

# بررسی عملکرد جاذب سولفید مس بارگذاری شده روی آلومینای فعال برای جذب جیوه از جریان گاز طبیعی شبیه سازی شده

علی کریمی\*، علی چشمه روشن، مریم مشایخی

پژوهشگاه توسعه فناوری کاتالیست، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

**چکیده:** گاز طبیعی، تعدادی از جریان‌های خوراک پالایشگاهی و پتروشیمی دارای مقدار کمی از جیوه می‌باشند و این عنصر برای انسان، محیط‌زیست و تجهیزات فرآیندی مورد استفاده در صنایع مذکور بسیار خطرناک می‌باشد. در این مطالعه عملکرد جذب جیوه عنصری از گاز طبیعی شبیه سازی شده بوسیله جاذب‌های سولفید مس بارگذاری شده روی آلومینای فعال (Activated Alumina) بررسی شده است. در این تحقیق، جاذب‌های سنتز شده با استفاده از روش‌های آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD)، اندازه گیری سطح ویژه (BET)، تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی (TEM)، آزمایش اندازه گیری و شناسایی عناصر (XRF) و آزمایش کربن/گوگرد LECO ارزیابی شده‌اند. در اینجا گاز طبیعی شبیه سازی شده بوسیله تبخیر مایع جیوه که درون یک اشباع کننده (Saturator) شیشه‌ای است، در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به درون نیتروژن خالص بدست می‌آید. در ابتدا جاذب‌های سنتز شده در یک راکتور بستر ثابت (Fixed Bed)، با استفاده از جریان رقیق شده هیدروژن سولفید در دمای ۲۸۵ درجه سلسیوس، سولفید شده و سپس در معرض گاز طبیعی شبیه سازی شده در فشار اتمسفریک و دمای ۶۰ درجه سلسیوس با دبی ۲۲۰ میلی لیتر بر دقیقه قرار می‌گیرد. خصوصیت سنجی جاذبها نشان داده است که جاذب بهینه دارای حفرات بزرگتر و بطور معمول دارای ظرفیت جذب بالاتری نسبت به جاذب دیگر است. آزمایشات نشان داده است که جاذب بهینه در انتها تا حدود ۱۹ درصد از جیوه در مقایسه با وزن جاذب، از جریان گاز حذف می‌کند.

**واژگان کلیدی:** جیوه، جاذب جیوه، سولفید مس، آلومینای فعال، گاز طبیعی شبیه سازی شده

**KEYWORDS:** Mercury, Mercury sorbent, Copper sulfide, Activated alumina, Simulated natural gas

## مقدمه

سطحی، فناوری‌های اکتشاف نفت و گاز و برداشت از لایه‌های عمیق‌تر زمین توسعه یافته‌اند. لایه‌های عمیق مخازن هیدروکربوری معمولاً با آلودگی بیشتری از جیوه همراه هستند. این آلودگی جیوه و مراحل حذف آن در مایعات و گازهای تولیدی بر

جیوه همواره خطری بالقوه برای سلامتی انسان، محیط‌زیست و صنایع فرآیندی به شمار می‌رود و قوانین بسیار سختگیرانه‌ای توسط نهادهای نظارتی و قانون گذاری برای جلوگیری از انتشار جیوه وضع می‌شود. امروزه با افزایش تقاضا و مصرف منابع هیدروکربوری

\* عهده دار مکاتبات

+Email: karimialhasti@gmail.com & karimial@ripi.ir

سولفید مس بر روی آلومینای فعال تشکیل یک جاذب مناسب برای حذف جیوه را دارد و این بدلیل وجود سایتهای گوگرد بر روی پایه، هزینه پایین تولید این جاذبها، و وجود منابع طبیعی برای این ترکیبات است. در صنایع پالایش گاز، معمولاً از جاذبهای مس اندود شده با گوگرد بر پایه آلومینا یا کربن برای جذب جیوه از جریان گاز طبیعی استفاده می‌گردد. فلز فعال این جاذبها با جیوه موجود در گاز به آمالگام<sup>۵</sup> تبدیل می‌شود و بدین نحو جیوه از جریان گاز ورودی حذف می‌گردد [۸].

در این مطالعه نیز از جاذبهای سولفید مس بارگذاری شده روی آلومینای فعال برای جذب جیوه از گاز طبیعی شبیه سازی شده (جریان نیتروژن آغشته به بخارات جیوه)، استفاده شده است. در ابتدا این جاذبهای سنتز شده در یک راکتور بستر ثابت<sup>۶</sup>، با استفاده از جریان رقیق شده هیدروژن سولفید و دردمای ۲۸۵ درجه سلسیوس سولفیده شده و سپس در دمای ۶۰ درجه سلسیوس، فشار اتمسفریک و تحت جریان گاز طبیعی شبیه سازی شده به میزان ۲۲۰ میلی لیتر بر دقیقه قرار گرفته تا عملکرد آنها در جذب جیوه عنصری ارزیابی گردد.

### بخش تجربی

#### مواد و تجهیزات مورد استفاده

پایه آلومینای فعال تجاری از شرکت اردکان یزد واکسنس<sup>۷</sup> به ترتیب با کدهای S-K، AxTrap-277 (S-A) است. نیترات مس از شرکت مرک<sup>۸</sup>، پر منگنات پتاسیم با درجه آزمایشگاهی از نوع بدون جیوه از شرکت ریدل<sup>۹</sup>، هیدروکسید پتاسیم تجاری، کپسول گاز نیتروژن و سولفید هیدروژن به ترتیب ۹۲ و ۸ درصد مولی، و کپسول گاز نیتروژن با درجه آزمایشگاهی و با خلوص ۹۹/۹۹۹۹ در این تحقیق بکار گرفته شد.

#### تهیه و خصوصیت‌سنجی جاذبهای جیوه

جاذبهای جیوه سولفید مس روی آلومینا با استفاده از تلفیق القایی<sup>۱۰</sup> نیترات مس روی آلومینای فعال ساخته شدند. این جاذبهای جیوه MRU-11، Cat-A نام دارند. برای ساخت تقریباً ۶/۲ گرم جاذب، از تلفیق ۱/۹۴ گرم نیترات مس در ۲ سی سی آب بر ۵/۴ گرم پایه آلومینای فعال استفاده شد. جاذبهای ساخته شده ابتدا طی ۲۴ ساعت خشک شدند و سپس در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس و

ایمنی صنایع وابسته و سلامتی پرسنل آنها تأثیر می‌گذارد. حضور جیوه موجب خوردگی تجهیزات فرآیندی، کاهش بازدهی فرآیندها از طریق مسمویت کاتالیست‌ها و مخاطرات ایمنی می‌گردد [۷-۱]. در اکثر فرآیندهای پالایشی، جیوه قابل توجهی از طریق مشعل‌ها آزاد می‌گردد. مطالعات نشان می‌دهد که در نزدیکی تاسیسات نفت و گاز، غلظت قابل توجهی از جیوه در محیط اطراف وجود دارد. از دهه ۱۹۷۰، وقتی که فاجعه فرآیندی در نتیجه خوردگی جیوه در صنایع سرد سازی<sup>۱</sup> رخ داد، پتنت‌های پر شماری برای کاهش و حذف جیوه منتشر شده است [۲].

تاکنون روش‌های متعددی برای حذف جیوه در صنایع نفت و گاز ارائه شده است. کاربردی‌ترین آنها می‌توان به روش‌هایی مانند راکتورهای بستر ثابت احیاپذیر و غیر قابل احیا<sup>۲</sup> برای عملیات حذف جیوه اشاره کرد. در اینجا جاذب‌های سولفیدهای فلزی غیر قابل احیاء برای حذف جیوه از جریانهای فرآیندی مخصوصاً در فرآیندهای تولید گاز مایع<sup>۳</sup> استفاده می‌شود [۸].

تکنیکهای جذب دارای معایبی است که میتوان به هزینه عملیاتی بالا، خوردگی‌های شدید و خطرات زیست محیطی بالا اشاره نمود. انواع مختلفی از جاذبها برای جذب جیوه بکار رفته است که میتوان به کربن فعال و سلنیم اشاره نمود [۹]. بر روی این جاذبها با ترکیباتی مانند گوگرد، هالوژنها و فلزات فعال، تغییرات شیمیایی انجام پذیرفته است [۱۰-۱۳]. لازم به ذکر است که میزان جذب پایین این جاذبها نمیتواند برای استفاده تجاری مناسب باشد. سولفیده کردن فلزات یک روش موثر برای ظرفیت جذب جیوه است زیرا ترکیبات گوگرد بر روی فلز یک پیوند محکمی با جیوه برقرار می‌کنند و تشکیل ترکیب پایدار سولفید جیوه (HgS) می‌دهند [۱۴، ۱۲]. در مقایسه با جاذبهای قدیمی، سولفیدهای فلزی روشهای مناسبی برای حذف جیوه می‌باشند که نسبت به آب و دی اکسید گوگرد مقاومت نشان می‌دهند. به عنوان مثال گروه لای و همکاران<sup>۴</sup> [۱۶، ۱۵] یک نانو ذره سولفید روی با سطح بالا تولید کرد که در مقایسه با کربن فعال، دارای ظرفیت جذب بالایی بود.

سولفیدهای فلزی بارگذاری شده بر روی آلومینای فعال با میزان جذب بالا، یک روش مطمئن برای کنترل انتشار جیوه از خوراک می‌باشد.

(۱) Cryogenic Processing Plants

(۳) Liquid natural gas (LNG)

(۵) Amalgam

(۷) Axens

(۹) Ridele

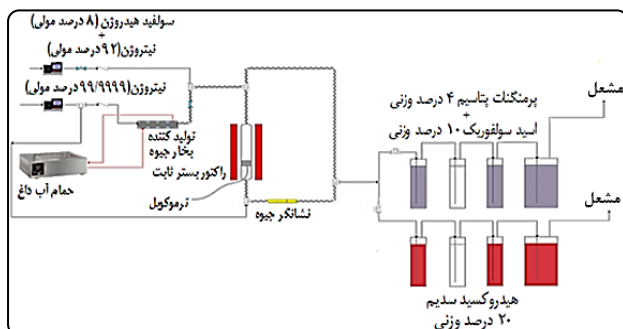
(۲) Non-Regenerable

(۴) Li et al

(۶) Fixed Bed

(۸) Merck

(۱۰) Impregnation



شکل ۱ - نمایی از سیستم آزمایشگاهی جذب جیوه عنصری

تا کمتر از ۰/۱ درصد وزنی گوگرد است. این روش برای مواردی است که دمای جوش اولیه مواد بکار رفته بالای ۲۰۰ درجه سلسیوس باشد. دستگاه آنالیز گوگرد/کربن LECO دارای یک ترازوی قابل کنترل حساس و قابل برنامه ریزی<sup>۱</sup>، کوره و نشانگر است. یک نمونه وزن شده و در کوره با اکسیژن می‌سوزد که در آن گوگرد به دی‌اکسید گوگرد تبدیل می‌شود. گاز دی‌اکسید گوگرد از یک سیستم خالص سازی برای حذف رطوبت و گرد و غبار عبور می‌کند و توسط اشعه مادون قرمز شناسایی و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و نتایج را از طریق یک برنامه تدوین شده در دستگاه، با میزان گوگرد مقایسه می‌نماید.

در این مطالعه تغییرات وزن جاذب هنگام تغییر اتم اکسیژن به گوگرد انجام می‌پذیرد که در محاسبات، میزان جیوه قرار گرفته بر روی جاذب مد نظر قرار می‌گیرد و در ادامه به توضیح آن پرداخته خواهد شد.

### آزمایش جذب جیوه عنصری

در شکل ۱ سیستم استفاده شده برای جذب جیوه نشان داده شده است. گاز نیتروژن در یک دمای معین و با یک غلظت خاص از جیوه عنصری تولید شده و جیوه آن در یک راکتور بستر ثابت توسط جاذب مورد استفاده جذب می‌گردد. در اینجا گاز طبیعی شیشه سازی شده بوسیله تبخیر مایع جیوه که درون یک اشباع کننده<sup>۱۰</sup> شیشه‌ای قرار دارد به درون نیتروژن خالص و با دمای ۶۰ درجه سلسیوس بدست می‌آید. اشباع کننده از ۷ عدد حباب به شکل کره با قطر داخلی ۳۰ میلی‌متر که بوسیله لوله‌های شیشه‌ای نازک و کوتاه (قطر تقریبی داخلی ۱ میلی‌متر و طول تقریبی ۴ میلی‌متر) ساخته شده که درون

به مدت ۴ ساعت قرار گرفته و در نهایت در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس و به مدت ۵ ساعت کلسینه<sup>۱</sup> شدند. در جاذبهای ساخته شده حدود ۱۰ درصد وزنی CuO بارگذاری گردید و از طریق آزمایش اندازه‌گیری و شناسایی عناصر<sup>۲</sup> بررسی گردید. در ادامه خصوصیات جاذبهای مورد استفاده بررسی می‌گردد.

### آزمایش BET<sup>۳</sup>

سطح ویژه (BET) پایه آلومینای فعال و جاذبهای ساخته شده به وسیله دستگاه ASAP-2000 اندازه‌گیری شد. پس از آماده سازی نمونه‌ها در دمای ۳۰۰°C به مدت ۳ ساعت و خلاء ۵۰ میلی‌تور<sup>۴</sup>، با جذب نیتروژن در دمای ثابت سطح ویژه، حجم حفرات، متوسط اندازه حفرات نمونه‌ها مشخص شد.

### آزمایش XRD<sup>۵</sup>

فازهای موجود در نمونه‌های جاذب به روش XRD و با استفاده از یک دستگاه پراش پرتو x فیلیپس از نوع XRD-Pw1840 با لامپ Cu/K $\alpha$  تعیین شد. متوسط اندازه ذرات کریستالی در جاذبهای کلسینه شده از شکست خطی و اندازه کریستال‌ها با استفاده از رابطه شرر<sup>۶</sup> تعیین شد [۱۷، ۱۸].

### آزمایش TEM<sup>۷</sup>

مورفولوژی جاذبها به وسیله تصویر برداری میکروسکوپ الکترونی TEM مطالعه شد. نمونه‌های جاذبها با استفاده از دستگاه فراصوت در اتانول پراکنده شده و روی یک گرید مسی که با کربن پوشانده شده است، قرار داده شدند. سپس تصویربرداری با استفاده از دستگاه فیلیپس (90 kV) CM 20 انجام گرفت.

### آزمایشهای گوگرد/کربن LECO<sup>۸</sup>

برای محاسبه میزان گوگرد از دستگاه گوگرد/کربن لکو مدل CS-125 Carbon/Sulfur Analyzer استفاده شده است و میزان گوگرد محاسبه می‌گردد. این روش برای تعیین میزان گوگرد در محصولات پتروشیمی و مواد معدنی آلی و غیر آلی، به عنوان کاتالیست یا جاذب، بکار می‌رود. میزان تشخیص دستگاه از ۱۰۰ درصد

(۱) Calcination

(۳) Brunauer-Emmett-Teller (BET)

(۵) X-Ray diffraction analysis (XRD)

(۷) Transmission electron microscopy

(۹) Microprocessor

(۲) X-Ray Fluorescence (XRF)

(۴) Milli Torr

(۶) Scherrer

(۸) LECO Sulfur Analyzer

(۱۰) Saturator

جدول ۱ - خصوصیت سنجی پایه‌های استفاده شده در ساخت جاذب

پایه ها	سطح ویژه (سانتی متر مربع بر گرم)	حجم حفرات (سانتی متر مکعب بر گرم)	قطر حفرات (نانومتر)
S-A (Axens)	۳۲۱	۰/۳۷	۴/۶۰
S-K	۳۲۲	۰/۳۹	۴/۸۰

جدول ۲ - خصوصیت سنجی جاذب‌ها

جاذب‌ها	پایه‌ها	سطح ویژه (سانتی متر مربع بر گرم)	حجم حفرات (سانتی متر مکعب بر گرم)	قطر حفرات (نانومتر)
Cat-A	S-A	۱۸۴	۰/۳۲	۶/۹۵
MRU-11	S-K	۲۲۰	۰/۴۸۰	۹/۵۰

نیتروژن را جذب نموده و میزان آن در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری می‌گردد. گاز خروجی در مرحله جذب جیوه درون یک محلول ۱۰ درصد وزنی اسید سولفوریک و ۴ درصد وزنی پرمنگنات پتاسیم جذب شده و جیوه خروجی از سیستم در این مایع اکسید و خنثی می‌گردد.

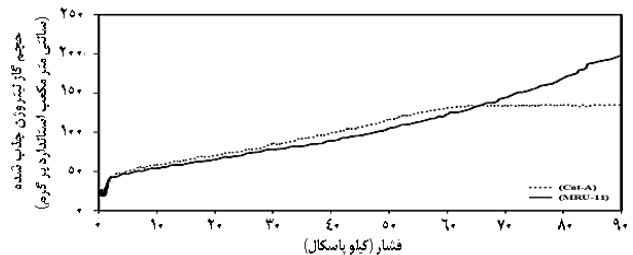
### نتیجه‌ها و بحث

در جدول ۱ نتایج مشخصات فیزیکی پایه‌های مورد استفاده با آزمایش BET ارائه شده‌اند.

در جدول ۲ نیز نتایج مشخصات فیزیکی جاذب‌های سنتز شده مورد استفاده با آزمایش BET ارائه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که تلقیح نیترات مس به طور محسوسی سطح ویژه و حجم حفرات پایه‌ها را کاهش می‌دهد.

در شکل ۲ نمودار فشار در مرحله جذب برای جاذب‌های Cat-A و MRU-11 در آزمایش BET را مشاهده می‌کنید. در این جاذب‌ها همانطور که نشان داده شده است ایزوترم جذب در آزمایش BET، در جاذب Cat-A معادل ایزوترم I(b) و در جاذب MRU-11 معادل ایزوترم II می‌باشد [۲۱]. فشار نهایی در مرحله جذب گاز نیتروژن در جاذب Cat-A از میزان فشار نهایی در جاذب MRU-11 بسیار کمتر است و این نشان‌دهنده این است که جاذب MRU-11 دارای حفرات مزو<sup>۳</sup> بیشتری است که قسمتی از نیتروژن را در حفرات مزو جذب می‌گردند. با توجه به جدول ۲ در جاذب MRU-11 حجم و قطر حفرات بزرگتر شده و این نیز تایید کننده این است که فلز تلقیح شده بر روی جاذب (CuO)، باعث تبدیل حفرات مزو این جاذب بسمت حفرات میکرو<sup>۴</sup> گردیده است.

همانطور که قبلاً ذکر گردید در جاذب‌ها حدود ۱۰ درصد وزنی CuO بارگذاری شده است که این از طریق آزمایش XRF ثابت گردید.



شکل ۲ - نمودار فشار در مرحله جذب برای جاذب‌های Cat-A و MRU-11 در آزمایش BET

آن ۳۰۰ گرم مایع جیوه قرار گرفته است [۲۰، ۱۹]. این طراحی تماس گاز و مایع را درون حباب‌های کره‌ای برقرار و یک اختلاط عالی برای گاز درون لوله‌ها برقرار می‌سازد. دمای سیستم اشباع‌سازی جیوه در دمای ۶۰ درجه سلسیوس کنترل می‌شود.

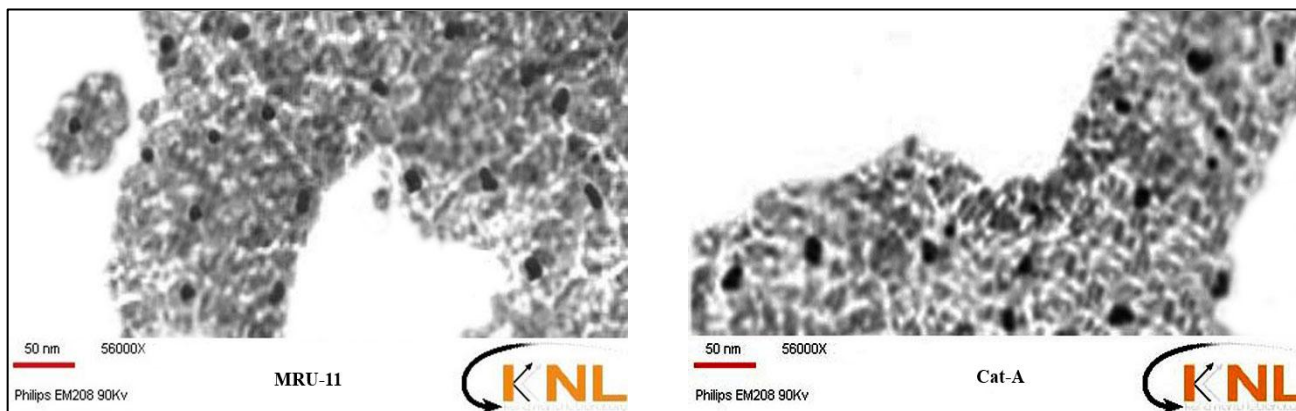
راکتور بستر ثابت دارای قطر داخلی ۱۱ میلی متر و دارای طول ۹۰ میلی متر می‌باشد و درون یک کوره که دارای کنترلر دما است قرار می‌گیرد. قطر ذرات جاذب بین ۰/۴-۰/۲۵ میکرو متر است. بستر جاذب با ذرات (سولفید مس تلقیح شده بر روی آلومینای فعال)، حدود ۰/۱ گرم پر شده است. ذرات جاذب با ۵ گرم کوارتز خرد شده<sup>۱</sup> با اندازه ۰/۸۴۱-۰/۵۹۵ میکرومتر و طول ۳۰ میلی متر به عنوان ماده خنثی مخلوط شده‌اند. این توزیع انتخاب شده است که از کانالیزه شدن جریان گاز جلوگیری کند و جریان پلاگ برقرار گردد. بعد از بارگذاری جاذب درون راکتور ابتدا با گاز حاوی سولفید هیدروژن ۸ درصد مولی در نیتروژن سولفید می‌گردد. گاز خروجی از مرحله سولفیداسیون درون یک محلول ۲۰ درصد وزنی هیدروکسید سدیم خنثی می‌گردد. پس از سولفید شدن جاذب، گاز نیتروژن از روی اشباع کننده حاوی جیوه عنصری با دمای ۶۰ درجه سلسیوس که توسط حمام آب<sup>۲</sup> آماده شده، عبور می‌کند. ذرات جاذب، جیوه موجود در گاز

(۱) Crashed Quartz

(۳) Mezopore

(۲) Circulator

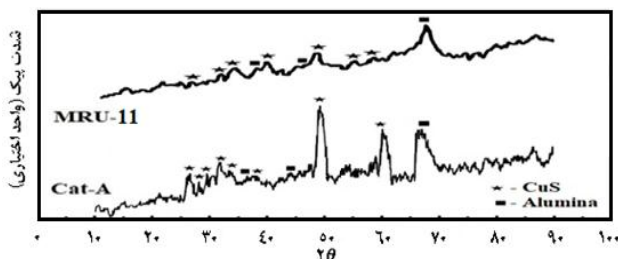
(۴) Micropore



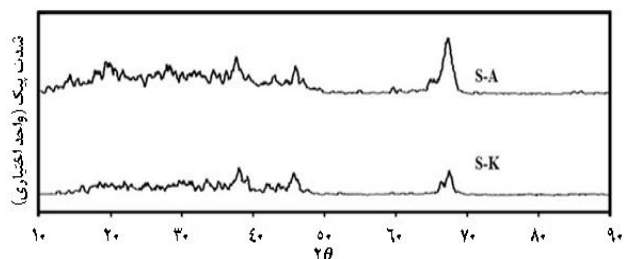
شکل ۳ - تصویر جاذب‌های کلسینه شده Cat-A و MRU-11

جدول ۲ - نمونه محاسبات جاذب‌های سولفید شده در آزمایش جذب جیوه در زمان ۳۳۰ دقیقه

جاذب	مقدار جاذب قبل از آزمایش (گرم)	میزان کم شدن وزن در اثر گرم کردن تا ۳۰۰ درجه سلسیوس و بمدت یک شبانه روز (گرم)	اعمال تغییرات وزنی پس از سولفیداسیون (گرم)	وزن بعد از آزمایش (گرم)	وزن جیوه جذب شده (گرم)
Cat-A	۰/۱۰۷۲	۰/۰۹۹۰	۰/۰۹۷۴	۰/۱۰۹۲	۰/۰۱۱۹
MRU-11	۰/۱۱۰۱	۰/۱۰۰۷	۰/۰۹۹۸	۰/۱۱۸۹	۰/۰۱۹۱



شکل ۵ - طیف XRD برای جاذب سولفید شده Cat-A و MRU-11



شکل ۴ - طیف XRD برای پایه‌های جاذب کلسینه شده Cat-A و MRU-11

۴۶/۱° و ۶۶/۵° مربوط به پایه آلومینا می‌باشند. سایر پیک‌های نشان داده شده مربوط به جزء CuS می‌باشند [۸].

قبل از بارگذاری جاذب در راکتور دما تا ۳۰۰ درجه سلسیوس در کوره بالا می‌رود و مقداری از وزن جاذب (بدون تزیق هیچگونه گازی) کسر می‌گردد. همچنین با انجام آزمایش گوگرد/کربن LECO میتوان میزان گوگرد موجود در جاذب را محاسبه نمود. از آنجا که این گوگردها بصورت اتمیک به جای اکسیژن می‌نشینند با محاسبه این تغییرات، میتوان میزان تغییر وزن جاذب هنگام تغییر اتم‌های اکسیژن به گوگرد را محاسبه نمود. باید دقت نمود که برای دقیق شدن محاسبات میزان جیوه قرار گرفته بر روی جاذب، تغییر وزن ناشی از گرم شدن در ۳۰۰ درجه سلسیوس و تغییر وزن ناشی از سولفیداسیون، را از وزن انتهایی جاذب بعد از آزمایش جذب، کسر می‌شود.

در جدول ۲ درصد افزایش وزن به دلیل وجود جیوه بر روی جاذب‌های Cat-A، MRU-11 برای مدت زمان آزمایش ۳۳۰ دقیقه،

بنابراین هر دو جاذب دارای مقدار مساوی از جزء فازفعال یا CuO برای جذب جیوه می‌باشند.

مورفولوژی جاذبها به وسیله تصویر برداری میکروسکوپ الکترونی TEM مطالعه شد. و تصویر آن در شکل زیر می‌آید.

در دو تصویر بالا همانطور که مشاهده میکنید سایز ذرات در جاذب MRU-11 بعلت سطح ویژه بالاتر پایه (S-K) کوچکتر می‌باشد. در این شکلها نقاط سیاه ذرات CuO را مشخص می‌نماید.

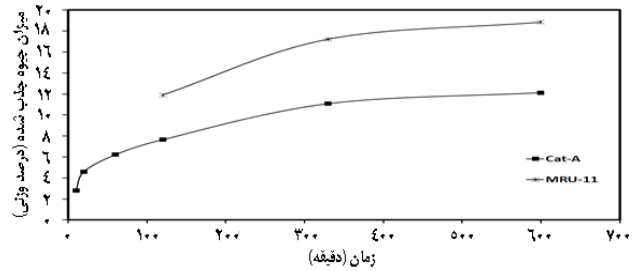
طیف XRD برای پایه‌های جاذب کلسینه شده Cat-A و MRU-11 در شکل ۴ نشان داده شده است. طیف XRD نشان می‌دهد که این پایه‌ها آلومینای فعال بوده و پیک مطرح و اصلی در این طیف‌ها  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  بوده و دارای درجه پایینی از کریستالیزاسیون می‌باشند [۲۲].

طیف XRD برای جاذب کلسینه و سولفید شده Cat-A و MRU-11 در شکل ۵ نشان داده شده است. پیک‌های زوایای

## نتیجه گیری

در این مطالعه عملکرد جذب جیوه عنصری از گاز طبیعی شبیه سازی شده بوسیله جاذب های سولفید مس بارگذاری شده روی آلومینای فعال بررسی شده است. جاذب های جیوه Cat-A، MRU-11 در این تحقیق ساخته شدند و از طریق XRD، BET، TEM، XRF و آزمایش کربن/گوگرد LECO مورد سنجش و خصوصیت سنجی قرار گرفته اند. در اینجا گاز طبیعی شبیه سازی شده بوسیله تبخیر مایع جیوه درون یک اشباع کننده شیشه ای و در دمای ۶۰ درجه سلسیوس، به درون نیتروژن خالص بدست می آید. در ابتدا این جاذب های سنتز شده در یک راکتور بستر ثابت، با استفاده از جریان رقیق شده هیدروژن سولفید و در دمای ۲۸۵ درجه سلسیوس در سراسر شب سولفید و فعال گردیدند. سپس در دمای ۶۰ درجه سلسیوس، فشار اتمسفریک و تحت جریان گاز طبیعی شبیه سازی شده به میزان ۲۲۰ میلی لیتر بر دقیقه قرار گرفته تا عملکرد آن ها برای جذب جیوه عنصری مورد ارزیابی قرار گیرد. جاذبها برای حذف جیوه با ۱۰ درصد وزنی CuO تلقیح گردیدند. نتایج نشان میدهد که جاذبها با حفرات بزرگتر و دارای مزو پور نسبت به جاذبهای دارای میکرو پور دارای عملکرد بهتری در جذب جیوه هستند. در آزمایش BET نشان داده شده است که جاذب MRU-11 دارای حفرات مزو پور بیشتر و جاذب Cat-A دارای حفرات میکرو پور بیشتری است. از روی نمودار جذب جاذب MRU-11 نسبت به Cat-A دارای شیب تندتر جذب جیوه در برابر زمان است بنابراین جذب دینامیکی این جاذب نسبت به جاذب Cat-A سریعتر می باشد. در نتیجه مزوپوره های موجود در جاذب MRU-11 هم موجب بالاتر رفتن ظرفیت جذب جیوه در این جاذب و هم ضریب نفوذ بالاتر جیوه در ساختار آن شده است. آزمایشات نشان داده است که جاذب بهینه در انتها تا حدود ۱۹ درصد وزنی از جیوه در مقایسه با وزن جاذب، از جریان گاز حذف می کند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۲



شکل ۶ - میزان سرعت و قدرت جذب در جاذب سولفید شده MRU-11 و Cat-A

به ترتیب ۱۱/۱ و ۱۷/۳ درصد بدست آمده است و این نتایج بعدا در شکل ۶ گزارش خواهد شد.

در این مطالعه جذب جیوه بر روی جاذب MRU-11، Cat-A صورت پذیرفت. این جاذبها در چند مرحله و با زمانهای مختلف آزمایش گردیده تا میزان سرعت و قدرت جذب این جاذبها محاسبه شود و در شکل ۶ نتایج گزارش می گردد.

شکل ۶ نشان می دهد که جاذبهای MRU-11 و Cat-A در زمان ۳۳۰ دقیقه به حدود ۸۰ درصد ظرفیت جذب خود به ترتیب ۱۱/۱ و ۱۷/۳ درصد وزنی بر اساس وزن جاذب رسیده اند. مشاهده می شود که برای رسیدن به ظرفیت جذب کامل در زمان ۶۰۰ دقیقه، جاذب Cat-A تقریباً اشباع بوده و فقط ۱ درصد دیگر جیوه جذب می نماید، در حالیکه جاذب MRU-11، ۱/۷ درصد دیگر توانایی جذب جیوه دارد. از شیب تندتر جذب جیوه در برابر زمان برای جاذب MRU-11 می توان نتیجه گرفت که جذب دینامیکی این جاذب نسبت به جاذب Cat-A سریعتر می باشد. در نتیجه مزوپوره های موجود در جاذب MRU-11 هم موجب بالاتر رفتن ظرفیت جذب جیوه در این جاذب و هم ضریب نفوذ بالاتر جیوه در ساختار آن شده است.

خصوصیت سنجی جاذبها نشان داده است که جاذب بهینه MRU-11 دارای حفرات بزرگتر و بطور معمول دارای ظرفیت جذب بالاتری نسبت به جاذب دیگر است. آزمایشات نشان داده است که جاذب بهینه در انتها تا حدود ۱۹ درصد وزنی از جیوه در مقایسه با وزن جاذب، از جریان گاز حذف می کند.

## مراجع

- [1] Li Y., Yu J., Liu Y., Huang R., Wang Z., Zhao Y., *A Review on Removal of Mercury from Flue Gas Utilizing Existing Air Pollutant Control Devices (APCDs)*, *Journal of Hazardous Materials*, **427**: 128132 (2022).



- [2] Chalkidis A., Jampaiah D., Hartley P.G., Sabri Y.M., Bhargava S.K., [Mercury in Natural Gas Streams: A Review of Materials and Processes for Abatement and Remediation](#), *Journal of Hazardous Materials*, **382**: 121036 (2020).
- [3] Sun H., Zhao S., Ma Y., Wu J., Liang P., Yang D., Zhang H., [Effective and Regenerable Ag/4A Zeolite Nanocomposite for Hg<sup>0</sup> Removal from Natural Gas](#), *Journal of Alloys and Compounds*, **762**: 520-527 (2018).
- [4] Zhang H., Zhang D., Chen S., Li M., Liang P., [Nanoconfinement of Ag Nanoparticles Inside Mesoporous Channels of MCM-41 Molecule Sieve as a Regenerable and H<sub>2</sub>O Resistance Sorbent for Hg<sup>0</sup> Removal in Natural Gas](#), *Chemical Engineering Journal*, **361**: 139-147 (2019).
- [5] Zhang Z., Wu J., Li B., Xu H., Liu D., [Removal of Elemental Mercury from Simulated Flue Gas by ZSM-5 Modified with Mn-Fe Mixed Oxides](#), *Chemical Engineering Journal*, **375**: 121946 (2019).
- [6] Rastelli H., Gorawara J.K., Simonetti D.A., [Process for the Removal of Mercury from Hydrocarbon Streams Containing Oxygen](#), *US9670422B2* (2017).
- [۷] ولدخانی ا.، کارگشا ک.، امینی م.ح.، ساخت ابزارهای گیراندازی اتم، تولید کننده بخار سرد اتمی و تولید کننده هیدرید در اسپکترومتر جذب اتمی شعله ای و اندازه گیری کادمیم، جیوه و آرسنیک با حساسیت بالاتر، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۳) ۳۱: ۱ تا ۷ (۱۳۹۱).
- [8] Eckersely N., [Advanced Mercury Removal Technologies](#), Hydrocarbon Processing, (2010).
- [9] Ralston, N., [Nano-Selenium Captures Mercury](#), *Nature Nanotechnology*, **3**: 527–528 (2008).
- [10] Hamzehlouyan T., Sampara C., Li J., Kumar A., Epling W., [Experimental and Kinetic Study of SO<sub>2</sub> Oxidation on a Pt/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst](#), *Applied Catalysis B*, **152–153**: 108–116 (2014).
- [11] Zhou Q., Duan Y-F., Hong Y-G., Zhu C., She M., Zhang J., Wei H-Q., [Experimental and Kinetic Studies of Gas-Phase Mercury Adsorption by Raw and Bromine Modified Activated Carbon](#), *Fuel Processing Technology*, **134**: 325–332 (2015).
- [12] Zou S., Liao Y., Xiong S., Huang N., Geng Y., Yang S., [H<sub>2</sub>S-Modified Fe-Ti Spinel: A Recyclable Magnetic Sorbent for Recovering Gaseous Elemental Mercury from Flue Gas as a Co-Benefit of Wet Electrostatic Precipitators](#), *Environmental Science & Technology*, **51(6)**: 3426–3434 (2017).
- [13] Yang S., Liu C., Liu Z., Yang B., Xiang K., Zhang C., Liu H., Chai L., [High Catalytic Activity and SO<sub>2</sub>-Poisoning Resistance of Pd/CuCl<sub>2</sub>/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalyst for Elemental Mercury Oxidation](#), *Catalysis Communications*, **105**: 1–5 (2018).
- [14] Liu W., Vidic R.D., Brown T.D., [Impact of Flue Gas Conditions on Mercury Uptake by Sulfur-Impregnated Activated Carbon](#), *Environmental Science & Technology*, **34**: 154–159 (2000).
- [15] Li H., Zhu L., Wang J., Li L., Shih K., [Development of Nano-Sulfide Sorbent for Efficient Removal of Elemental Mercury from Coal Combustion Fuel Gas](#), *Environmental Science & Technology*, **50**: 9551–9557 (2016).

- [16] Li H., Zhu L., Wang J., Li L., Lee P.H., Feng Y., Shih K., [Effect of Nitrogen Oxides on Elemental Mercury Removal by Nanosized Mineral Sulfide](#), *Environmental Science & Technology*, **51**: 8530–8536 (2017).
- [17] Li F., Wu J., Qin Q., Li Z., Huang X., [Controllable Synthesis, Optical and Photocatalytic Properties of CuS Nanomaterials with Hierarchical Structures](#), *Powder Technology*, **198**: 267–274 (2010).
- [18] Liu W., Xua H., Liao Y., Quan Z., Li S., Zhao S., Qu Z., Yan N., [Recyclable CuS Sorbent with Large Mercury Adsorption Capacity in the Presence of SO<sub>2</sub> from Non-Ferrous Metal Smelting Flue Gas](#), *Fuel*, **235**: 847–854 (2019).
- [19] Musmarra D., Karatza D., Lancia A., Prisciandaro M., Mazziotti di Celso G., [A Comparison among Different Sorbents for Mercury Adsorption from Flue Gas](#), *Chemical Engineering Transactions*, **43**: 2461-2466 (2015).
- [20] Karatza D., Lancia A., Musmarra D., Zucchini C., [Study of Mercury Absorption and Desorption on Sulfur Impregnated Carbon](#), *Experimental Thermal and Fluid Science*, **21**: 150-155 (2000).
- [21] Sotomayor F., Cychosz K.A., Thommes M., [Characterization of Micro/Mesoporous Materials by Physisorption: Concepts and Case Studies](#), *Accounts of Materials & Surface Research*, **3**: 34-50 (2018).
- [22] Leyva-Ramos R., Medellin-Castillo N.A., Jacobo-Azuara A., Mendoza-Barron J., Landin-Rodriguez L.E., Martinez-Rosales J.M., Aragon-Piña A., [Fluorine Removal from Water Solution by Adsorption on Activated Alumina Prepared from Pseudo-Boehmite](#), *Journal of Environmental Engineering and Management*, **18**: 301-309 (2008).