



## تعیین نمودار تعادلی جذب گاز HF روی زغال فعال

حسین بهرامی<sup>۱\*</sup>، سید جابر صفداری<sup>۲</sup>، سید محمدعلی موسویان<sup>۱</sup>

۱- دانشکده مهندسی شیمی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، صندوق پستی: ۴۵۶۳-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

۲- پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

**چکیده:** یکی از محصولات فرعی نامطلوب در صنعت غنی‌سازی اورانیم، گاز هیدروژن فلورید است. اثرات نامطلوب آن روی محیط زیست و تجهیزات فرایندی به علت سمیت و خوردندگی بالای آن جذب آن توسط برج‌های جذب (تله‌های شیمیایی) را ضروری ساخته است. یکی از جاذب‌های پیشنهادی برای جذب هیدروژن فلورید، زغال فعال است. منحنی تعادل جذب HF توسط زغال فعال یکی از اطلاعات مهم برای طراحی برج‌های جذب می‌باشد. به دلیل عدم وجود منحنی یاد شده و جاذب مناسب، در این مقاله به بررسی جذب سطحی هیدروژن فلورید بر روی چهار نوع زغال فعال پرداخته شده است. داده‌های تعادلی در فشارهای کم‌تر از ۳۰ میلی‌بار در دمای محیط به صورت تجربی به دست آمده است و مقادیر ثابت ایزوترم فرندلیچ، لانگمویر، توت و هنری از برازش با داده‌های آزمایشگاهی محاسبه شده است. هم چنین عوامل مؤثر بر جذب هیدروژن فلورید با انواع مختلف زغال فعال بررسی شده است. در نهایت ایزوترم‌های جاذب‌های مختلف با یکدیگر مقایسه و زغال نوع اول، دوم و چهارم جاذب‌های مناسب تشخیص داده شدند و از میان مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی نقاط تعادل، مدل توت برای زغال نوع اول، دوم و چهارم با متوسط درصد خطای مطلق، به ترتیب، برابر با ۱۲٫۹، ۱۶٫۵ و ۳۴٫۰٪ مطابقت بیش‌تر و بهتری با نتایج تجربی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** هیدروژن فلورید، جذب سطحی، زغال فعال، نمودار تعادلی، ایزوترم، غنی‌سازی اورانیم

## Equilibrium Curve Determination of HF Adsorption by Activated Carbon

H. Bahrami<sup>1,2</sup>, S.J. Safdari<sup>2</sup>, S.M.A. Mousavian<sup>1</sup>

1- Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, P.O. Box: 11365-4563, Tehran-Iran

2- Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran

**Abstract:** One of the byproducts of uranium enrichment industry is hydrogen fluoride gas. Due to the toxicity and corrosivity of the molecule, it has adverse effects on the environment and the process. Therefore, it must be removed by adsorption towers. The activated carbon is one of the proposed sorbent for the adsorption. Hydrogen fluoride adsorption equilibrium curve gives important information for designing the adsorption towers. In this article, the hydrogen fluoride adsorption and adsorption factors were determined experimentally, and four different types of carbon have been used. The operating pressure in all tests was less than 30 mbar. Comparison between the obtained experimental equilibrium curves shows that the first, second and fourth types of activated carbon are suitable for the adsorption of hydrogen fluoride. The experimental data were fitted using mathematical models of Langmuir, Freundlich, Toth and Henry. The results show that Toth mathematical model is more suitable than other models. Also, the absolute error were predicted by the model of Toth for the first, second and fourth types of the activated carbon were 12.9, 16.5 and 34 percent, respectively.

**Keywords:** Hydrogen Fluoride, Adsorption, Activated Carbon, Equilibrium Curve, Isotherm, Uranium Enrichment

\*email: hu\_bahrami@yahoo.com

تاریخ دریافت مقاله: ۸۸/۵/۳۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۸۹/۲/۲۷



## ۱- مقدمه

استفاده از اورانیم غنی شده در رآکتورهای قدرت و رآکتورهای تحقیقاتی باعث افزایش کاربرد اورانیم شده است. یکی از روش های غنی سازی اورانیم استفاده از سانتریفیوژ می باشد. در این روش اورانیم به صورت گاز اورانیم هگزا فلورید ( $UF_6$ ) مورد استفاده قرار می گیرد. در اثر واکنش گاز اورانیم هگزا فلورید با بخار آب، گاز هیدروژن فلورید تولید می گردد [۱].

به منظور کاهش خطر ورود گاز اورانیم هگزا فلورید به محیط و ایجاد شرایط لازم برای چرخش سانتریفیوژها در دوره های بسیار بالا، عملیات غنی سازی اورانیم در فشار خلاء انجام می گیرد. بنابراین در صورت وجود نشتی در سیستم، هوا وارد سیستم شده و در اثر واکنش بخار آب موجود در هوا با گاز اورانیم هگزا فلورید، گاز هیدروژن فلورید تولید می گردد. در سیستم خلاء نرخ نشتی بسته به نوع خلاء بایستی از یک اندازه مشخص و معین مجاز پایین تر باشد. با وجود این که متوسط مقدار این نشتی در خلاء بسیار پایین است، همواره مقدار بسیار کمی هوا وارد سیستم می گردد [۲]. بنابراین همواره مقداری گاز هیدروژن فلورید در اثر واکنش بخار آب موجود در هوا با اورانیم هگزا فلورید در گاز خروجی موجود می باشد.

گاز هیدروژن فلورید اثرات نامطلوبی بر روی محیط زیست و تجهیزات فرایندی مانند پمپ های خلاء و فشارسنج ها دارد. تنفس مقدار بسیار کمی از این گاز سبب بروز مشکلات زیادی برای دستگاه تنفسی می شود و حتی خطر مرگ را به همراه دارد. غلظت هیدروژن فلورید مجاز در گاز خروجی محدود به چند جزء در میلیون می باشد.

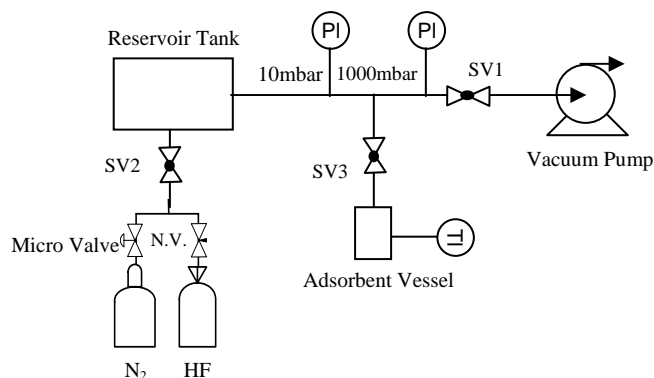
استفاده از روش جذب سطحی برای جذب مقادیر بسیار کم هیدروژن فلورید در گاز خروجی بسیار متداول است. به این نوع جذب، جذب از طریق تله های شیمیایی<sup>(۱)</sup> گفته می شود. با توجه به ضرورت استفاده از تله های شیمیایی برای جذب گاز هیدروژن فلورید در فرایند غنی سازی، بررسی جذب این گاز توسط جذب های مختلف ضروری است. جذب های گوناگونی مانند سدیم فلورید، آلومینا و زغال فعال برای جذب این گاز پیشنهاد شده است. میزان جذب هیدروژن فلورید با آلومینا بیش تر از میزان جذب این گاز توسط سدیم فلورید می باشد اما جذب هیدروژن فلورید با آلومینا واکنشی برگشت ناپذیر می باشد. با توجه به قیمت پایین زغال فعال بررسی جذب هیدروژن فلورید بر روی آن بسیار منطقی است. هم چنین زغال فعال می تواند به عنوان

جایگزین مناسبی برای جذب های سدیم فلورید و آلومینا باشد. استفاده از زغال فعال برای جذب ناخالصی ها در فازهای گاز و مایع بسیار متداول است. به عنوان مثال جذب آمونیم [۳ و ۴]، کربن دی اکسید [۵]، اکسیدهای نیتروژن<sup>(۲)</sup> [۶]، آب [۷] و اورانیم [۸ و ۹] توسط زغال فعال بررسی شده است.

جذب گاز هیدروژن فلورید و اورانیم هگزا فلورید با جذب های آلومینا و سدیم فلورید توسط بعضی محققان بررسی شده است [۱۰، ۱۱ و ۱۲]. بررسی های شولتز [۱۰] برای انتخاب جذب مناسب از میان انواع مختلف جذب های آلومینا برای جذب هیدروژن فلورید می باشد. در این بررسی ها شولتز افت فشار در بستر جذب، جذب مقادیر مختلف گاز نیتروژن، اورانیم هگزا فلورید و هیدروژن فلورید را بررسی نموده و تغییرات آلومینا و سدیم فلورید در اثر واکنش و تشکیل کمپلکس با اورانیم هگزا فلورید و هیدروژن فلورید را گزارش کرده است. استفانسون [۱۱] به ارایه مدل جذب برای اورانیم هگزا فلورید توسط سدیم فلورید پرداخته است. در مدل استفانسون روابط انتقال جرم، نرخ جذب و منحنی شکست مدل سازی و تأثیر پارامترهای مختلف با استفاده از مدل بررسی شده است. مک نیس [۱۲] جذب پویای گاز اورانیم هگزا فلورید با سدیم فلورید را بررسی و منحنی شکست و معادله نرخ جذب گاز اورانیم هگزا فلورید توسط جذب سدیم فلورید را گزارش نموده است. مطالعات محدودی نیز روی جذب گاز اورانیم هگزا فلورید توسط زغال فعال انجام شده است، اما نوع زغال فعال استفاده شده مشخص نگردیده است [۱۳ و ۱۴].

با وجود استفاده از جذب های سدیم فلورید، آلومینا و زغال فعال برای جذب گازهای اورانیم هگزا فلورید و هیدروژن فلورید در مقالات قبلی بررسی آن ها به منظور شناخت بهترین آن ها ضروری است. در گزارش های قبلی بررسی هایی در رابطه با جذب پویا و مدل سازی آن ها انجام شده است اما در رابطه با ایزوترم تعادلی اشان داده ای ارایه نشده است. به دلیل اهمیت داده های تعادلی در انتخاب جذب مناسب، در این مقاله داده های ایزوترم تعادلی ارایه می شود. برای انتخاب بهترین جذب در تله های شیمیایی، داده های ایزوترم تعادلی جذب گاز هیدروژن فلورید و اورانیم هگزا فلورید توسط زغال فعال، سدیم فلورید و آلومینا بایستی با هم مقایسه شوند.

تله های شیمیایی به طور متداول در واحدهای غنی سازی برای جذب هیدروژن فلورید و اورانیم هگزا فلورید باقی مانده از



شکل ۱- طرح‌واره‌ی تجهیزات استفاده شده برای انجام آزمایش‌ها.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی جاذب‌های استفاده شده

زغال فعال	شکل جاذب	قطر (mm)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	سطح (m <sup>2</sup> /g)	رطوبت (درصد جرمی)	فعال‌سازی
نوع اول	استوانه‌ای	۳	۴۸۰-۵۳۰	۱۱۰۰	۱	بخار آب
نوع دوم	استوانه‌ای	۴	۴۶۰-۵۱۰	۱۱۰۰	۱	بخار آب
نوع سوم	استوانه‌ای	۴	۵۶۰	۱۰۰۰	۱۲	شیمیایی
نوع چهارم	استوانه‌ای	۲٫۵	۴۲۰	۱۱۰۰	۱	بخار آب

## ۲-۲ روش کار

قبل از تماس جاذب و گاز HF، تمام سطوح داخلی مخازن و مسیرهای ارتباطی به وسیله گاز HF اثرناپذیر شدند. با مشخص بودن دما، فشار و حجم سیستم، مقدار موردنیاز گاز با استفاده از معادله‌ی گازهای ایده‌آل برحسب مول محاسبه شد. با سه بار تکرار هر آزمایش خطای داده‌ها به کم‌تر از پنج درصد رسید. در هر آزمایش ابتدا مقدار مشخصی از گاز در مخزن ذخیره وارد شده و پس از باز کردن شیر برقی بین مخزن ذخیره و ظرف جذب، فشار جدید با استفاده از فشارسنج مشخص گردید. حجم و دما نیز مشخص شدند. در نبود جاذب در ظرف جذب فشار نشان‌دهنده‌ی فشار ناشی از تغییر حجم است که با استفاده از معادله‌ی گازهای ایده‌آل قابل محاسبه می‌باشد

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} \quad (1)$$

که در آن فشار و حجم، در قبل و بعد از باز شدن شیر ظرف جذب، به ترتیب، با  $P_1$ ،  $V_1$ ،  $P_2$  و  $V_2$  نشان داده شده‌اند. فشار حاصل از انبساط گاز، در نبود جاذب در ظرف جذب، به عنوان فشار اولیه‌ی آن آزمایش با حضور جاذب در نظر گرفته می‌شود. در فشار، دما و حجم معین مقدار گاز از رابطه (۲) به دست می‌آید [۱۵]

مرحله‌ی انجماد مورد استفاده قرار می‌گیرد. به دلیل دسترسی آسان، قیمت پایین و گستردگی کاربرد زغال فعال، از این جاذب استفاده شده است. از آن جا که طراحی و نحوه‌ی عملکرد شیمیایی تله‌ها به نمودار تعادلی جاذب بستگی دارد لذا در این مقاله به بررسی تجربی نمودار تعادلی جذب هیدروژن فلورید با چند نوع زغال فعال پرداخته شده است. داده‌های آزمایشگاهی در دمای محیط و فشار کم‌تر از ۳۰ میلی‌بار به دست آمده‌اند.

## ۲- بخش تجربی

### ۱-۲ تجهیزات

تجهیزات مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است. اجزاء اصلی آن چنین است

- سه دستگاه شیر برقی: این شیرها مختص خلاء می‌باشند و برای جدا کردن تانک ذخیره و برقراری ارتباط بین تانک ذخیره و سایر دستگاه‌ها استفاده شده‌اند.
- یک دستگاه پمپ خلاء: برای ایجاد خلاء مورد نیاز سیستم به کار گرفته شده است.
- دو دستگاه فشارسنج: این فشارسنج‌ها مختص خلاء می‌باشند و برای اندازه‌گیری فشار در گستره‌های صفر تا ۱۰ میلی‌بار با دقت  $\pm 0.01$  و صفر تا ۱۰۰۰ میلی‌بار با دقت  $\pm 0.1$  از آن‌ها استفاده شده است.
- یک دستگاه دماسنج: برای اندازه‌گیری دما به کار رفته است.
- یک دستگاه مخزن ذخیره: برای ذخیره‌سازی HF مورد نیاز هر آزمایش استفاده شده است.
- یک دستگاه شیرسوزنی: برای تخلیه‌ی HF مورد نیاز هر آزمایش از مخزن خوراک از این شیر بهره گرفته شده است.
- مخازن HF و N<sub>2</sub> مصرفی: درجه‌ی خلوص گازهای HF و نیتروژن، به ترتیب، ۹۹٫۹۸ و ۹۹٫۹۹ درصد بوده است. از گاز نیتروژن برای شست‌وشوی مخازن و مسیرهای ارتباطی قبل از انجام هر آزمایش استفاده می‌شد.
- یک دستگاه مخزن جذب: برای اندازه‌گیری نقاط تعادلی از طریق تماس گاز HF و جاذب از آن استفاده می‌شد. حجم آن ۰٫۳۶۹ لیتر و حجم کل دستگاه ۵٫۲۴۵ لیتر می‌باشد.
- جاذب‌های مورد استفاده تماماً از نوع زغال فعال بودند که مشخصات فیزیکی آن‌ها در جدول ۱ داده شده است.

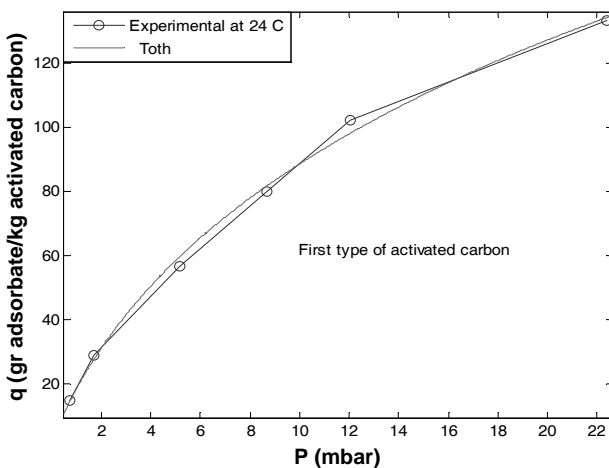


توت و هنری [۱۶ و ۱۷] با داده‌های تجربی برآزش شده است. مدل ایزوترم فرن‌دلیچ به صورت زیر تعریف شده است

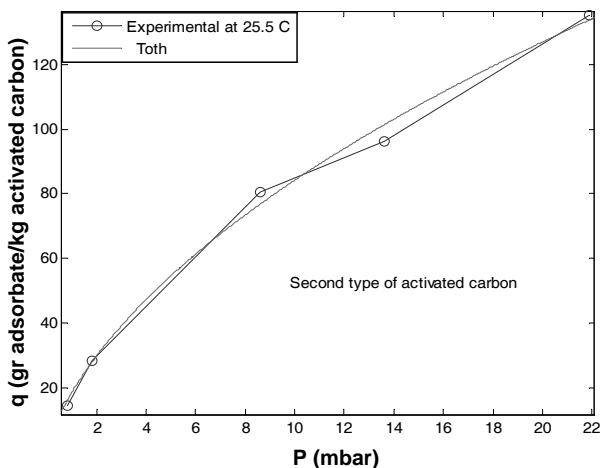
$$q = kP^n \quad (3)$$

در این مدل مقدار ماده‌ی جذب شده توسط جاذب با  $q$ ، فشار جزئی گاز با  $P$  و ثابت‌های معادله که تابع دما هستند با  $K$  و  $n$  نشان داده می‌شوند. در معادله‌ی فرن‌دلیچ سطح جذب غیرهمگن، و گرمای ناشی از جذب سطحی بر روی سطح یکنواخت فرض شده است. اگر  $n=1$ ، آن گاه معادله‌ی فرن‌دلیچ به معادله‌ی هنری (مقدار جذب شده  $q$  به صورت تابع خطی از فشار  $P$ ) تبدیل می‌شود

$$q = HP \quad (4)$$



شکل ۲- نمودار تعادلی جذب هیدروژن فلورید با زغال فعال نوع اول.



شکل ۳- نمودار تعادلی جذب هیدروژن فلورید با زغال فعال نوع دوم.

$$m = \frac{PVM}{RT} \quad (2)$$

که در آن  $M$  جرم مولکولی،  $V$  حجم (لیتر)،  $P$  فشار (میلی‌بار)،  $T$  دما (کلوین)  $R$  ثابت عمومی گازها (۸٫۳۱ ژول بر مول بر کلوین) می‌باشد. با استفاده از معادله‌ی (۲) مقدار گاز در مخزن ذخیره و ظرف جذب قابل محاسبه است. از تفاضل مقدار گاز موجود در سیستم در قبل و بعد از جذب، مقدار گاز جذب شده محاسبه می‌شود.

چهار رشته آزمایش با چهار نوع زغال فعال در دمای محیط و در گستره‌ی فشاری صفر تا ۳۰ بار انجام شد. در تمام این آزمایش‌ها فشار اولیه‌ی سیستم (فشار گاز درون تانک ذخیره قبل از باز شدن شیر ظرف جذب) برابر ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌بار بود.

هر آزمایش شامل چهار مرحله بود. در مرحله‌ی اول پس از قرار دادن یک گرم جاذب در درون ظرف جذب پمپ خلاء روشن و هر سه شیر برقی (SV۱، SV۲ و SV۳) شکل ۱، تا رسیدن فشار به مقدار کم‌تر از ۰٫۲ میلی‌بار در وضعیت باز قرار می‌گرفتند. در مرحله‌ی دوم شیر برقی پمپ (SV۱) بسته می‌شد. در این مرحله آزمون نشست ایستا که در آن مقدار تغییر فشار در طول زمان و در حجم معین به دست می‌آمد، انجام می‌شد. نرخ نشستی در صورت کم‌تر از ۰٫۰۰۳ میلی‌بار بودن آن، مناسب قلمداد می‌شد. در مرحله‌ی سوم شیر ظرف جذب (SV۳) بسته شده و گازدهی تانک ذخیره آغاز و فشار آن روی ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌بار تنظیم می‌شد. در مرحله‌ی نهایی، شیر مسیر خوراک (SV۲) بسته و شیر ظرف جذب (SV۳) باز و تغییر فشار با زمان ثبت می‌گردید. پس از گذشت زمان کافی، گاز و ماده‌ی جذب شده به تعادل می‌رسیدند. این فشار به عنوان فشار تعادلی در ایزوترم جذب ثبت می‌گردید.

### ۳- بحث و نتایج

اولین قدم در تعیین ویژگی‌های جذبی یک نمونه جاذب برای هیدروژن فلورید، اندازه‌گیری جذب تعادلی جزء خالص می‌باشد. ایزوترم‌های تعادلی اندازه‌گیری شده‌ی هیدروژن فلورید در دمای محیط (در حدود ۲۴ تا ۲۵٫۵ درجه‌ی سانتی‌گراد) و در محدوده‌ی فشاری صفر تا ۳۰ میلی‌بار در شکل‌های ۲ تا ۵ نشان داده شده‌اند. در این نمودارها مدل ایزوترم فرن‌دلیچ، لانگمویر،



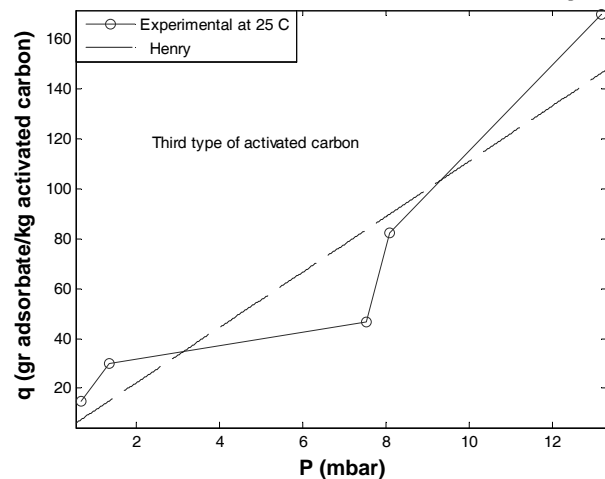
اولین معادله‌ی نظری که برای جذب سطحی به دست آمد، معادله‌ی لانگمویر بود. بعد از این معادله، معادلات زیادی بر پایه‌ی ایده‌ی اولیه‌ی این معادله به دست آمد. معادله‌ی لانگمویر بر چندین فرض استوار است. طبق معادله‌ی لانگمویر سطح جاذب به نواحی معینی تقسیم می‌شود و در هر ناحیه‌ی روی سطح جاذب تنها یک مولکول یا یک اتم از ماده‌ی جذب‌شونده قرار می‌گیرد. براساس مدل لانگمویر انرژی جذب سطحی تنها ناشی از جذب ذره‌ی جذب‌شونده بر روی سطح جاذب می‌باشد و ذرات جذب شده‌ی کناری روی جاذب تأثیری روی جذب یک‌دیگر ندارند. معادله‌ی لانگمویر دارای ثابت‌های  $b$  و  $q_m$  می‌باشد

$$q = \frac{q_m bP}{1 + bP} \quad (5)$$

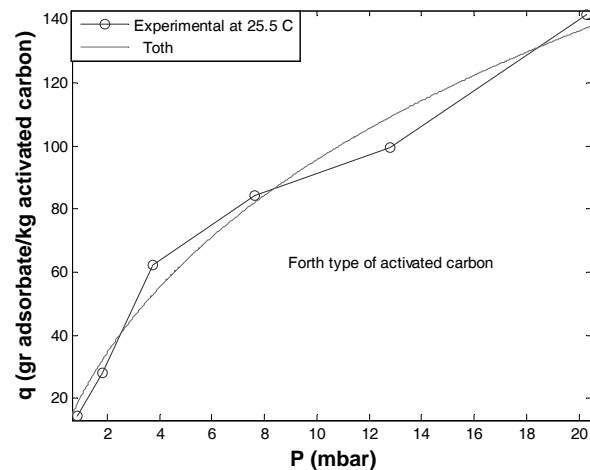
معادله‌ی زیر فرمول‌بندی مدل توث می‌باشد

$$q = \frac{m_t P}{(b_t + P^{t_t})^{1/t_t}} \quad (6)$$

ضرایب مدل لانگمویر، فرن‌دلیچ، توث و هانری برای جاذب‌های مختلف و خطای میانگین مربعی این مدل‌ها از داده‌های تجربی جدول ۲ به دست آمده‌اند.



شکل ۴- نمودار تعادلی جذب هیدروژن فلورید با زغال فعال نوع سوم.



شکل ۵- نمودار تعادلی جذب هیدروژن فلورید با زغال فعال نوع چهارم.

جدول ۲- ضرایب ایزوترم فرن‌دلیچ، لانگمویر، توث و هنری برای جذب هیدروژن فلورید توسط زغال فعال

ضرایب ایزوترم فرن‌دلیچ			ضرایب ایزوترم لانگمویر				زغال فعال	
% خطای مطلق	r-square error	n	k	% خطای مطلق	r-square error	$q_m$ (gr HF/gr carbon)	b	T(°C)
۳۸,۵	۰,۹۹۶۵	۱,۷۱۸	۰,۰۲۱۸۳	۵۸,۴	۰,۹۹۷۳	۰,۲۲۳۹	۰,۰۶۵۸	۲۴
۳۰,۰	۰,۹۹۷۶	۱,۵۹۵	۰,۰۱۹۵۵	۵۳,۹	۰,۹۹۴۳	۰,۲۹۲۴	۰,۰۵۷۷۵	۲۵,۵
۲۲۵,۸	۰,۹۵۸۸	۰,۶۷۴۷	۰,۰۰۳۷۱۳	۱۹۴,۵	۰,۹۰۵۴	۳۱۲,۴	$۳,۲۵۹ \times 10^{-5}$	۲۵,۵
۶۱,۵	۰,۹۸۹۲	۱,۴۸۸	۰,۰۱۸۷۵	۳۷,۰	۰,۹۸۹۴	۰,۲۳۶۳	۰,۰۷۳۸۵	۲۵
ضرایب ایزوترم هنری			ضرایب ایزوترم توث				زغال فعال	
% خطای مطلق	r-square error	H	% خطای مطلق	r-square error	$t_t$	$m_t$	$b_t$	T(°C)
۱۸۱,۷	۰,۹۶۱۳	۰,۰۰۸۴۹۲	۱۲,۹	۰,۹۹۸۰	۰,۳۵۲۹	۰,۹۴۲۱	۲,۹۷۶	۲۴
۱۵۳,۵	۰,۹۷۳۱	۰,۰۰۷۰۹۲	۱۶,۵	۰,۹۹۶۹	۰,۳۸۳۴	۰,۸۸۱۴	۳,۴۳۲	۲۵,۵
۱۹۴,۵	۰,۹۶۹۶	۰,۰۱۰۱۸	۳۱۳,۱	۰,۶۱۶۸	۰,۰۶۹۸۹	۱۱۸,۴	۰,۷۴۹۲	۲۵,۵
۱۹۸,۱	۰,۹۳۵۵	۰,۰۰۷۷۶۶	۳۴,۰	۰,۹۸۶۹	۰,۸۸۰۷	۰,۲۶۴۷	۱۰,۳۹	۲۵



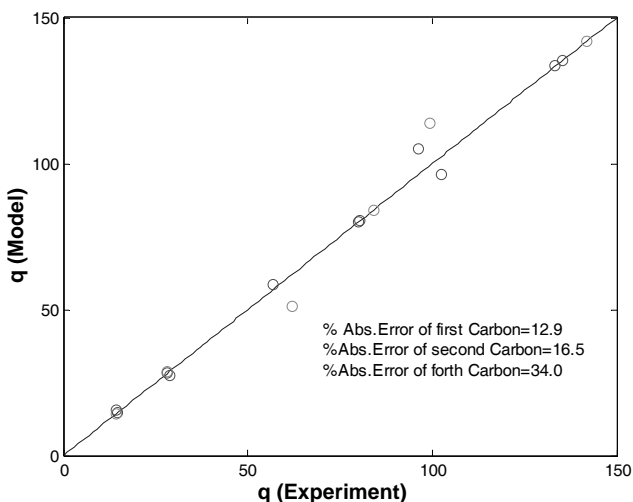
گاز HF توسط زغال فعال نوع سوم می‌باشد. در جذب نامناسب ابتدا مقدار جذب کم می‌باشد و با گذشت زمان مقدار جذب افزایش می‌یابد. این نوع جاذب‌ها دارای طول ناحیه‌ی انتقال جرم زیاد در بستر بوده و بستر جذب با طول زیاد مورد نیاز می‌باشد. مقدار رطوبت داخل جاذب طبق جدول ۱ دوازده درصد وزنی می‌باشد. وجود رطوبت زیاد در جاذب نوع سوم و حلالیت زیاد گاز HF در آب باعث افزایش جذب گاز HF توسط این جاذب می‌گردد. از طرف دیگر در تله‌های شیمیایی، جذب HF و UF<sub>۶</sub> هم‌زمان انجام می‌شود و محصول واکنش آب با یک مول اورانیم هگزا فلورید، شش مول گاز هیدروژن فلورید و یک مول UO<sub>۲</sub>F<sub>۲</sub> به صورت جامد می‌باشد. هیدروژن فلورید تولید شده بایستی مجدداً توسط جاذب جذب شود و ماده‌ی جامد کارآیی جاذب را کاهش می‌دهد. بنابراین رطوبت درون جاذب مورد استفاده در تله‌های شیمیایی باید تا حد امکان کاهش داده شود. انحراف چهار مدل موجود در جدول ۲ برای کربن نوع سوم نسبت به انحراف زغال‌های فعال نوع اول، دوم و چهارم خیلی زیاد می‌باشد.

شکل ۵ داده‌های تعادلی جذب گاز HF توسط زغال فعال نوع چهارم در دمای محیط و در فشار کم‌تر از ۳۰ میلی‌بار، و ایزوترم توث را نشان می‌دهد. این شکل مانند شکل‌های ۲ و ۳ دارای جذب نسبتاً مناسب برای گاز HF توسط زغال فعال نوع چهارم است. اندازه‌ی کوچک و شکل نامنظم این جاذب باعث افزایش افت فشار آن در بستر جذب می‌گردد. ضرایب مدل‌ها و انحراف چهار مدل از داده‌های تجربی برای کربن نوع چهارم در جدول ۲ داده شده است. ایزوترم‌های فرندلیچ، لانگمویر و توث مدل‌های مناسبی برای جذب نوع چهارم می‌باشند. ایزوترم هنری انحراف زیادی از داده‌های تجربی دارد و ایزوترم توث با درصد خطای مطلق متوسط ۳۴٫۰ بهترین مدل برای جذب گاز HF توسط زغال فعال نوع چهارم در دمای محیط و در فشار کم‌تر از ۳۰ میلی‌بار می‌باشد. افزایش افت فشار زغال فعال نوع چهارم در بستر جذب به دلیل اندازه‌ی کوچک‌تر و مدت زمان بیش‌تر گاززدایی زغال فعال نوع چهارم نسبت به زغال‌های فعال نوع اول و دوم موجب برتری زغال فعال نوع اول و دوم نسبت به زغال فعال نوع چهارم شده است.

داده‌های تعادلی جذب گاز HF توسط زغال فعال نوع اول در دمای ۲۴ درجه‌ی سانتی‌گراد و فشار کم‌تر از ۳۰ میلی‌بار، و ایزوترم توث در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲ افزایش فشار باعث افزایش میزان جذب می‌گردد. در صورتی که با افزایش فشار، شیب منحنی ایزوترم جذب کاهش یابد. در حالت جذب مناسب، بیش‌تر جذب در ابتدای تماس گاز و جاذب صورت می‌گیرد. اما در صورتی که با افزایش فشار، شیب ایزوترم جذب افزایش یابد، جاذب استفاده شده مناسب نبوده و با گذشت زمان مقدار جذب گاز توسط جاذب افزایش خواهد یافت. شیب منحنی جذب نشان داده شده در شکل ۲ با افزایش فشار کاهش می‌یابد، بنابراین جاذب نوع اول جاذب مناسبی برای جذب گاز HF در دمای محیط و در فشار کم‌تر از ۳۰ میلی‌بار می‌باشد. ضرایب ایزوترم‌های فرندلیچ، لانگمویر، هنری و توث و هم‌چنین خطای مطلق متوسط و خطای میانگین مربعی این مدل‌ها در جدول ۲ داده شده‌اند. مدل هنری خطای بالاتری در مقایسه با سه مدل دیگر دارد. مدل‌های توث، فرندلیچ و لانگمویر انحراف کم‌تری از داده‌های تجربی دارند. مدل توث با درصد خطای مطلق متوسط ۱۲٫۹ مناسب‌ترین مدل برای جذب HF توسط زغال فعال نوع اول است.

داده‌های تعادلی جذب HF توسط زغال فعال نوع دوم در دمای ۲۵٫۵ درجه سانتی‌گراد و فشار کم‌تر از ۳۰ میلی‌بار و ایزوترم توث در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. افزایش فشار باعث افزایش مقدار جذب گاز HF می‌گردد و شکل ۳ نشان‌دهنده‌ی جذب نسبتاً خوب گاز HF توسط زغال فعال نوع دوم می‌باشد. ضرایب و درصد خطای مطلق متوسط و خطای میانگین مربعی این چهار مدل برای زغال فعال نوع دوم در جدول ۲ داده شده‌اند. ایزوترم‌های فرندلیچ، لانگمویر و توث مدل‌های مناسبی برای جذب گاز HF در دمای محیط و فشار کم‌تر از ۳۰ میلی‌بار توسط جاذب نوع دوم می‌باشند. ایزوترم هنری انحراف زیادی از داده‌های تجربی دارد و ایزوترم توث با درصد خطای مطلق متوسط ۱۶٫۵ بهترین مدل برای جذب گاز HF توسط زغال فعال نوع دوم در دمای محیط و فشار کم‌تر از ۳۰ میلی‌بار می‌باشد.

شکل ۴ داده‌های تعادلی جذب HF توسط زغال فعال نوع سوم در دمای محیط و در فشار کم‌تر از ۳۰ میلی‌بار، و ایزوترم هنری را نشان می‌دهد. این شکل نشان‌دهنده‌ی جذب نامناسب



شکل ۲- مقایسه‌ی داده‌های آزمایشگاهی با پیش‌بینی‌های مدل توث.

#### ۴- نتیجه‌گیری

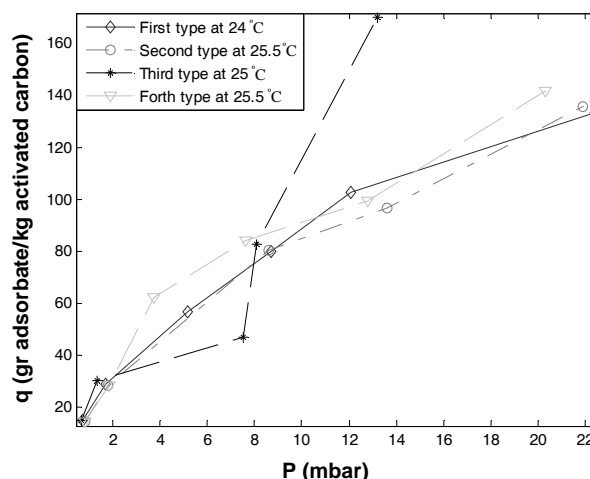
- زغال فعال نوع سوم برای استفاده در واحدهای جذب HF توصیه نمی‌شود.
- زغال‌های فعال نوع اول، دوم و چهارم برای واحدهای جذب HF توصیه می‌شوند، و در صورتی که در طراحی ستون جذب محدودیت افت فشار وجود داشته باشد فقط زغال‌های فعال نوع اول و دوم توصیه می‌شوند.
- در استفاده از انواع زغال فعال درصد پائینی از رطوبت در جذب باعث جذب بهتر می‌گردد.
- مدل توث به سبب برخورداری از حداقل درصد خطای مطلق متوسط نسبت به سایر مدل‌ها برای پیش‌بینی نمودار تعادلی زغال‌های فعال نوع اول، دوم و چهارم پیشنهاد می‌شود.

#### پی‌نوشت‌ها:

- ۱- Cold Trap
- ۲- NO<sub>x</sub>

در شکل ۶ داده‌های تعادلی جذب گاز HF توسط چهار نوع زغال فعال آورده شده است. مطابق این شکل، زغال فعال جاذب مناسبی برای گاز HF به حساب نمی‌آید. شکل کلی ایزوترم جذب جاذب‌های نوع اول، دوم و چهارم شبیه یکدیگر است. میزان جذب HF توسط زغال‌های فعال نوع اول و دوم در فشارهای کم‌تر از ۹ میلی‌بار تقریباً برابر است و در فشارهای ۹ تا ۱۹ میلی‌بار میزان جذب زغال فعال نوع اول بیش‌تر از زغال فعال نوع دوم و در فشارهای بالاتر از ۱۹ میلی‌بار جذب زغال فعال نوع دوم بیش‌تر از زغال فعال نوع اول می‌باشد. جذب HF توسط زغال فعال نوع چهارم در فشار کم‌تر از ۲ میلی‌بار مشابه زغال‌های فعال نوع اول و دوم است. در فشار بیش از ۲ میلی‌بار به جز محدوده‌ی ۱۳ تا ۱۵ میلی‌بار میزان جذب کربن نوع چهارم بیش‌تر از زغال‌های فعال نوع اول و دوم و در محدوده‌ی ۱۳ تا ۱۵ میلی‌بار میزان جذب زغال فعال نوع چهارم کم‌تر از زغال فعال نوع اول و بیش‌تر از زغال فعال نوع دوم می‌باشد.

در شکل ۷ مقدار گاز HF جذب شده به صورت تجربی با مقدار گاز HF جذب شده توسط مدل توث مقایسه شده است. مدل مناسب برای ایزوترم‌های جذب زغال‌های فعال نوع اول، دوم و چهارم مدل توث و برای زغال فعال نوع سوم مدل هنری می‌باشد. مطابق شکل ۷ مقادیر به دست آمده از مدل انحراف کمی از داده‌های تجربی دارند.



شکل ۶- مقایسه‌ی ایزوترم‌های چهار نوع زغال فعال.

**References:**

1. A. B. Rothman, "Chemical reaction of  $UF_6$  with water on ingress to damaged model 48X 10 ton model," Argon National Laboratory, Argon IL, USA (1996).
2. Umbrath Walter, "Fundamental of vacuum technology," Laybold Vacuum Products and Reference Book (2001-2002).
3. Christiano C. Rodrigues, Deovaldo de Moraes Jr, Seleude W. da Nobrega, Marcio G. Barboza, "Amonia adsorption in a fixed bed of activated carbon," *Bioresource Technology*, 98, 886-891 (2007).
4. Guo Jia, Wang Sheng Xu, Yan Lin Chen, Aik Chong Lua, "Adsorption of  $NH_3$  onto activated carbon prepared from palm shells impregnated with  $H_2SO_4$ ," *Journal of Colloid and Interface Science*, 281, 285-290 (2005).
5. Przepioński J.M. Skrodzewicz, A.W. Morawski, "High temperature ammonia treatment of activated carbon for enhancement of  $CO_2$  adsorption," *Applied Surface Science*, 225, 235-242 (2004).
6. Lee Young-Whan, Jee-Won Park, Se-Jin Jun, Dae-Ki Choi, Jae-Eui Yie, " $NO_x$  adsorption-temperature programmed desorption and surface molecular ions distribution by activated carbon with chemical modification," *Carbon*, 42, 59-69 (2004).
7. Nan Qi, M. Douglas LeVan, "Adsorption equilibrium modeling for water on activated carbons," *Carbon*, 43, 2258-2263 (2005).
8. Mellah, S. Chegrouche, M. Barkat, "The removal of uranium(IV) from aqueous solutions onto activated carbon: kinetic and thermodynamic investigations," *Journal of Colloid and Interface Science*, 296, 434-441 (2006).
9. Kutahyali Ceren, Meral Eral, "Selective adsorption of uranium from aqueous solutions using activated carbon prepared from charcoal by chemical activation," *Separation and Purification Technology*, 40, 106-114, 2004.
10. R.M. Schultz, W.E. Hobbs, J.L. Norton, M.L. Stephenson, "Sorbent selection and design consideration for uranium trapping," K/ET-5025 (July 1981).
11. M.J. Stephenson, "A design model for the dynamic adsorption of uranium hexafluoride on fixed beds of sodium fluorides," Union Carbide Corporation, Nuclear Division, Oak Ridge Gaseous Diffusion Plant, K-L-6195-2 (December 1968).
12. McNeese Leonard E., Stanley H. Jury, "Removal of uranium hexafluoride from gas streams by sodium fluoride pellets," Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee (September 1964).
13. Bansal Roop Chand, Meenakshi Goyal, "Activated carbon adsorption," Taylor & Francis Group (2005).
14. Schuman Seymour, "Method of recovering uranium hexafluoride," United State Patent, 3925536 (1975).
15. J.D. Seader and J. Henley Ernest, "Separation process principles," John Wiley & Sons Inc (1966).
16. Bannasch Wolfgang, "A process for depositing uranium hexafluoride on special active carbon," The Patent Office, London, 1516520 (1975).
17. D. Do Duong, "Adsorption analysis: equilibria and kinetics," Imperial Press (1998).