

۳- مواد و روش تحقیق

برای بدست آوردن منحنی و پارامتر جذب، از بنزن و اتیل بنزن (ساخت شرکت Merck) و جاذب سیلیکائتروژل آگریز و کامپوزیت‌های آن استفاده شده است. مشخصات جاذب‌ها در جدول ۱ آورده شده است. شکل ۱ تصاویر SEM نمونه‌های جاذب استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. تجهیزات استفاده شده، ظرف مخصوص غیر قابل نفوذ برای هوا، ترازوی با دقت ۱۰^{-۵} گرم (METTLER, AE 240)، آون (FANAZMAGOSTAR) و اسپاتر جهت برداشتن جاذب، می‌باشند.

قبل از تعیین منحنی جذب، همه جاذب‌ها به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۲۰ °C گاز زدایی شدند. حدود ۵ میلی‌لیتر از آلاینده مایع به داخل ظرف غیر قابل نفوذ توسط هوا، ریخته شد و جاذب‌ها طوری در این ظرف قرار داده شدند که تنها در معرض بخارات آلاینده بودند. تغییر وزن جاذب در زمان‌های مشخص، تا رسیدن به اشباع تعادلی با استفاده از روش وزن-سنجی ثبت شد و داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده، به وسیله مدل نیروی محرکه خطی مدل‌سازی شده و پارامتر جذب محاسبه شد. همه آزمایشات در دمای ۲۵ °C برای ۳ نوع جاذب انجام شدند.

۴- تحلیل نتایج

۴-۱- آنالیز SEM

دارای ذرات کروی بوده و اندازه این ذرات در کامپوزیت‌ها بزرگ‌تر از نمونه‌ی خالص می‌باشند. سیلیکائتروژل، سطحی همگن و یکنواخت از ذرات را نشان می‌دهد و در تصاویر مربوط به کامپوزیت‌ها، ذرات کربن قابل مشاهده می‌باشند.

تصاویر SEM (شکل ۱) ساختاری نانومتری و متخلخل را برای هر سه نمونه نشان می‌دهند. نمونه‌ی خالص و کامپوزیت‌ها

۴-۲- جذب ناپیوسته

شکل ۲ نشان دهنده ایزوترم جذب بنزن بر روی (الف) سیلیکاتروژل، (ب) کامپوزیت wt. ۰/۵٪ کربن- سیلیکاتروژل و (ج) کامپوزیت wt. ۲٪ کربن- سیلیکاتروژل می باشد. با توجه به این شکل، مشاهده می شود که ظرفیت جذب تعادلی بنزن بر روی این جاذبها به ترتیب زیر تغییر می کند:

سیلیکاتروژل < کامپوزیت wt. ۲٪ کربن- سیلیکاتروژل < سیلیکاتروژل < کامپوزیت wt. ۰/۵٪ کربن- سیلیکاتروژل
با توجه به این که ظرفیت جذب تعادلی متناسب با سطح قابل دسترس برای جذب و معکوس اندازه حفره های جاذب (در فشارهای پایین) [۱۷]، می باشد و از آنجایی که سیلیکاتروژل دارای بیشترین سطح ویژه در میان سایر جاذبها می باشد، بنابراین بدیهی است که بیشترین ظرفیت جذب تعادلی را نیز داشته باشد. چون کامپوزیت wt. ۲٪ کربن-سیلیکاتروژل اندازه متوسط حفره های کمتری را نسبت به کامپوزیت wt. ۰/۵٪ کربن- سیلیکاتروژل دارد، بنابراین ظرفیت جذب تعادلی کامپوزیت wt. ۲٪ کربن فعال-سیلیکاتروژل بیشتر از کامپوزیت wt. ۰/۵٪ کربن فعال-سیلیکاتروژل می باشد. رفتار جذب استاتیکی اتیل بنزن بر روی (الف) سیلیکاتروژل، (ب) کامپوزیت wt. ۰/۵٪ کربن-سیلیکاتروژل و (ج) کامپوزیت wt. ۲٪ کربن- سیلیکاتروژل در شکل ۳ آمده است. با توجه به این شکل پیداست که ظرفیت جذب استاتیکی اتیل بنزن به ترتیب زیر تغییر می کند:

سیلیکاتروژل < کامپوزیت wt. ۰/۵٪ کربن- سیلیکاتروژل < کامپوزیت wt. ۲٪ کربن- سیلیکاتروژل
این نتیجه را می توان بر این اساس توضیح داد که، ظرفیت جذب استاتیکی ترکیبات آلی فرار متناسب سطح ویژه و حجم کلی حفره جاذب [۱۷] می باشد و چون سطح ویژه سیلیکاتروژل بیشتر از کامپوزیت های آن است، لذا ظرفیت جذب تعادلی آن نیز بیشتر است. کامپوزیت wt. ۰/۵٪ کربن- سیلیکاتروژل، حجم حفره بیشتری را نسبت به کامپوزیت wt. ۲٪ کربن- سیلیکاتروژل دارد، بنابراین ظرفیت جذب استاتیکی کامپوزیت wt. ۰/۵٪ کربن- سیلیکاتروژل بیشتر از کامپوزیت wt. ۲٪ کربن-سیلیکاتروژل می باشد. در شکل ۲ روند جذب استاتیکی بنزن بر روی سیلیکاتروژل متفاوت از جذب استاتیکی بنزن بر روی کامپوزیت کربن فعال - سیلیکاتروژل است. این تفاوت نشان دهنده احتمال چند لایه- ای بودن فرآیند جذب سطحی بر روی سیلیکاتروژل می باشد. از آنجایی که تعیین وزن جاذب در زمان های مشخص به

وسیله روش وزن سنجی انجام شده، بنابراین متفاوت بودن مکانیسم جذب، تفاوتی در نحوه اندازه گیری ظرفیت اشباع تعادلی سیلیکاتروژل ایجاد نمی کند.

۴-۳- سینتیک جذب

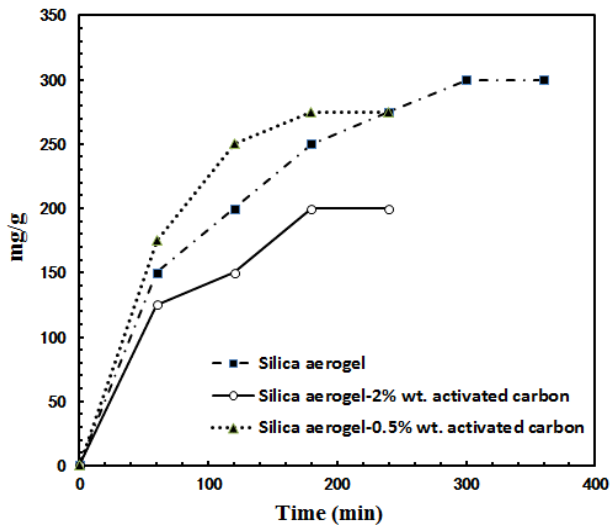
سینتیک جذب و دفع اهمیت اساسی در کاربردهای واقعی دارد. سینتیک جذب تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند غلظت ماده جذب شونده، مقدار، اندازه و سطح ویژه جاذب و درجه حرارت محیط قرار می گیرد. مطالعات نشان داده است که مدل نیروی محرکه خطی (LDF)، در اکثر نمونه های سینتیک جذب بخار/ گازهای متفاوت بر روی کربن فعال، مواد دارای چارچوب فلزی آلی، کربن مولکولی و مواد مزوحفره سیلیکائی پیروی می شود [۱۷]. به همین دلیل در این پژوهش از این مدل برای بررسی سینتیک جذب استفاده شده است. مدل نیروی محرکه خطی برای جذب، توسط معادله زیر بیان می شود:

(۱)

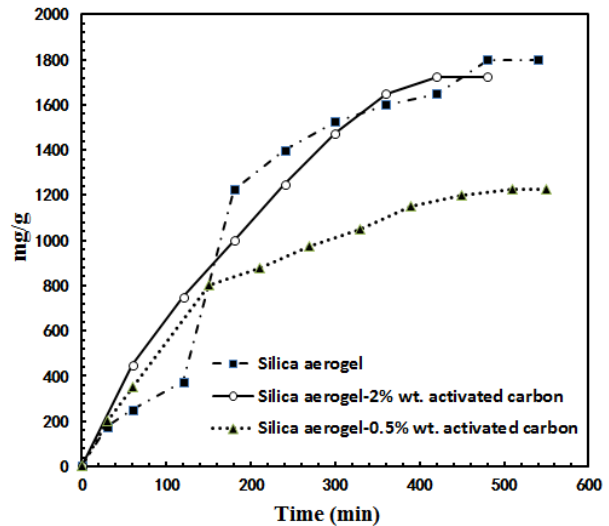
در این معادله M_t جرم جذب شونده (g) در زمان t ، M_e ظرفیت اشباع تعادلی (g) و k (1/min) ثابت سرعت جذب می باشد [۱۷].

شکل های ۴ و ۵ به ترتیب، نشان دهنده نمودار $\frac{M_t}{M_e}$ بر حسب زمان و برازش های متناظر برای مدل LDF در جذب بنزن و اتیل بنزن بر روی (الف) سیلیکاتروژل، (ب) کامپوزیت wt. ۰/۵٪ کربن- سیلیکاتروژل و (ج) کامپوزیت wt. ۲٪ کربن- سیلیکاتروژل می باشند.

در حالت کلی، انتقال جذب شونده در ۴ مرحله متوالی صورت می گیرد: (i) انتقال جذب شونده از توده محلول به لایه مرزی اطراف ذرات جاذب (ii) انتقال حل شونده در امتداد لایه مرزی (iii) نفوذ درون ذره ای حل شونده به داخل حفره- ها (iv) جذب و دفع جذب شونده. کل فرآیند توسط یکی از این مراحل یا ترکیبی از آن ها کنترل می شود [۲۰] و چون سینتیک جذب برای ۳ جاذب، تقریباً از مدل LDF پیروی می کند (شکل های ۵ و ۴). بنابراین می توان گفت که در جذب بنزن و اتیل بنزن بر روی این جاذبها نفوذ از میان مانع مرحله تعیین کننده سرعت جذب می باشد. مانع ایجاد شده نتیجه ای انقباض تخلخل با اندازه های مشابه با مولکول های بنزن و اتیل- بنزن یا مانع نفوذ سطحی می باشد [۱۷]. مدل نیروی محرکه خطی بکار رفته برای مدل سازی داده های تجربی واکنش



شکل (۳) رفتار جذب استاتیک اتیل بنزن بر روی (الف) سیلیکا ائروژل، (ب) کامپوزیت ۰/۵ wt. کربن- سیلیکا ائروژل و (ج) کامپوزیت ۲ wt. کربن- سیلیکا ائروژل



شکل (۴) رفتار جذب استاتیک بنزن بر روی (الف) سیلیکا ائروژل، (ب) کامپوزیت ۰/۵ wt. کربن- سیلیکا ائروژل و (ج) کامپوزیت ۲ wt. کربن- سیلیکا ائروژل

این انحرافات با نشانه‌های لوزی و مربع در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده‌اند. در شکل ۶ (الف) انحراف داده‌های جذب بنزن بر روی سیلیکا ائروژل در ابتدای فرآیند جذب، بیشتر از داده‌های مدل است. احتمالاً این انحراف به دلیل جذب سطحی چند لایه‌ای بنزن بر روی سیلیکا ائروژل است. در مجموع مقادیر این خطاها قابل قبول بوده و فرآیند جذب سطحی بنزن و اتیل بنزن بر روی سیلیکا ائروژل و کامپوزیت‌های آن با کربن فعال، از مدل نیروی محرکه خطی پیروی می‌کند.

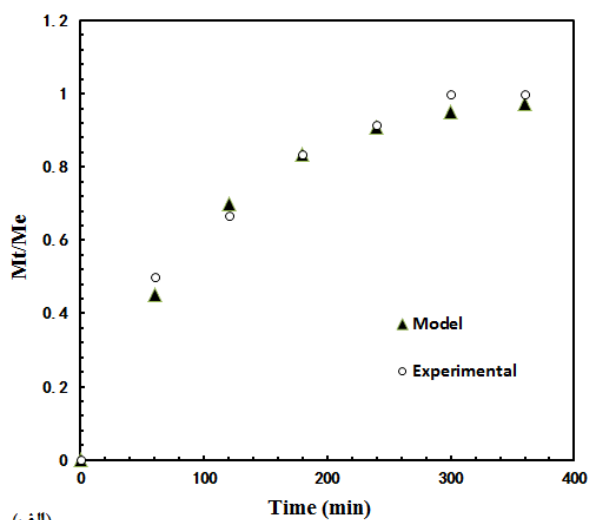
۴-۵- ثابت سرعت جذب

برای بدست آوردن ثابت سرعت جذب، داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از معادله ۱ خطی‌سازی شدند. با توجه به داده‌های جدول ۲ مشاهده می‌شود که ثابت سرعت جذب اتیل بنزن بر روی سیلیکا ائروژل و کامپوزیت‌های آن بیشتر از بنزن است. بنابراین نتیجه می‌شود که سرعت جذب اتیل بنزن بر روی سیلیکا ائروژل و کامپوزیت‌های آن بیشتر از سرعت جذب بنزن است، اگرچه ظرفیت اشباع تعادلی اتیل بنزن کمتر از بنزن می‌باشد. بیشتر بودن سرعت جذب اتیل بنزن نسبت به بنزن می‌تواند مربوط به سنگین بودن مولکول اتیل بنزن در مقایسه با بنزن باشد. همچنین برهم‌کنش اتیل بنزن و شاخه اتیل موجود در ساختار آن با سیلیکا ائروژل، کامپوزیت‌های کربن فعال-سیلیکا ائروژل و گروه‌های عاملی موجود در ساختار آن‌ها می‌تواند منجر به افزایش سرعت جذب اتیل بنزن نسبت به بنزن شود.

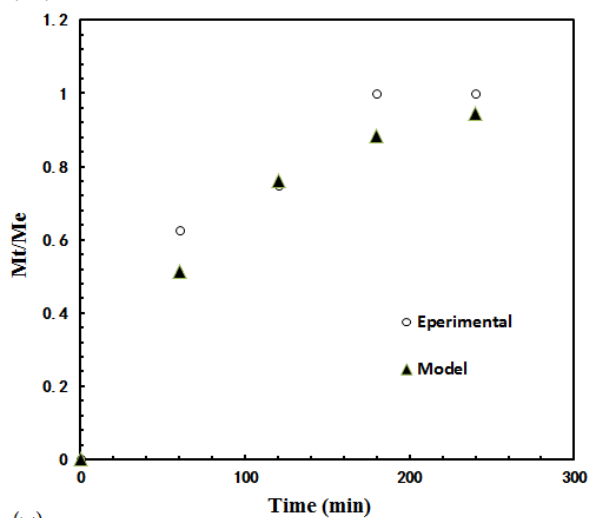
جذب، درجه یک است، بنابراین با صرف نظر از انحراف جزئی داده‌های تجربی از داده‌های مدل، می‌توان گفت که واکنش جذب بنزن و اتیل بنزن بر روی سیلیکا ائروژل و کامپوزیت‌های آن درجه یک هستند. روند تغییرات $\frac{M_t}{M_e}$ بر حسب زمان در جذب بنزن و اتیل بنزن بر روی سیلیکا ائروژل و کامپوزیت کربن فعال- سیلیکا ائروژل نیز، بیانگر درجه یک بودن واکنش است (شکل‌های ۴ و ۵). انحراف داده‌های تجربی از داده‌های مدل در ابتدای جذب بنزن بر روی سیلیکا ائروژل ممکن است به دلیل جذب چند لایه‌ای بنزن بر روی سیلیکا ائروژل در ابتدای جذب باشد.

۴-۴- تحلیل آماری

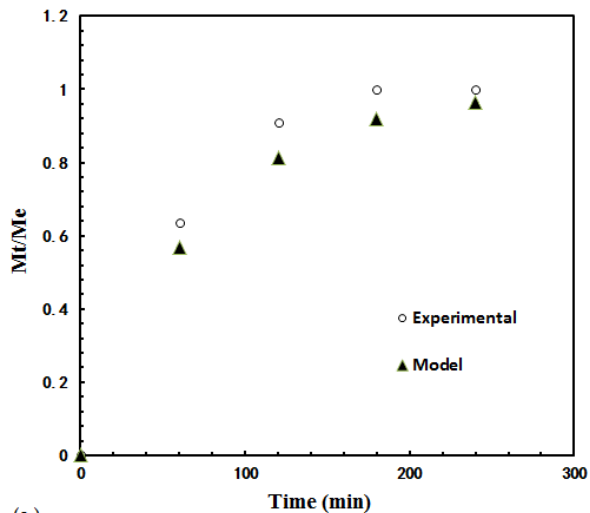
برای تعیین میزان دقت مدل سینتیکی جذب، از تحلیل آماری استفاده شده است. شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب میزان انحراف داده‌های آزمایشگاهی جذب سطحی بنزن و اتیل بنزن را از داده‌های مدل نیروی محرکه خطی نشان می‌دهد. در حالت ایده‌آل داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های مدل باید بر خط ۴۵ درجه منطبق باشند. اما با توجه به ساختار جاذب‌ها، خواص جذب شونده‌ها، تغییر احتمالی دمای محیط، تفاوت مکانیسم جذب (تک لایه‌ای و چند لایه‌ای) و خطای دستگاه، میزان متغیری از انحراف (بین ۸٪ و ۱۰٪-) بین داده‌های تجربی و مدل نیروی محرکه خطی دیده می‌شود (علامت مثبت نشان دهنده بیشتر بودن مقادیر داده‌های تجربی و علامت منفی بیانگر کمتر بودن مقادیر این داده‌ها از داده‌های مدل است).



(الف)

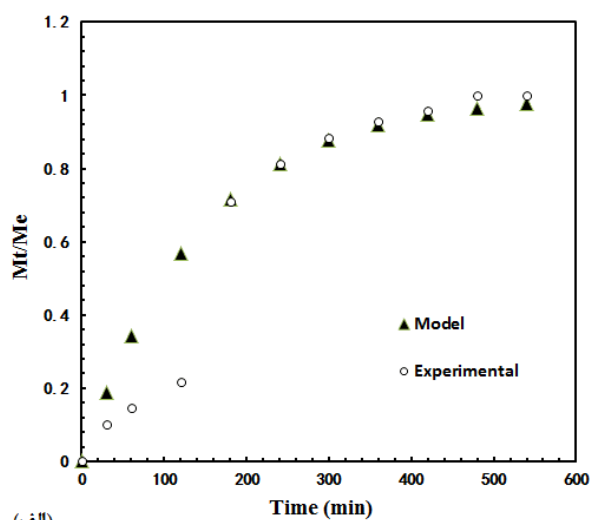


(ب)

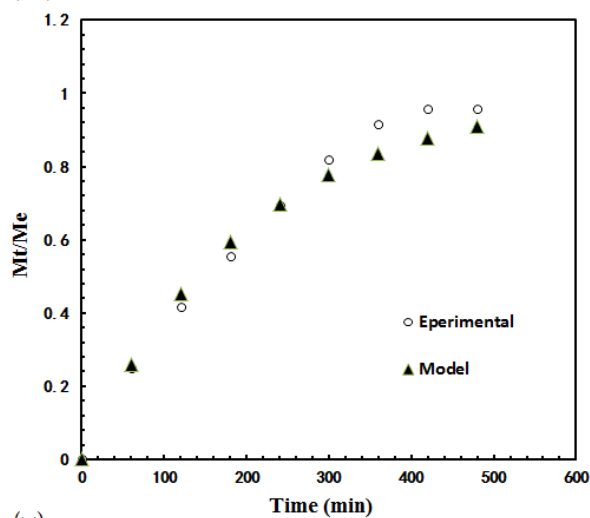


(ج)

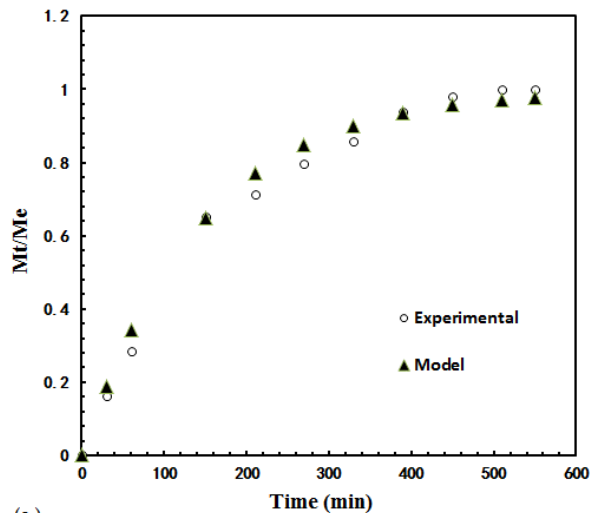
شکل (۵) نمودار سینتیک جذب اتیل بنزن بر روی (الف) سیلیکاآئروژل، (ب) کامپوزیت wt. ۲٪ کربن فعال و سیلیکاآئروژل و (ج) کامپوزیت wt. ۵٪/۰ کربن فعال-سیلیکاآئروژل



(الف)



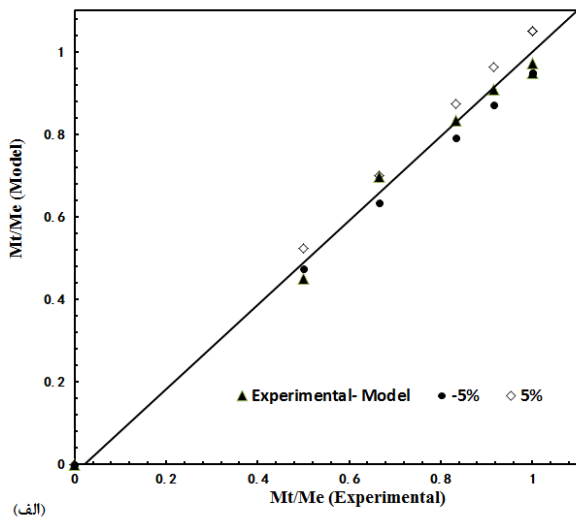
(ب)



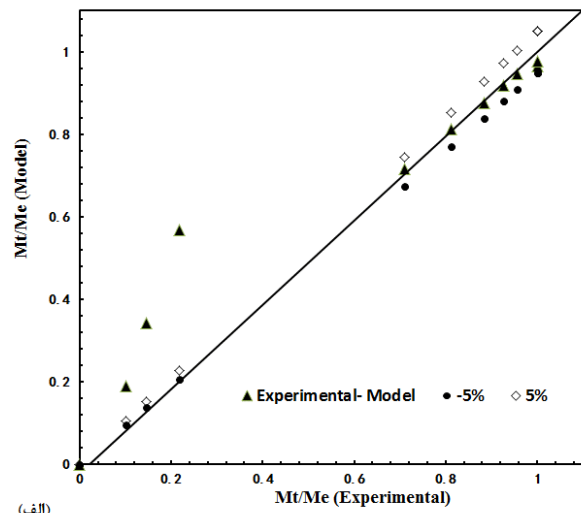
(ج)

شکل (۴) نمودار سینتیک جذب بنزن بر روی (الف) سیلیکاآئروژل، (ب) کامپوزیت wt. ۲٪ کربن فعال-سیلیکاآئروژل و (ج) کامپوزیت wt. ۵٪/۰ کربن فعال-سیلیکاآئروژل

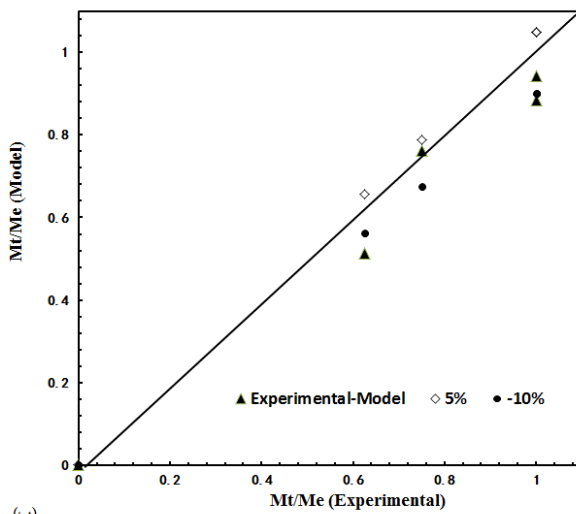
بررسی جذب بنزن و اتیل بنزن بر روی سیلیکاآئروژل و کامپوزیت کربن-سیلیکاآئروژل



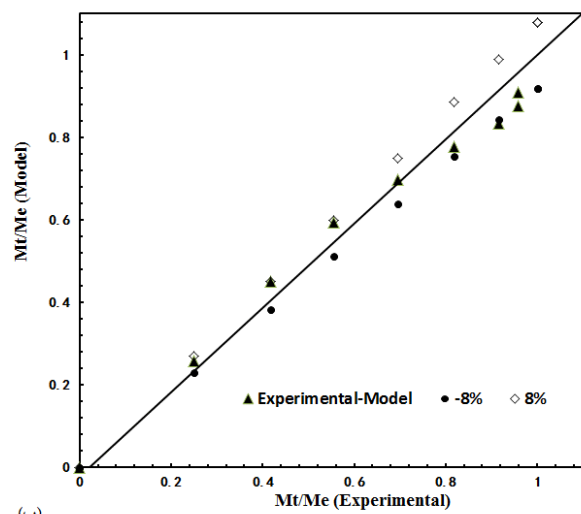
(الف)



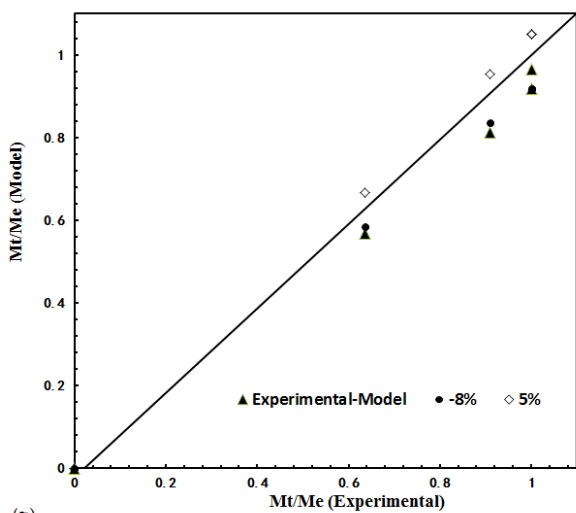
(الف)



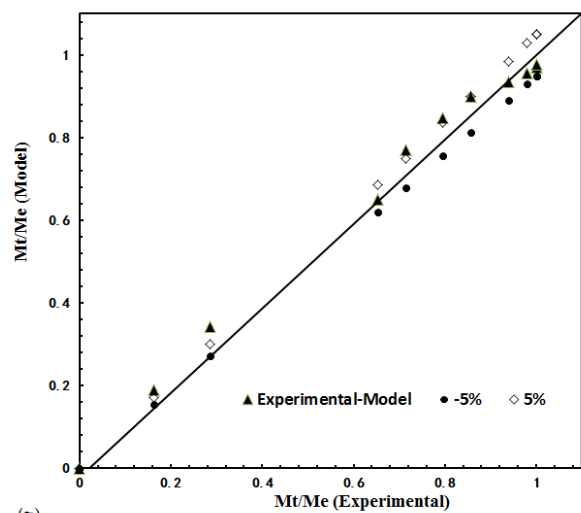
(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

شکل (۷) تحلیل آماری داده‌های آزمایشگاهی حاصل از جذب اتیل بنزن بر روی (الف) سیلیکاآئروژل، (ب) کامپوزیت wt. ۲٪ کربن فعال-سیلیکاآئروژل و (ج) کامپوزیت wt. ۵٪/۰ کربن فعال-سیلیکاآئروژل

شکل (۶) تحلیل آماری داده‌های آزمایشگاهی حاصل از جذب بنزن بر روی (الف) سیلیکاآئروژل، (ب) کامپوزیت wt. ۲٪ کربن فعال-سیلیکاآئروژل و (ج) کامپوزیت wt. ۵٪/۰ کربن فعال و سیلیکاآئروژل

[7] S. P. Ottenger, and A. H. Van Den Oever (1983) "Kinetics of organic compound removal from waste gases with a biological filter", *Biotechnology and Bioengineering*, 25, 12, 3089-3102.

[8] P. Anita, and K. Wilfried (2006) "Exposure to Toluene in the printing industry is associated with subfecundity in women but not in men", *Occupational and Environmental Medicine*, 6, 443-448.

[9] S. I. Semenova (2004) "Polymer membranes for hydrocarbon separation and removal", *Journal of Membrane Science*, 231, 189-207.

[10] B. Crittenden, and W. J. Thomas (1998) *Adsorption Technology and Design*, First published, Linacre House, Jordan Hill, Oxford Ox2 8DP.

[11] J. C. Abril, M. A. L. denas, A. L. Solano, and D. C. Amoro's (2010) "Regeneration of activated carbons saturated with benzene or toluene using an oxygen-containing atmosphere", *Chemical Engineering Science*, 65, 2190-2198.

[12] S. Standeker, Z. Novak, and Z. Knez (2009) "Removal of BTEX vapours from waste gas stream using silica aerogels of different hydrophobicity", *Journal of Hazardous Materials*, 165, 1114-1118.

[13] V. K. K. Upadhyayula, S. Deng, M. C. Mitchell, and G. B. Smith (2009) "Application of carbon nanotube technology for removal of contaminants in drinking water: A review", *Science of the total Environment*, 408, 1-13.

[14] M. Alnaief, and I. Smirnova (2010) "Effect of surface functionalization of silica aerogel on their adsorptive and release properties", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 365, 1644-1649.

[15] S. Štandeker, Z. Novak, and Ž. Knez (2007) "Adsorption of toxic organic compounds from water with hydrophobic silica aerogels", *Journal of Colloid and Interface Science*, 310-362-368.

[16] U. K. H. Bangi, A. V. Rao, and A. P. Rao (2008) "A new route for preparation of sodium-silicate-based hydrophobic silica aerogels via ambient-pressure drying", *Science and technology of advanced materials*, 9, 0350036, 10 pp.

[17] B. Dou, J. Li, Y. Wang, H. Wang, C. Ma, and Z. Hao (2011) "adsorption and desorption performance of benzene over hierarchically structured carbon-silica aerogel composites", *Journal of Hazardous Materials*, 196, 194-200.

[18] B. S. K. Gorle, I. Smirnova, and M. A. McHugh (2009) "Adsorption and thermal release of highly volatile compounds in silica aerogels", *Journal of Supercritical Fluids*, 48, 85-92.

[19] M. H. Givianrad, M. Rabani, M. Saber-Tehrani, P. Aberoomand-Azar, and M. H. Sabzevari (2013) "Preparation and characterization of nanocomposite, silica aerogel, activated carbon and its adsorption Properties for Cd (II) ions from aqueous solution", *Journal of Saudi Chemical Society*, 17, 329-335.

[20] M. L. Soto, A. Moure, H. Domínguez, and J. C. Parajó (2011) "Recovery, concentration and purification of phenolic compounds by adsorption: A review", *Journal of food Engineering*, 105, 1-27.

[21] J. Peia, and J. S. Zhang (2012) "Determination of adsorption isotherm and diffusion coefficient of toluene on activated carbon at low concentrations", *Building and Environment*, 48, 66-76.

جدول (۲) ثابت سرعت جذب در مدل LDF

K($\frac{1}{min}$)		جذب شونده جاذب
اتیل بنزن	بنزن	
۰/۰۱	۰/۰۰۷	سیلیکا ائروژل
۰/۰۱۲	۰/۰۰۵	کامپوزیت ۲ wt. % کربن فعال و سیلیکا ائروژل
۰/۰۱۴	۰/۰۰۷	کامپوزیت ۵ wt. % کربن فعال و سیلیکا ائروژل

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، پس از بدست آوردن منحنی رفتار جذب بنزن و اتیل بنزن بر روی سیلیکا ائروژل و کامپوزیت‌های آن با کربن فعال، داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده با مدل LDF برازش شد. در جذب استاتیکی بنزن، سیلیکا ائروژل دارای بیشترین ظرفیت جذب ($180 \frac{mg}{g}$) و کامپوزیت ۵ wt. % کربن - سیلیکا ائروژل دارای کمترین ظرفیت جذب ($1225 \frac{mg}{g}$) می‌باشد. همچنین در جذب اتیل بنزن، بیشترین ظرفیت جذب مربوط به سیلیکا ائروژل ($30 \frac{mg}{g}$) و کمترین آن مربوط به کامپوزیت ۲ wt. % کربن - سیلیکا ائروژل ($20 \frac{mg}{g}$) می‌باشد. مدل سازی جذب استاتیکی بنزن و اتیل بنزن با استفاده از مدل LDF و تحلیل آماری این مدل سازی، نشان داد که داده‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی با این مدل دارند. با استفاده از این مدل، پارامتر سرعت جذب (K) اتیل بنزن بیشتر از بنزن بوده و سرعت جذب اتیل بنزن بر روی سیلیکا ائروژل و کامپوزیت‌های آن بیشتر از بنزن می‌باشد.

مراجع

- [1] J. C. William, and P. E. Lead (1997) *VOC Control strategies in plant design*, Waver Land Publisher, New York, 3rd ed..
- [2] Centre for Waste Reduction Technologies (1992) *Current and potential future industrial practices for reducing and controlling volatile organic compounds* New York, AIChE.
- [3] J. R. Marks, and T. Rhoads (1996) "Planning saves time and money, when installing VOC controls", *Chemical Processing*, 5, 42, Report EPA, 542-F-96-008, 1996.9.
- [4] E. N. Ruddy, and L. A. Carroll (1993) "Select the best VOC control strategy", *Chemical engineering Progress*, 89, 7, 28-35.
- [5] A. N. Patkar, and J. Laznow (1992) "Hazardous air pollutant control technologies", *Hazmat. World.*, 78, 231-237.
- [6] F. C. Marín, D. F. Jime'nez, and C. M. Castilla (2009) "Carbon aerogels from gallic acid-resorcinol mixtures as adsorbents of benzene, toluene and xylenes from dry and wet air under dynamic conditions", *Carbon*, 47, 463-469.

An investigation of adsorption of benzene and ethyl benzene over silica aerogel and carbon-silica aerogel composites

Akbar Mohammadi¹, Jafarsadegh Moghaddas^{1,*}

1. Transport Phenomena Research Center, Chemical Engineering Faculty, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

ABSTRACT

Silica aerogels have high specific surface area and manageable nano scale dimensions, showing high rate and capacity for pollutants adsorption. In this study, static adsorption kinetic of benzene and ethyl benzene over silica aerogel and activated carbon- silica aerogel composites were investigated using gravimetric methods and results were fitted using linear driving force (LDF) model. Results, showed the highest adsorption capacity of $1800 \frac{\text{mg}}{\text{g}}$ for benzene and $(300 \frac{\text{mg}}{\text{g}})$ for ethyl benzene. Also, composite of - 0.5% wt Silica aerogel and activated carbon and -2% wt silica aerogel and activated carbon showed the least adsorption capacity of benzene and ethyl benzene ($1225 \frac{\text{mg}}{\text{g}}$ and $200 \frac{\text{mg}}{\text{g}}$ respectively). The statistical analysis of results showed a good agreement between the adsorption curves and linear driving force model.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: July 17, 2013

Revised: November 18, 2013

Accepted: November 09, 2014

Key words:

Silica aerogel

Equilibrium adsorption capacity

Adsorption kinetic

Linear driving force model

All right reserved.

* Corresponding author

jafar.moghaddas@sut.ac.ir
