

حذف فلز سرب از پساب صنایع باتری سازی با استفاده از نانوذرات مغناطیسی آهن

رضا علیزاده*⁺

تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، مرکز علوم و فناوری های پیشرفته (CAST)

سوده عابدینی^{**}، غلامرضا نبی بیدهندی

تهران، دانشگاه تهران، دانشکده محیط زیست، گروه مهندسی محیط زیست

قاسم عمو عابدینی

تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده های فنی، دانشکده مهندسی شیمی

چکیده: فلز سرب از فلزات سنگین است که کاربردهای زیادی در صنایع گوناگون باتری سازی، رنگ سازی، تولید تسلیحات نظامی و ... دارد. به دلیل سمی بودن این فلز، تخلیه پساب های صنعتی حاوی آن خطرات جبران ناپذیری برای محیط زیست و اکوسیستم های زنده در پی خواهد داشت. در این پژوهش با سنتز و استفاده از نانو ذرات مغناطیسی آهن ابتدا آلودگی سرب پساب ساختگی مورد بررسی قرار گرفته و سپس پساب کارخانه باتری سازی به عنوان نمونه مورد آزمایش قرار گرفت. همچنین با تغییر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی همچون pH، دما، میزان نانو ذرات و غلظت اولیه سرب منحنی های همدمای جذب فروندلیچ و لانگمویر رسم شد. نتیجه های این پژوهش بیانگر درصد حذف بالای سرب از پساب واقعی (با راندمان ۷۰ درصد) در pH اسیدی (۵-۶) و دمای محیط می باشد. برای کاربرد صنعتی این روش نیز طرح پیشنهادی ارائه شده است.

واژه های کلیدی: حذف سرب، باتری سازی، نانو ذرات مغناطیسی آهن، تصفیه پساب، محیط زیست.

KEY WORDS: Removal of lead, Battery manufacture industry, Magnetite iron nano particles, Wastewater treatment, Environment

مقدمه

و سطحی می تواند از طریق جفت وارد بدن جنین انسان شده و ناهنجاری های گسترده ای را ایجاد نماید [۱]. بنابراین حذف سرب از پساب های صنعتی از اهمیت زیادی برخوردار است و به این منظور روش های گوناگونی برای تصفیه پساب های شامل سرب

در دهه های اخیر بسیاری از واحد های صنعتی به دلیل استفاده از فلزات سنگین و ورود این فلزات همراه پساب های خود به محیط زیست آلودگی محیط را موجب می شوند. متأسفانه این فلزات و به ویژه سرب با نفوذ به آب های زیرزمینی

*عهده دار مکاتبات

+E-mail: alizadeh_environment@yahoo.com

[•] نشانی فعلی: تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده علوم و فنون اتکا (ecast)

^{••} عضو باشگاه پژوهشگران جوان دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز

که ابتدا ۰/۰۴ مول از آهن III کلرید شش آبه ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) و ۰/۰۲ مول از آهن II کلرید چهار آبه ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) به ترتیب در ۴۰ میلی لیتر آب و ۱۰ میلی لیتر هیدرو کلریدریک اسید ۲ مولار حل شد. و سپس ۵۰۰ میلی لیتر محلول آبی آمونیاک ۰/۷ مولار تهیه و توسط گاز آرگون به مدت ۳۰ دقیقه عاری از اکسیژن شد. محلول‌های آهن تهیه شده به محلول آبی آمونیاک که با گاز آرگون اکسیژن زدایی شده است افزوده و با همزن مکانیکی و با دور ۲۰۰ دور در دقیقه به مدت ۳۰ دقیقه در دمای 25°C مخلوط شدند. رنگ سیاه محلول نشان دهنده آزاد شدن نانو ذرات است. بعد از ۳۰ دقیقه رسوب دوبار با آب دیونیزه شستشو داده و سپس به حجم ۵۰۰ میلی لیتر رسانده شد [۸].

تعیین ویژگی های نانو ذرات مغناطیسی سنتز شده

به منظور تعیین توزیع اندازه نانو ذرات تهیه شده، تصویر میکروسکوپ انتقالی (TEM) و سطح ویژه نانو ذرات سنتز شده به ترتیب از دستگاه های آنالیز ذرات (Particle Analyser) و میکروسکوپ الکترونی انتقالی (Jeol, TEM-2000EX) و آنالیزور BET (Brunauer, Emmett, Teller) استفاده شد.

تعیین میزان جذب سرب

پس از تهیه نانو ذرات مغناطیسی آهن از آنها برای حذف فلز سرب از نمونه هایی با غلظت های گوناگون سرب استفاده شد. میزان غلظت سرب قبل و بعد از عملیات جذب با استفاده از دستگاه جذب اتمی^(۱) (Shimadzu A.A-670/G V-7) اندازه گیری شد. برای محاسبه درصد حذف سرب^(۲) نیز از معادله (۱) استفاده شد [۹].

$$U_p = 100 \times \left(1 - \frac{C_e}{C_i} \right) \quad (1)$$

در این رابطه C_e و C_i به ترتیب غلظت اولیه و تعادلی سرب (ppm) می باشد. درصد حذف سرب برابر نسبت میزان کاهش سرب بعد از جذب به میزان سرب اولیه است. میزان جذب سرب بر روی نانو ذرات با استفاده از معادله (۲) محاسبه شده است [۱۰، ۱۱].

$$q_e = \frac{(C_i - C_e)}{S_p C_n} \quad (2)$$

در این رابطه C_n میزان نانو ذرات مغناطیسی به کار رفته بر حسب گرم (g) و S_p سطح ویژه نانو ذرات ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$) است.

به کار می رود. از روش های متداولی که برای تصفیه پساب های آلوده به سرب مورد استفاده قرار می گیرد می توان روش شیمیایی - فیزیکی (شامل خنثی سازی ترسیبی به کمک آهک و کربنات سدیم) و روش زیستی را نام برد [۶ - ۲]. این روش ها با وجود کارایی به نسبت مطلوب دارای معایب زیر می باشند:

۱- هزینه مواد شیمیایی و تجهیزات مورد استفاده آنها زیاد است.
۲- احتمال افزایش آلودگی، به طوری که اگر واکنش بین مواد شیمیایی و فلز کامل نشود، مواد شیمیایی افزوده شده خود یک آلاینده ثانویه محسوب خواهند شد.

۳- بازیابی فلز حذف شده اغلب دشوار و غیر عملی می باشد. زیرا فلز سرب ممکن است با ماده شیمیایی افزوده شده ترکیب پایداری را به وجود آورد که برای تصفیه آن از روش های متنوعی باید استفاده نمود که به طور عموم وقت گیر و پر هزینه است.

۴- راهبری پیچیده و پر هزینه سامانه های زیستی به دلیل حساسیت بالای میکروارگانیسم ها به تغییرات ناگهانی pH، دما، غلظت اکسیژن محلول (DO).

۵ - امکان ایجاد پدیده تورم لجن که در اثر اختلال در سیستم حاصل شده و موجب کاهش ناگهانی راندمان سیستم می شود.

۶ - تولید لجن زیاد که دفع آن هزینه های گزافی را بر سیستم تحمیل می کند.

۷- استفاده از این روش در پساب هایی که بار آلودگی بالایی از سرب دارند غیرممکن است زیرا میکروارگانیسم های موجود قابلیت حیات و فعالیت در این محیط را ندارند و باید با رقیق کردن پساب، غلظت آن را کنترل کرد که این نیز موجب افزایش شدت جریان پساب روزانه و ... می شود.

بنابراین استفاده از فن آوری های نوین مانند استفاده از نانو ذرات در حذف فلز سرب به دلیل نداشتن عیب های روش های مرسوم و همچنین کم هزینه بودن آن بسیار مهم می باشد. از این رو در این پژوهش تلاش شده است تا با در نظر گرفتن عیب های روش های متداول به روشی بهینه به منظور حذف و بازیافت سرب از پساب صنایع باتری سازی دست یافت [۷].

بخش تجربی

تولید نانو ذرات مغناطیسی آهن

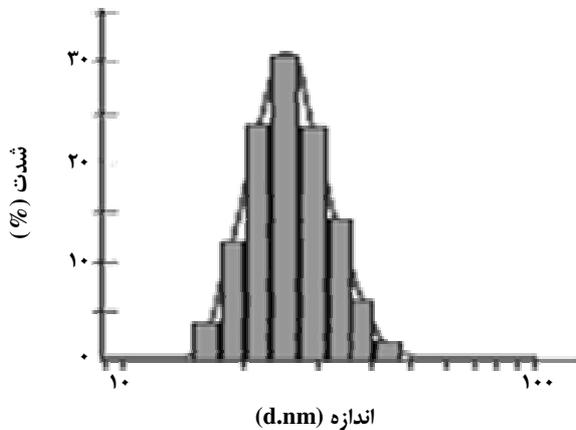
در این پژوهش نانو ذرات مغناطیسی با روش هم رسوبی از یون های آهن دو و سه ظرفیتی در حضور آمونیاک سنتز شدند

(۱) Atomic Adsorption

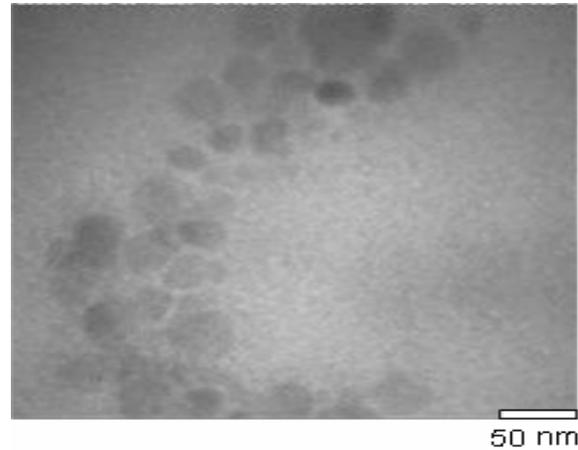
(۲) Uptake

جدول ۱- دامنه پارامترهای فیزیکی - شیمیایی آزمایش شده.

حجم (mL)	غلظت نانو ذرات ($g L^{-1}$)	زمان (دقیقه)	دما ($^{\circ}C$)	غلظت اولیه (ppm)	pH	متغیر / مرحله
۵۰	۵	۳۰	۲۵	۱۵۰	۳/۵-۱۲	اثر pH
۵۰	۵	۳۰	۲۵	۵-۱۰۰۰	۸/۵	اثر غلظت اولیه
۵۰	۵	۳۰	۱۰-۷۰	۱۵۰	۸/۵	اثر دما
۵۰	۲-۵	۳۰	۲۵	۱۵۰	۸/۵	اثر غلظت نانو ذرات
۱۰-۱۰۰	۵	۳۰	۲۵	۱۵۰	۸/۵	تأثیر حجم بر میزان جذب
۵۰	۵	۱۰-۶۰	۲۵	۱۵۰	۸/۵	تأثیر زمان همزدن بر میزان جذب



شکل ۲- توزیع شدتی اندازه ذرات.



شکل ۱- تصویر TEM نانوذرات مغناطیسی.

نتیجه‌ها و بحث

نتیجه‌های آنالیز میکروسکوپ الکترونی انتقالی (TEM) در شکل ۱ نشان داده شده است. همانگونه که دیده می‌شود ذرات سنتز شده به تقریب کروی بوده و توزیع اندازه آنها باریک است به عبارت دیگر ذره‌های سنتز شده به تقریب هم اندازه هستند و دارای اندازه ۵۰-۱۰ نانومتر می‌باشند.

توزیع شدتی اندازه ذره‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است بر این اساس اندازه متوسط نانو ذره‌ها بر حسب شدت معادل ۲۶/۵ نانومتر به دست آمد. همچنین سطح ویژه نانو ذره‌ها معادل $44/36 \text{ m}^2/\text{g}$ اندازه‌گیری شد.

بررسی تأثیر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی بر میزان جذب

اثرات تغییرات مقدار پارامترهای گوناگون فیزیکی و شیمیایی و عملیاتی بر میزان جذب سرب در جدول ۱ آمده است.

تأثیر pH بر میزان جذب

برای تعیین اثر pH بر میزان جذب سرب pH محیط در بازه بین ۳/۵-۱۲ تغییر داده شد و به این ترتیب ۵۰ میلی لیتر از هر نمونه با غلظت ۱۵۰ ppm سرب در دمای $25^{\circ}C$ و در مدت زمان ۳۰ دقیقه در تماس با ۳ گرم از نانوذرات قرار داده شد که نتیجه‌های آن در شکل ۳ نشان داده شده است. و نشان می‌دهد که با افزایش pH میزان جذب نیز افزایش می‌یابد زیرا در pH های بالا گروه‌های عاملی هیدروکسیل سطح دارای بار منفی بوده و باعث جذب کاتیون‌ها می‌شوند.

اثر غلظت اولیه بر میزان جذب

یکی از پارامترهای تأثیر گذار بر میزان جذب، غلظت اولیه سرب است. با تغییر غلظت سرب از ۵ ppm تا ۱۰۰۰ ppm این اثر مورد بررسی قرار گرفت. به این ترتیب ۵۰ میلی لیتر از نمونه

در pH معادل ۸/۵ و در دمای ۲۵°C به مدت ۳۰ دقیقه در تماس با ۳ گرم نانوذره قرار داده شد. منحنی‌های همدمای جذب فروندلیچ و لانگمویر در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است و مشخص است که با افزایش غلظت سرب میزان جذب آن نیز افزایش می‌یابد.

طبق معادله (۳) که نشان دهنده معادله لانگمویر است و با استفاده از نرم افزار Excel مقادیرهای K_L و q_{max} معادله لانگمویر به ترتیب ۰/۹۸ و $۱/۳۱۹ \times 10^{-3}$ محاسبه شد و در پایان معادله زیر به دست آمد [۱۳]:

$$q_e = \frac{q_{max} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (3)$$

$$q_e = \frac{1/319 \times 10^{-3} \times (0.98) C_e}{1 + 0.98 C_e}$$

در این رابطه C_e غلظت تعادلی سرب (ppm) و K_L معرف قدرت جذب ($dm^3 mol^{-1}$) و q_{max} معرف حداکثر میزان جذب سطحی ($mol m^{-2}$) است.

طبق معادله ۴ که نشان دهنده معادله فروندلیچ است و با استفاده از نرم افزار Excel مقادیرهای K_F و n معادله فروندلیچ به ترتیب $۶/۵ \times 10^{-7}$ و $۴/۱۱۸$ محاسبه شد و در پایان معادله زیر به دست آمد:

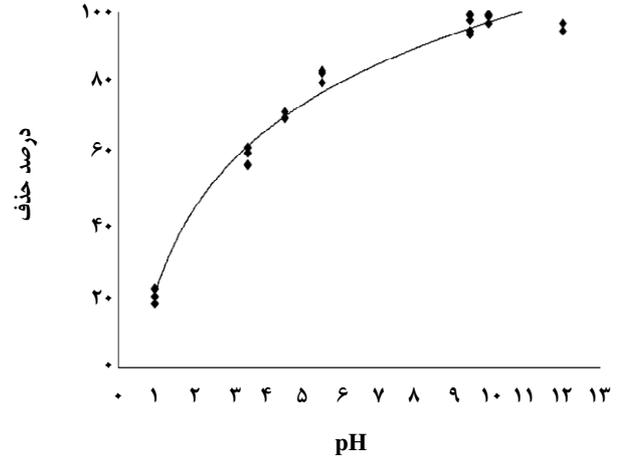
$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (4)$$

$$q_e = 6/5 \times 10^{-7} C_e^{1/4.118}$$

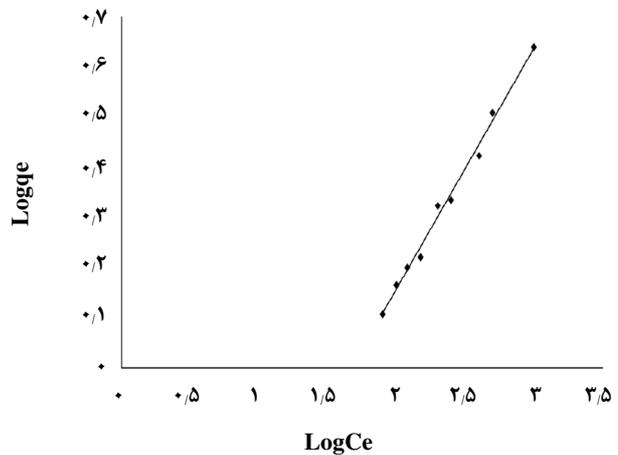
در این رابطه C_e غلظت تعادلی سرب (ppm) و K_F معرف ظرفیت جاذب ($dm^3 mol^{-1}$) و n معرف شدت جذب می‌باشد.

تأثیر دما بر میزان جذب

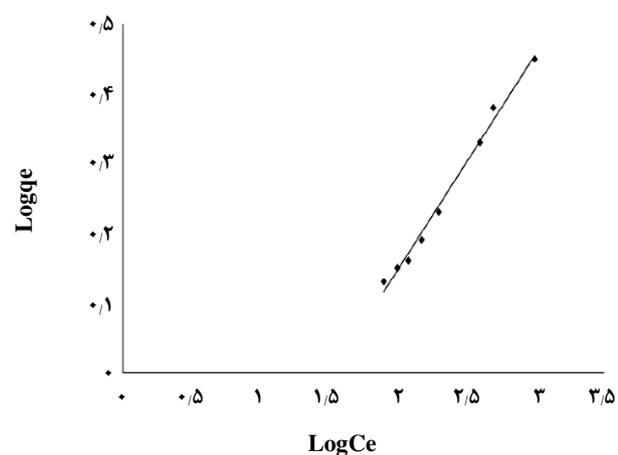
برای بررسی اثرات دما بر میزان جذب سرب ۵۰ میلی لیتر از نمونه در pH معادل ۸/۵ و غلظت ۱۵۰ ppm به مدت ۳۰ دقیقه در تماس با ۳ گرم نانو ذره در گستره دمایی ۷۰-۱۰°C قرار داده شد که نتیجه‌های به دست آمده در شکل ۶ آمده است. و نشان می‌دهد که با افزایش دما میزان جذب نیز افزایش یافت. این در حالی است که پدیده جذب سطحی با افزایش دما کاهش می‌یابد، بنابراین نتیجه گرفته می‌شود که حذف سرب از طریق مکانیسم تعویض یونی صورت می‌گیرد. که این با در نظر گرفتن کوچکتر بودن شعاع یونی بیشتر بودن الکترون‌گاتیویته سرب نسبت به آهن توجیه می‌شود [۱۲].



شکل ۳- تاثیر pH بر میزان جذب.



شکل ۴- منحنی همدمای لانگمویر.



شکل ۵- منحنی همدمای فروندلیچ.

تأثیر میزان نانوذرات بر جذب

اثر مقدار نانو ذرات مغناطیسی بر میزان جذب با مقدار ۲-۵ گرم از نانوذرات بررسی شد که به این ترتیب در هر قسمت ۵۰ میلی‌لیتر از نمونه که دارای pH معادل ۸/۵ و غلظت ۱۵۰ ppm به مدت ۳۰ دقیقه در تماس با مقدارهای متفاوتی از نانو ذرات قرار داده شد که نتیجه‌های آن در شکل ۷ آمده است و نشان می‌دهد که با افزایش نانو ذرات میزان جذب سرب نیز افزایش می‌یابد که این به دلیل افزایش محل‌های آزاد روی سطح نانو ذرات است.

تأثیر زمان تماس بر میزان جذب

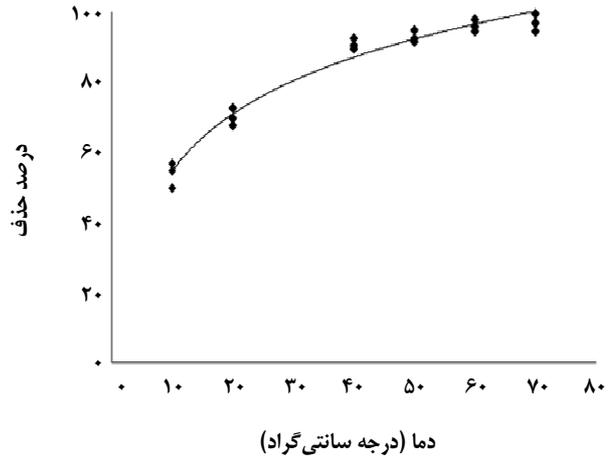
تأثیر زمان تماس بر میزان جذب با مقدار ۵۰ میلی‌لیتر از نمونه محلول حاوی سرب که در هر قسمت نمونه دارای pH معادل ۸/۵ و غلظت ۱۵۰ ppm به مدت ۶۰-۱۰ دقیقه و در دمای ۲۵°C در تماس با ۳ گرم نانو ذره قرار گرفت بررسی شد. نتیجه‌های آن در شکل ۸ آمده است و نشان می‌دهد که افزایش زمان تماس از ۳۰ دقیقه تأثیر چندانی در میزان جذب سرب ندارد.

احیای نانو ذرات و بازیافت سرب

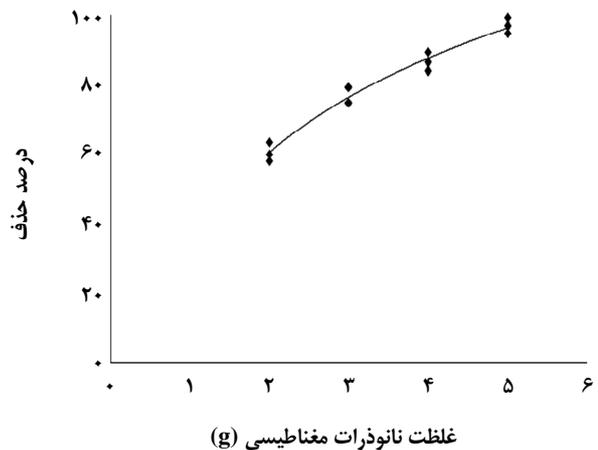
به منظور بازیابی نانو ذرات به کار رفته با افزودن تدریجی ۳-۴ میلی‌لیتر نیتریک اسید ۰/۵ مولار pH تا بازه ۲-۱/۵ پایین آورده می‌شود. با این روش در حدود ۸۰ درصد از نانوذرات احیا می‌شوند و قابلیت استفاده دوباره را دارند. برای تعیین میزان درصد نانوذرات بازیافت شده غلظت مشخصی از آنها برای جذب مقدار معینی از سرب مورد استفاده قرار گرفت. پس از مقایسه نتیجه‌های به دست آمده از جذب سرب با استفاده از نانوذرات بازیافت شده و نانوذرات اولیه مشخص شد که نانوذرات به کار رفته قابلیت احیا شدن تا حدود ۸۰ درصد را دارند.

طرح پیشنهادی برای کاربرد صنعتی

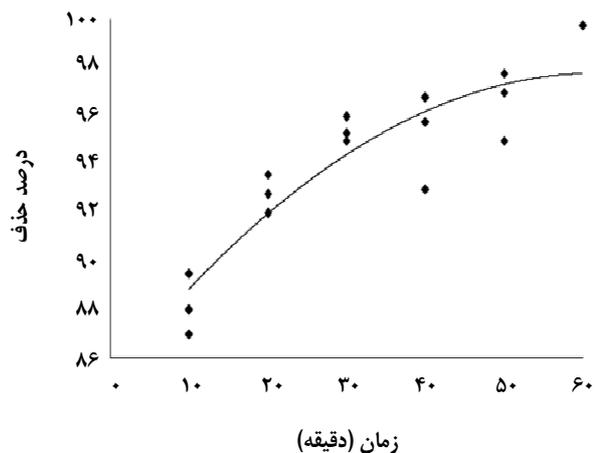
در شکل ۱۰ طرح پیشنهاد شده برای کاربرد صنعتی این روش آمده است که از یک مخزن اختلاط (مخزن شماره ۲)) به حجم ۸۰ لیتر و از جنس پلی اتیلن به منظور مخلوط کردن نانوذرات مغناطیسی آهن با پساب تشکیل شده است. مخزن شماره (۱) دارای حجم ۲۰ لیتر و از جنس پلی اتیلن است و برای تزریق نانو ذرات به داخل مخزن شماره (۲) مورد استفاده قرار می‌گیرد. نانوذرات دارای سرب پس از خروج از مخزن اختلاط توسط میدان الکتریکی (۱) (میدان الکتریکی) (۲) به صورت یدک می‌باشد



شکل ۶- تأثیر دما بر میزان جذب.



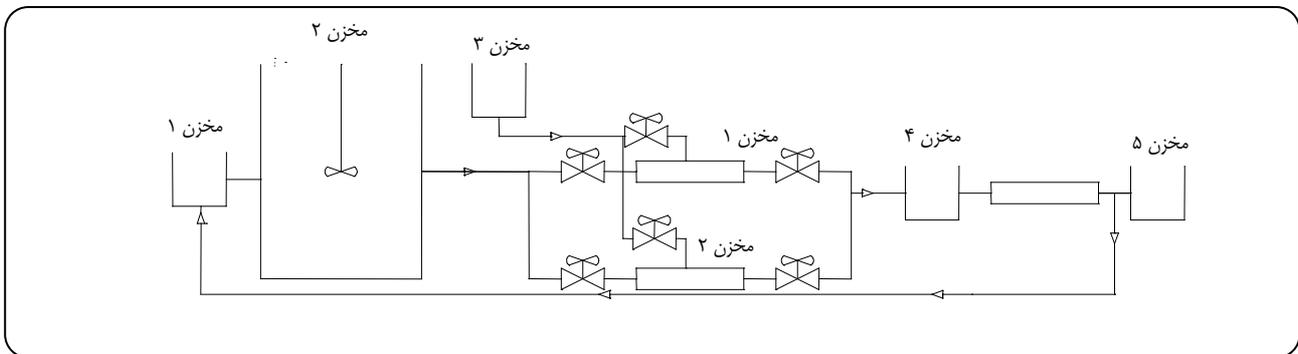
شکل ۷- تأثیر میزان نانوذرات بر میزان جذب.



شکل ۸- تأثیر زمان تماس بر میزان جذب.

جدول ۲- مقایسه مزایای استفاده از نانو ذرات مغناطیسی آهن و سایر روش‌ها در حذف سرب از پساب.

پارامترهای مورد بررسی	نانو ذرات مغناطیسی آهن [۷، ۸، ۱۰]	شیمیایی - فیزیکی (خنثی سازی آهنک و کربنات سدیم) [۲]	زیستی (بیولوژیکی) [۳ - ۵، ۱۳]
دما	کاربرد در دمای محیط (۲۵°C)	کاربرد در دمای محیط (۲۵°C)	۱۵ - ۲۲ °C
بازیافت سرب	قابل بازیافت	غیر قابل بازیافت	غیر قابل بازیافت
کنترل لجن	عدم تولید لجن	حجم لجن تولیدی بالا (لزوم استفاده از بستر دفن لجن)	حجم لجن تولیدی بالا (لزوم استفاده از لجن خشک کن)
بار آلودگی	قابلیت تصفیه پسابهایی با بار آلودگی بالا	قابلیت تصفیه پسابهایی با بار آلودگی بالا	قابلیت تصفیه پسابهایی با بار آلودگی پایین
مصرف انرژی	ناچیز	بالا	بالا
هزینه تصفیه	ناچیز	بالا (لزوم مصرف مواد شیمیایی با هزینه بالا)	بالا



شکل ۱۰- طرح پیشنهادی کاربرد صنعتی نانو ذرات برای حذف سرب.

ایجاد دمای بالاتر از ۲۵ °C (دمای محیط) هزینه فراوانی را برای صنایع در بر خواهد داشت از این رو برای یافتن شرایط بهینه حذف سرب در دمای نزدیک به محیط بررسی هایی صورت گرفت . همچنین پساب کارخانه باتری سازی به علت استفاده از اسید در فرایند تولید دارای pH اسیدی (در حدود ۴) است. میانگین غلظت سرب موجود در پساب کارخانه باتری سازی در یک شبانه روز در حدود ۱۶۰-۱۳۰ ppm بود از این رو بیشترین مقدار حذف سرب با غلظت به تقریب ۱۵۰ ppm در محیط اسیدی و در دمای ۲۵ °C مقداری بالغ بر ۷۰ درصد بود. که این نتیجه راندمان بالای حذف سرب در شرایط واقعی را نشان می دهد. این روش علاوه بر آنکه روش نوینی در حذف فلز سرب از پساب های صنعتی می باشد دارای برتری های بسیاری نسبت به روش های متداول و مرسوم نیز می باشد که در جدول ۲ به مقایسه روش فوق با سایر روش های مورد استفاده در حذف سرب از پساب پرداخته شده است.

تا پس از انسداد لوله تحت تاثیر میدان الکتریکی (۱) مورد استفاده قرار گیرد) از فاز مایع جدا می شوند. پساب تصفیه شده که عاری از نانو ذرات می باشد به بیرون هدایت می شود. پس از پر شدن لوله شماره (۲) از نانو ذرات حاوی سرب ورود پساب و میدان مغناطیسی قطع شده و نانو ذرات توسط محلول اسیدی مخزن شماره (۳) به منظور بازیافت نانو ذرات شستشو داده شده و به مخزن شماره (۴) وارد می شوند تا از آنجا پس از جدا شدن از سرب توسط میدان مغناطیسی شماره (۳) بار دیگر به منظور استفاده دوباره به مخزن تزریق نانو ذرات (مخزن شماره (۱)) در ابتدای فرایند برگردد. همچنین سرب جدا شده نیز در مخزن شماره (۵) جمع آوری شده تا بار دیگر مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه گیری

نتیجه های این پروژه نشان داد که بیشترین راندمان حذف سرب (۹۹٪) در غلظت بالای آن (۱۰۰۰ ppm) و در pH = ۱۲، دمای ۷۰°C و با استفاده از ۳ گرم نانو ذرات به دست می آید. اما چون

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۰/۳۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۲/۱۳

مراجع

- [1] li Q., Zhai J., Zhang W., Wang M., Zhou J., Kinetic Studies of Adsorption of Pb(II), Cr(II) and Cu(II) from Aqueous Solution by Sawdust and Modified Peanut Husk, *J. Hazard. Mater.*, **B141**, p. 736 (2007).
- [2] Ricou P., Lécuyer I., Le Cloirec P., Removal of Cu²⁺, Zn²⁺ and Pb²⁺ by Adsorption Onto Fly Ash and Fly Ash/Lime Mixing, *Water Science and Technology*, **39**, p. 10 (1999).
- [3] Hoa T., Liamleam W., Annachatre A.P., Lead Removal Through Biological Sulfate Reduction Process, *Bioresource Technology*, **98**, p. 2538 (2007).
- [4] Raungsombon S., Chidthaisong A., Bunnag B., Inthorn D., Harvey N.W., Removal of Lead (Pb²⁺) by the Cyanobacterium *Gloeocapsa* sp., *Bioresource Technology*, **99**, p. 5650 (2008).
- [5] Hammaini A., González F., Ballester A., Blázquez M.L., Muñoz J.A., Biosorption of Heavy Metals by Activated Sludge and Their Desorption Characteristics, *Journal of Environmental Management*, **258**, p. 419 (2007).
- [۶] ادیبی، مسیح...؛ اخلاقپور، شهرام؛ فخرایی، حسین؛ تصفیه فلز سرب توسط سیستم لجن فعال، چهارمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران (۱۳۷۷).
- [7] WHO Lead in Wastewater, "Background Document for Development of WHO, Guidelines for Waste-Water Quality", Geneva, World Health Organization, (WHO/SDE/WSH/05.08/55), (2005).
- [8] Bruce I.J., Taylor J., Todd M., Davies M.J., Borioni E., Sangregorio C., Sen T., Synthesis Characterisation and Application of Silica-Magnetite Nanocomposites, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **68**, p. 145 (2004).
- [9] Reynolds T.D., Richards P.A., "Unit Operations and Processes in Environmental Engineering", Second Edition, PWS Pub. Co., (1929).
- [10] Hu J., Chen G., Lo I.C., Removal and Recovery of Cr (VI) from Wastewater by Maghemite Nanoparticles, *Water Research*, **74**, p. 4528 (2005).
- [11] Mayo J.T., Yavuz C., The Effect of Nanocrystalline Magnetite Size on Arsenic Removal, *Science and Technology of Advanced Materials*, **88**, p. 71 (2007).
- [12] Miessler G.L., Tarr D.A., "Inorganic Chemistry", Second Edition, Pearson Education, (2002).
- [13] Sari A., Tuzen M., Citak D., Soylak M., Adsorption Characteristics of Cu(II) and Pb(II) onto Expanded Perlite from Aqueous Solution, *Journal of Hazardous Material*, **148**(1-2), p. 387 (2007).