

Original article

Investigation of Khuzestan Steel Company's Modified Slag in Removal of Aluminum from Aqueous Solutions: Adsorption Isotherm and Kinetic Studies

Afshin Takdastan¹Mehrnoosh Abtahi²Atena Sarshir^{3*}Mohamad Hasan Bazafkan⁴Reza Saeedi⁵

1- Associate Professor, Environmental Technologies Research Center, Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran

2- Assistant Professor, Department of Environmental Health Engineering, Environmental and Occupational Hazards Control Research Center, School of Public Health, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

3- MSc Student, Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran

4- MSc, Environmental Technologies Research Center, Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran

5- Assistant Professor, Department of Public Health, Faculty of Health, Safety, and Environment, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

***Corresponding author:** Atena Sarshir, Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran

Email: sarshiry.a@gmail.com

Received: 22 July 2017

Accepted: 22 September 2017

ABSTRACT

Introduction and purpose: Two of the most important issues of today's world are water scarcity and water supply pollution with heavy and toxic metals. We aimed to investigate the removal of aluminum ions from aqueous solutions by modified slag of Khuzestan Steel Company.

Methods: Steel slag was prepared from Khuzestan Steel Company in Ahvaz, Iran. This laboratory-scale experimental study was carried out to investigate the removal of aluminum from aqueous solutions using modified slag in discontinuous flow system. The studied variables included pH, adsorbent dose, initial concentration of aluminum, and reaction time. The concentration of aluminum ions was quantified using atomic absorption spectrometer. In carrying out this study and the use of resources, ethical issues were observed.

Results: The results showed that the adsorption capacity of aluminum on modified steel slag is dependent on parameters such as pH, adsorbent dose, initial concentration of aluminum, and reaction contact time. The optimum efficiency was obtained at pH 4, adsorbent dose of 5 g/L, the initial concentration of 20 mg/l, and contact time of 60 min. Aluminum adsorption isotherm of modified slag in Khuzestan Steel Company followed the Langmuir model. The best aluminum adsorption kinetics model in this study was shown to be the pseudo-second-order model.

Conclusion: In this study, it was found that modified slag of Khuzestan Steel Company is highly potent in aluminum removal, and it can be utilized as a cost-effective adsorbent.

Keywords: Adsorption, Aluminum, Isotherm, Kinetics, Modified steel slag

► **Citation:** Takdastan A, Abtahi M, Sarshir A, Bazafkan MH, Saeedi R. Investigation of Khuzestan Steel Company's Modified Slag in Removal of Aluminum from Aqueous Solutions: Adsorption Isotherm and Kinetic Studies. Journal of Health Research in Community. Summer 2017;3(2): 75-87.

مقاله پژوهشی

بررسی کارآیی جاذب سرباره اصلاح شده شرکت فولاد خوزستان جهت حذف فلز آلومینیوم از محلول های آبی: تعیین ایزوترم و سینتیک جذب

چکیده

افشین تكدستان^۱مهرنوش ابطحي^۲آتنا سرشير^۳محمد حسن بازافكن^۴رضا سعیدی^۵

مقدمه و هدف: یکی از بزرگترین مشکلات دنیای امروز، کمبود آب و آلودگی منابع آب محیط زیست به فلزات سنگین و سمی می باشد. این مطالعه با هدف بررسی میزان حذف یون های آلومینیوم توسط سرباره اصلاح شده شرکت فولاد خوزستان از محلول آبی صورت گرفت.

روش کار: سرباره از شرکت فولاد خوزستان در شهر اهواز تهیه گردید. مطالعه تجربی حاضر در مقیاس آزمایشگاهی به منظور بررسی حذف آلومینیوم از محلول آبی توسط سرباره اصلاح شده در سیستم جریان ناپیوسته انجام شد. در این مطالعه متغیرهای آزمایش شامل pH، دوز جاذب، غلظت اولیه آلومینیوم و زمان واکنش، بررسی گردید و غلظت یون های آلومینیوم با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه گیری شد. در انجام این مطالعه و استفاده از منابع، موازین اخلاقی رعایت گردید.

یافته ها: نتایج نشان داد که ظرفیت جذب آلومینیوم روی سرباره اصلاح شده فولاد به پارامترهای pH، دوز جاذب، غلظت اولیه آلومینیوم و زمان تماس واکنش وابسته است. بهره وری بهینه حذف در pH برابر ۴، دوز جاذب ۵ گرم در لیتر، غلظت اولیه ۲۰ میلی گرم در لیتر و زمان تماس ۶۰ دقیقه، به دست آمد و ایزوترم جذب آلومینیوم سرباره اصلاح شده شرکت فولاد خوزستان از مدل Langmuir تبعیت می کرد. بهترین مدل سینتیک جذب آلومینیوم در این مطالعه، مدل سینتیک شبه درجه دوم نشان داده شد.

نتیجه گیری: در این مطالعه مشخص شد که سرباره اصلاح شده فولاد خوزستان توانایی بالایی برای حذف آلومینیوم دارد و می تواند به عنوان یک جاذب ارزان قیمت مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: آلومینیوم، ایزوترم های جذب، جذب، سرباره اصلاح شده فولاد، سینتیک

۱. دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات فناوری های زیست محیطی دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، اهواز، ایران
۲. استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات کنترل عوامل زیان آور محیط و کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران
۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، اهواز، ایران
۴. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات فناوری های زیست محیطی دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، اهواز، ایران
۵. استادیار، دانشکده سلامت، ایمنی و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

* نویسنده مسئول: آتنا سرشیر، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، اهواز، ایران

Email: sarshiry.a@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۴/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۳۱

◀ **استناد:** تكدستان، افشین؛ ابطحي، مهرنوش؛ سرشير، آتنا؛ بازافكن، محمد حسن؛ سعیدی، رضا. بررسی کارآیی جاذب سرباره اصلاح شده شرکت فولاد خوزستان جهت حذف فلز آلومینیوم از محلول های آبی: تعیین ایزوترم و سینتیک جذب. مجله تحقیقات سلامت در جامعه، تابستان ۱۳۹۶؛ ۲(۳): ۸۷-۷۵.

مقدمه

امروزه آلودگی رو به افزایش فاضلاب های شهری و صنعتی با یون های فلزی سمی و سنگین، یک مسئله نگران کننده فلزات در محیط های گوناگون، مصرف روزافزون بارورکننده ها، زیست محیطی می باشد. از جمله عوامل اصلی افزایش غلظت

اصلاح کننده‌های کشاورزی، آفت کش‌ها و انتشار فاضلاب‌های شهری و پساب‌های صنعتی بدون تصفیه مناسب است [۱]. استخراج فلزات از معادن و کاربرد گسترده فلزات در صنایع باعث شده است که غلظت این فلزات در آب، فاضلاب، هوا و خاک بیشتر از مقادیر زمینه‌ای افزایش پیدا کند؛ بنابراین حذف فلزات سنگین از محیط آبی، موضوع مهمی در بهداشت عمومی جامعه محسوب می‌شود که از دو جنبه اهمیت دارد: جداسازی فلزات سنگین و سمی به منظور پالایش محیط و بازیافت و استفاده مجدد از فلزات برای حفظ منابع [۲،۳]. آلومینیوم فراوان‌ترین عنصر فلزی است و حدود ۸/۱ درصد از پوسته زمین را تشکیل می‌دهد. این عنصر در کل طبیعت از نظر مقدار، سومین عنصر بعد از اکسیژن و سیلیکون می‌باشد. آلومینیوم به صورت خالص وجود ندارد و بیشتر به صورت ترکیب هیدروکسید، سیلیکات، سولفات و فسفات یافت می‌شود. عدد اتمی آلومینیوم ۱۳، جرم اتمی آن ۲۶/۹۸ گرم بر مول، دانسیته آن ۲/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب و دارای هشت ایزوتوپ رادیواکتیو است. این عنصر یک فلز نرم سفید و چکش پذیر با چگالی پایین است [۴].

آلومینیوم، عنصری غیر ضروری برای بدن می‌باشد و ورود آن با مقادیر زیاد به بدن می‌تواند اثرات سمی به دنبال داشته باشد. در سال‌های اخیر به اثرات سمی ورود آلومینیوم به بدن توجه شده است. این آثار بیشتر بر سیستم اعصاب، سیستم هورمونی، خون‌سازی و متابولیسم کلسیم مشاهده می‌شود. در مطالعات انجام شده روی حیوانات آزمایشگاهی، اثرات سمی این عنصر روی حافظه، تولید مثل، غده‌های درون ریز، ترشح معده، خون‌سازی و سیستم ایمنی مورد مطالعه قرار گرفته است [۵]. آلومینیوم برای آبریان و گیاهان نیز سمی است. ماهی‌هایی که در معرض غلظت بالای آلومینیوم (در نتیجه انحلال زیاد منتج از باران‌های اسیدی) قرار می‌گیرند دچار خفگی یا هایپرونتیلیسیون (Hyperventilation) می‌شوند. سمیت در گیاهان به صورت کاهش رشد ریشه و کاهش جذب کلسیم بروز می‌کند. فلز آلومینیوم به عنوان ماده ساختمانی

در ساخت و ساز، خودروسازی و صنایع هواپیماسازی، تولید آلیاژهای فلزی، صنعت برق، ساخت ظروف پخت و پز و نیز در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده می‌شود. همچنین ترکیبات آلومینیوم به عنوان آنتی‌اسیدها، ضد عرق و مکمل‌های غذایی به کار می‌روند. از کاربردهای گسترده و مهم نمک‌های آلومینیوم در تصفیه آب به عنوان منعقدکننده برای کاهش رنگ، کدورت، ناخالصی‌های آب و میکروارگانیسم‌ها می‌باشد [۶].

تاکنون برای حذف فلزات از فاضلاب صنایع، روش‌های مختلفی از جمله: فرآیند اسمز معکوس، الکترودیالیز، تبادل یون، روش‌های زیستی و جذب سطحی روی مواد جاذب نظیر کربن فعال، نانوتیوپ کربنی، چند لایه کربنی، زئولیت‌ها، رزین‌ها و رسوب‌دهی با استفاده از هیدروکسید یا سولفید اجرا شده است که هر کدام از لحاظ اقتصادی دارای مزایا و معایبی می‌باشد. به طور کلی جذب سطحی فرآیند تجمع مواد در فصل مشترک بین دو فاز می‌باشد. کربن فعال از مؤثرترین موادی است که برای جذب استفاده می‌گردد [۷-۹]. از آنجا که احیای کربن فعال هزینه‌بر و گران می‌باشد، امروزه مطالعات به دنبال یافتن روش‌های ساده و ارزان‌قیمتی است که با همان کارایی برای استفاده در تصفیه فاضلاب‌های آلوده به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه مناسب باشد؛ زیرا این کشورها به دلیل مشکلات اقتصادی قادر به استفاده از روش‌های پرهزینه نیستند [۱۰، ۱۱].

سرباره یکی از زائدات صنعت فولاد است که برای این صنعت مزاحمت زیادی ایجاد می‌کند؛ اما امروزه با شناخت مصارف متعدد آن مانند کاربرد با دیگر مصالح ساختمانی و راه‌سازی، از یک ماده مزاحم به یک ماده مفید و اقتصادی تبدیل شده است. یکی از کاربردهای سرباره که کارشناسان محیط زیست سعی در شناسایی و کاربردی کردن آن دارند، استفاده آن به عنوان جاذب در حذف آلاینده‌های متفاوت محیط زیست است؛ به طوری که در مطالعات انجام شده، کاربرد موفق سرباره به عنوان جاذب در حذف فسفات، آمونیوم، آلاینده‌های آلی و فلزات سنگینی مانند مس، آرسنیک،

سرب، منگنز، کروم، نیکل و روی گزارش شده است [۱۲]. سرباره فولاد شامل: سرباره کوره انفجاری، سرباره کوره قوس الکتریکی و سرباره کوره مبدل است که این محصول جانبی در مقیاس بسیار بزرگی برای ساخت فولاد به کار می‌رود. در هر صورت کاربرد سرباره به عنوان جاذب، محدودیت‌هایی نیز دارد. سرباره متشکل از اکسیدهای کلسیم، سیلیکون، آهن، آلومینیم، منگنز و انواعی از عوامل قلیایی است که با آزاد کردن عامل هیدروکسیل (OH) موجب خنثی سازی قوی شرایط اسیدی، ظرفیت جذب و ترسیب شیمیایی می‌شود؛ از طرف دیگر، سرباره به طور اولیه دارای سطح تماس کم و ساختار خلل و فرج ضعیفی است که اصلاح آن را برای استفاده به عنوان جاذب ضروری می‌سازد. از میان روش‌های اصلاح که به کار رفته است، روش اصلاح با اسید دارای توانایی بیشتری در اصلاح ساختار سرباره برای رسیدن به اهداف تصفیه به نظر می‌رسد. در مطالعاتی که روی حذف فلزات سنگین با سرباره انجام شده، فلزاتی مانند کروم، کادمیوم، نیکل، کبالت، منگنز، مس و آرسنیک مورد بررسی قرار گرفته است [۱۳، ۱۴]. محققان با استفاده از روش‌های TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) و SPLP (Synthetic Precipitation Leaching Procedure) که دو روش برای تعیین سمیت مواد استخراج شده از سرباره می‌باشند، غلظت فلزات سنگین آزاد شده از سرباره (کروم، کبالت، نیکل، آهن، منگنز، سرب و کادمیوم) را که در pH مختلف به دست آمد، اندازه گیری کردند. نتایج حاکی از آن بود که غلظت فلزات تولیدی از سرباره به طور قابل توجهی، کمتر از غلظت‌های ماکزیممی بود که در محدوده سمیت سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا می‌باشد؛ بنابراین سرباره در ردیف مواد بی خطر برای محیط زیست قرار گرفت [۱۵].

روش کار

این پژوهش از نوع مطالعات نیمه تجربی می‌باشد که در آن

کارآیی سرباره شرکت فولاد خوزستان برای حذف آلومینیوم در مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. برای تهیه جاذب، سرباره فولاد از شرکت فولاد خوزستان در شهر اهواز با کسب اجازه از مدیریت این شرکت تهیه گردید. به منظور اصلاح جاذب، ابتدا سرباره خرد شد و سپس توسط سرندهای مش ۵۰ و ۷۰ برای دستیابی به سرباره با اندازه‌های بین ۰/۲ تا ۰/۳ الک شد. بعد از آن سرباره با اسید هیدروکلریک ۱ مولار پیش تصفیه گردید. در مرحله آخر، سرباره چند بار با آب دیونیزه شستشو داده شد که ناخالصی‌های آن حذف شد و سپس در فور با دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد به مدت ۴ ساعت خشک گردید. مراحل شستشو در بشر ۱ لیتری انجام و برای جداسازی سرباره از فیلتر کاغذی (واتمن ۴۰) استفاده شد [۱۰، ۱۳]. در این مطالعه ابتدا برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و مورفولوژی سرباره طبق روش‌های متداول در ASTM (American Society for Testing and Materials) اندازه گیری شد. ترکیبات شیمیایی سرباره قبل از اصلاح و بعد از اصلاح با استفاده از طیف سنج اشعه ایکس اندازه گیری گردید (XRF: X-ray Fluorescen). سطح ویژه (BET)، با آنالیزور جذب نیتروژن (Micromeritics/Gemini-2372) تعیین شد [۱۰]. خواص فیزیکی موجود در نمونه با استفاده از پراش اشعه ایکس (XRD: X-ray Diffraction) مشخص شد [۱۶]. برای تهیه محلول‌های آلومینیوم با غلظت‌های مورد نیاز از نمک سولفات آلومینیوم ۱۸آبه (ساخت شرکت Merck، آلمان) استفاده گردید. در ابتدا محلول استوک (محلول ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر) از نمک فوق تهیه و بعد از رقیق کردن آن با آب مقطر، محلول‌های آلومینیوم با غلظت‌های مورد نظر آماده شد. مطالعات جذب نشان می‌دهد که مهم‌ترین متغیرهای جذب سطحی، غلظت آلاینده، مقدار جاذب، غلظت اولیه فلز و زمان تماس است. در این پژوهش با توجه به مطالعات مشابه، تأثیر مقادیر مختلف pH (۲ تا ۹)، دوز جاذب (۱، ۳، ۵، ۷ و ۱۰ گرم در لیتر)، زمان تماس (۵ تا ۳۶۰ دقیقه) و غلظت اولیه فلز (۱ تا ۱۰۰ میلی گرم در لیتر) به منظور ارزیابی

کارآیی جاذب، مورد بررسی قرار گرفت.

$$E = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 \quad \text{رابطه ۱}$$

$$q_e = \frac{C_0 - C}{M} \times V \quad \text{رابطه ۲}$$

در این روابط، E نشان‌دهنده درصد حذف آلاینده، C_0 غلظت اولیه و C غلظت باقیمانده آلاینده (میلی گرم در لیتر) است. همچنین q_e ، غلظت ماده جذب‌شونده در فاز جامد در زمان تعادل (میلی گرم در لیتر)، M جرم جاذب بر حسب گرم و V حجم محلول آلاینده (لیتر) است [۱۷، ۱۸]. همچنین برای تعیین حداکثر ظرفیت جذب جاذب‌ها از مدل‌های ایزوترم Freundlich، Langmuir و Temkin استفاده شد و سینتیک جذب توسط مدل‌های سینتیک شبه درجه اول و شبه درجه دوم بررسی گردید.

یافته‌ها

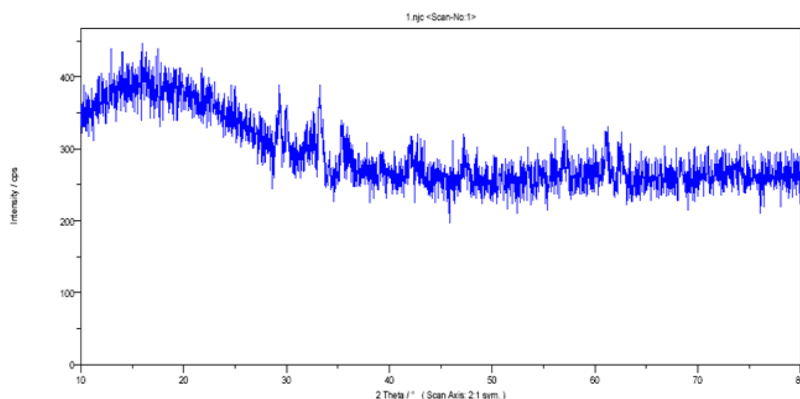
تعیین ترکیب شیمیایی سرباره اصلاح‌شده

در این مطالعه برای رسیدن به خواص فیزیکی سرباره اصلاح‌شده از دستگاه پراش اشعه ایکس استفاده گردید که نتایج آن در شکل ۱ آورده شده است.

آزمایش‌های این مطالعه به‌صورت ناپیوسته و در دمای اتاق صورت گرفت و به‌منظور ایجاد تماس بیشتر، نمونه‌ها به‌وسیله شیکر ارییتال (مدل GFL137) ساخت کشور ژاپن با ۱۲۰ دور در دقیقه همزده شد. سپس فاز جامد از مایع با استفاده از کاغذ صافی (واتمن ۴۰) از هم جدا شد و غلظت آلومینیوم باقی‌مانده در محلول تعیین گردید. در مرحله اول، بهره‌وری حذف جاذب با تغییر زمان تماس سنجیده و غلظت اولیه فلز ۲۰ میلی گرم بر لیتر، دوز جاذب ۵ گرم بر لیتر و pH برابر ۴ در نظر گرفته شد. نتیجه بهینه این مرحله در مراحل بعد یعنی تعیین تأثیر غلظت آلاینده؛ دوز جاذب و pH، به‌عنوان پارامتر ثابت مورد بررسی قرار گرفت. درخصوص سایر نتایج مراحل بعدی نیز همین شرط برقرار بود.

برای اندازه‌گیری غلظت آلومینیوم باقیمانده در محلول، از روش طیف‌سنج جذب اتمی با دستگاه جذب اتمی ساخت کشور آلمان استفاده شد. تنظیم pH محلول نمونه با محلول ۱ مولار HCL و ۰/۱ مولار NaOH انجام شد. اندازه‌گیری pH محلول، با pH متر مدل ۷۱۱۰ ساخت شرکت WTW کشور آلمان صورت گرفت.

درصد حذف فلز و ظرفیت جذب جاذب به‌ترتیب با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه شد:



شکل ۱: پراش اشعه ایکس (XRD) سرباره اصلاح‌شده فولاد

جدول ۱: نتایج آنالیز XRF سرباره اصلی و سرباره اصلاح شده فولاد

ترکیب	مقدار بر حسب درصد برای سرباره اصلی فولاد	مقدار بر حسب درصد برای سرباره اصلاح شده فولاد
Cao	۴۱/۳	۲۴/۶۳
Fe ₂ O ₃	۱۹/۱	۱۴/۴۵
SiO ₂	۱۴/۶۴	۶/۹۴
Al ₂ O ₃	۹/۵۱	۴۰/۷۶
MgO	۶/۳	۱/۳

جدول ۲: نتایج حاصل از آنالیز سطح ویژه جاذب BET

سطح BET (متر مربع بر گرم)	سطح کلی (متر مربع)	دمای دتکتور (کلوین)	واجذب	سطح جذب	N ₂ /He	جاذب	وزن نمونه (گرم)	فشار آزاد (اتمسفیر)	دمای آزاد (کلوین)
۸/۴۷	۲/۸۸	۱۰۰	۳/۸۰	۳/۳۷	۰/۱۵	N ₂	۰/۳۴۰۵۹	۱	۲۹۸

این شکل نشان دهنده آن است که این سرباره از یک ساختار نامنظم تشکیل شده است.

در این مطالعه برای تعیین ترکیب و آنالیز عنصری سرباره اصلاح شده فولاد از دستگاه فلورسانس پرتو ایکس (XRF) استفاده شد و با سرباره اصلی مقایسه گردید (جدول ۱). این مقایسه نشان داد که درصد ترکیبات سرباره اصلاح شده نسبت به سرباره اصلی کاهش یافته است.

نتایج نشان داد که سطح ویژه سرباره تغییر قابل توجهی بعد از اصلاح با اسید داشت و به دلیل افزایش حفره ها بعد از اصلاح، توانایی جاذب در جذب فلز افزایش یافت (جدول ۲) [۱۹].

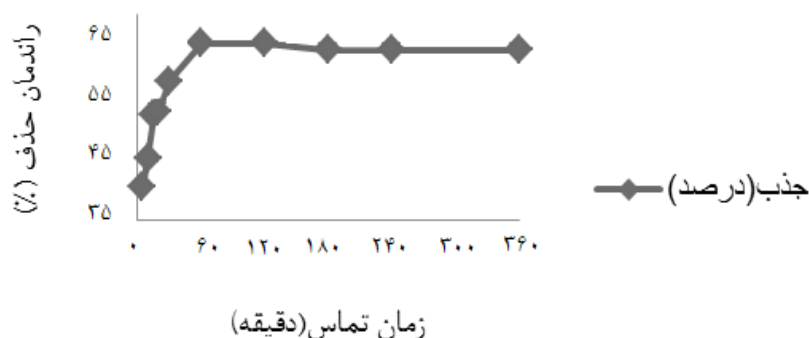
تأثیر پارامتری بهره برداری بر کارآیی جاذب در حذف آلومینیوم

در این مرحله برای بررسی متغیر زمان تماس، جرم جاذب، pH و غلظت آلانینده ثابت در نظر گرفته شد. برای تعیین اثر زمان تماس، آزمایش در طول ۶ ساعت انجام شد و نمونه برداری در

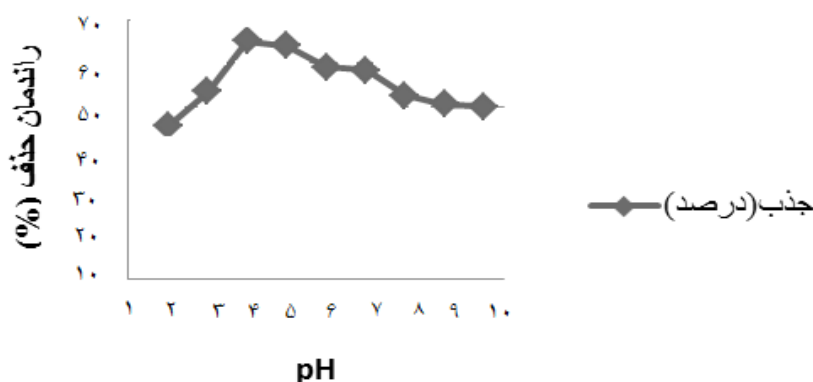
زمان های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۴۰ و ۳۶۰ دقیقه صورت گرفت. براساس نمودار ۱، با بیشتر شدن زمان تماس، بازدهی حذف آلومینیوم افزایش یافته؛ ولی در زمان تماس ۶۰ دقیقه با غلظت ورودی ۲۰ میلی گرم بر لیتر تقریباً بازدهی حذف به تعادل رسیده و با سرعت کمتری افزایش پیدا کرده است؛ بنابراین این زمان به عنوان زمان بهینه در نظر گرفته شد. بازدهی حذف در این زمان برابر ۶۴/۹۹ درصد به دست آمده است.

تأثیر pH در حذف آلومینیوم

pH محلول نیز از عوامل مؤثر بر بار سطحی ذرات جاذب و در نتیجه میزان جذب آلانیندهاست. براساس نمودار ۲، بهره وری جذب آلومینیوم با افزایش pH از یک روند افزایشی برخوردار بود و بیشترین بازده حذف در pH برابر ۴ به دست آمد؛ بنابراین این pH را به عنوان pH بهینه در نظر گرفته شد. بازدهی حذف در این pH برابر ۶۴/۹۹۷۵ درصد به دست آمد.



نمودار ۱: میزان بازدهی حذف فلز آلومینیوم در زمان‌های تماس مختلف، غلظت اولیه ۲۰ میلی گرم بر لیتر، pH برابر ۴، دوز جاذب ۵ گرم بر لیتر



نمودار ۲: میزان بازدهی حذف فلز آلومینیوم در pHهای مختلف، غلظت اولیه ۲۰ میلی گرم بر لیتر، در زمان ۶۰ دقیقه و دوز جاذب ۵ گرم بر لیتر

تأثیر دوز جاذب در حذف آلومینیوم

براساس نمودار ۳ با افزایش دوز جاذب، بازدهی حذف آلومینیوم افزایش می‌یابد و در دوز ۵ گرم، میزان درصد حذف تقریباً ثابت می‌شود؛ بنابراین این دوز به عنوان دوز بهینه در نظر گرفته شد. بازدهی حذف در این دوز به ترتیب برابر ۶۴/۹۹۷ درصد به دست آمده است.

تأثیر غلظت اولیه فلز در حذف آلومینیوم

براساس نمودار ۴ با کاهش غلظت اولیه آلومینیوم، بازدهی

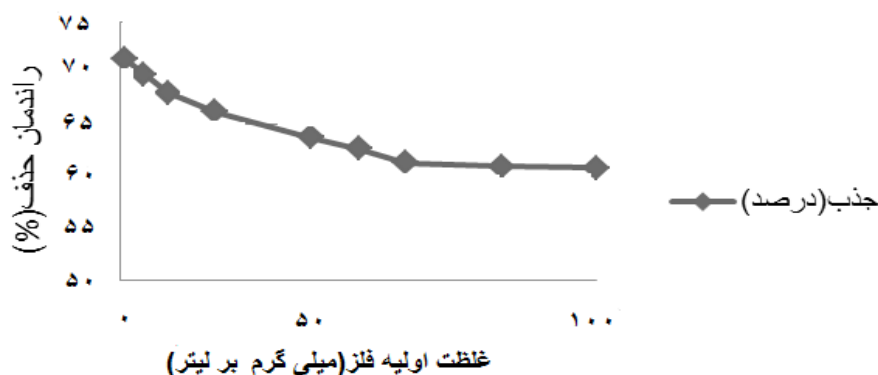
ایزوترم‌های جذب

خصوصیات جذب، معمولاً توسط ایزوترم‌های تعادلی جذب توصیف می‌شود. در این مطالعه، جذب تعادلی آلومینیوم توسط سرباره اصلاح شده شرکت فولاد، با استفاده از ایزوترم‌های

حذف افزایش می‌یابد؛ به طوری که بازده حذف در غلظت ۱ میلی گرم بر لیتر به ۷۱/۳۵۸ درصد می‌رسد، اما در غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر در شرایط یکسان بازده حذف ۶۰/۸۲۷ درصد می‌باشد.



نمودار ۳: میزان بازدهی حذف آلومینیوم در دوزهای مختلف جاذب، غلظت ورودی ۲۰ میلی گرم بر لیتر، در pH برابر ۴ و زمان تماس ۶۰ دقیقه



نمودار ۴: میزان بازدهی حذف فلز آلومینیوم در غلظت‌های مختلف فلز، دوز جاذب ۵ گرم بر لیتر، در pH برابر ۴ و زمان تماس ۶۰ دقیقه

q_e : جرم ماده جذب شده به ازای واحد جرم جاذب (میلی گرم بر گرم)، Q_m : میزان یون لازم برای تشکیل لایه منفرد روی جاذب K_L : ثابت تجربی و C_e غلظت تعادلی ماده جذب شونده در محلول بعد از برقراری تعادل (میلی گرم بر لیتر) است.
 K_f : ظرفیت جذب (میلی گرم بر گرم)، $1/n$: شدت جذب است.

مقادیر مربوط به ایزوترم‌ها در جدول ۳ و نمایش آن در نمودار ۵ نشان داده شده است.

مبنای انتخاب بهترین ایزوترم جذب، ضریب همبستگی R^2

لانگمویر، فروندلیخ و تمکین مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌های ایزوترم جذب Langmuir، Freundlich و Temkin با استفاده از روابط ارائه شده در زیر محاسبه گردید [۱۷].

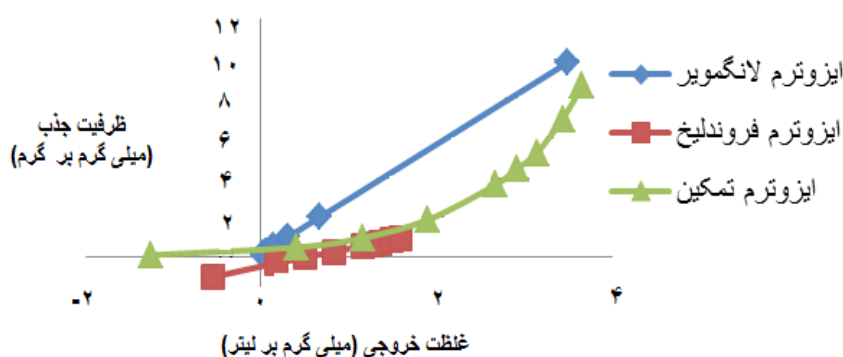
$$q_e = \frac{Q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad \text{معادله مدل Langmuir}$$

$$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad \text{معادله مدل Freundlich}$$

$$q_e = \ln(K_T C_e) \quad \text{معادله مدل Temkin}$$

جدول ۳: پارامترهای محاسبه شده برای مدل‌های ایزوترم

Temkin			Freundlich			Langmuir			پارامتر
R^2	Kt	B1	R^2	Kf (لیتر بر میلی گرم)	n	R^2	RI	k_1 (لیتر بر میلی گرم)	Qm (میلی گرم بر گرم)
۰/۷۸۳۲	۱/۲۲	۱/۶۳۲	۰/۹۹۹۳	۱/۶۱۵	۱/۱۲۰	۰/۹۹۹۸	۰/۲۳	۰/۰۳۲۳	۱۱/۰۸۶



نمودار ۵: نمایش ایزوترم مدل‌های Langmuir، Freundlich و Temkin برای جذب سطحی آلومینیوم با جاذب سرباره اصلاح شده شرکت فولاد خوزستان

جدول ۴: پارامترهای محاسبه شده برای مدل‌های سینتیک جذب

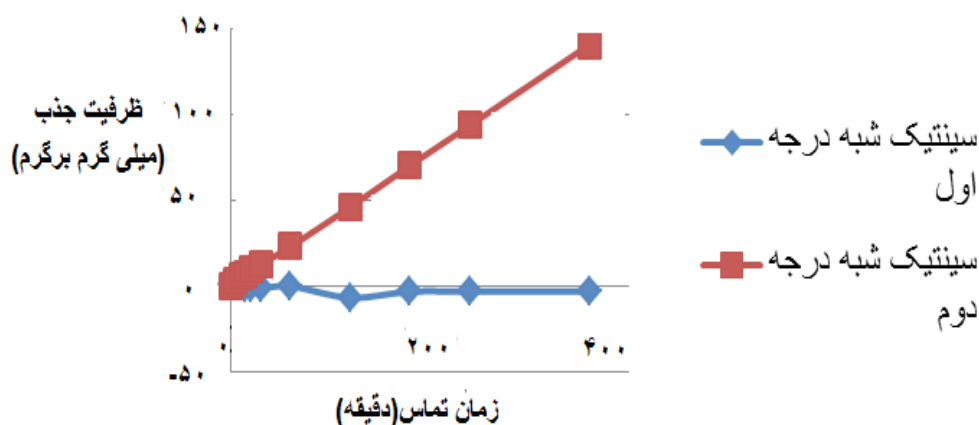
شبه درجه دوم		شبه درجه اول		تجربی		مدل
R^2	q_e (میلی گرم بر گرم)	R^2	q_e (میلی گرم بر گرم)	k_1 (لیتر بر دقیقه)	q_e (میلی گرم بر گرم)	پارامتر
۰/۹۹	۲/۵۸	۰/۹۰	۱/۷۶	۰/۰۷۰۴	۲/۵۹۹	آلومینیوم

تعیین زمان تماس بهینه، پیش‌بینی سرعت فرآیند جذب است که توسط سینتیک سیستم کنترل می‌گردد. داده‌های حاصل با استفاده از مدل شبه درجه اول و شبه درجه دوم برای تعیین سینتیک واکنش بررسی شد (جدول ۴). برای این منظور آزمایش‌ها در غلظت اولیه ۲۰ میلی گرم در لیتر، زمان تماس ۵ تا ۳۶۰ دقیقه، جرم جاذب ۵ گرم و pH برابر ۴ انجام شد و نتایج حاصل نشان داد که

است که با توجه به داده‌های به دست آمده در جدول ۳ می‌توان نتیجه گرفت که جذب سطحی از ایزوترم Langmuir تبعیت می‌کند.

سینتیک‌های جذب سطحی

یکی از مهم‌ترین عوامل برای طراحی سیستم جذب (به منظور



نمودار ۶: تجزیه و تحلیل سینتیک جذب آلومینیوم به وسیله سرباره اصلاح شده فولاد با استفاده از معادلات سرعت شبه درجه اول و دوم

روابط خطی شبه درجه از جذب سینتیک شبه درجه دوم تبعیت می کند (نمودار ۶).

بحث و نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از مطالعه نشان داد، با بیشتر شدن زمان تماس، بازدهی حذف آلومینیوم افزایش یافته؛ ولی در زمان تماس ۶۰ دقیقه تقریباً بازدهی حذف به تعادل رسیده و با سرعت کمتری افزایش یافته است. این امر ناشی از فرصت بیشتر تماس یون آلومینیوم با سطح جاذب می باشد. Liu و همکاران، از سرباره فولاد به عنوان جاذب یون های فلزات سنگین، سرب، کادمیوم، مس، نیکل و کروم سه ظرفیتی از محلول های مایع استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان داد، در فلز کروم سه ظرفیتی با افزایش زمان تماس، بهره وری حذف فلز نیز افزایش یافت و در زمان تماس ۶۰ دقیقه بازدهی حذف به تعادل رسید [۲۰].

نتایج به دست آمده از مطالعه نشان داد که بهره وری جذب آلومینیوم با افزایش pH از یک روند افزایشی برخوردار بوده است؛ به طوری که بیشترین میزان حذف در pH برابر ۴، حاصل گردید.

دلیل کمتر بودن بهره وری در pH های بالاتر، این است که در این شرایط، به علت یونیزاسیون در سطح جاذب، یک لایه بار منفی، روی جاذب قرار می گیرد و یک نیروی دافعه الکتروستاتیک بین جاذب و یون آلومینیوم به وجود می آید. در نتیجه بهره وری حذف آلومینیوم کاهش می یابد. در مطالعه Xiong و همکاران در مورد حذف فسفر از محلول های آبی توسط سرباره فولاد نیز، pH برابر ۴، به عنوان pH بهینه در نظر گرفته شد [۲۱].

دوز جاذب از پارامترهای دیگری است که در آزمایش های جذب مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج حاصل از مطالعه نشان داد با افزایش دوز جاذب، بازدهی حذف آلومینیوم افزایش می یابد و در دوز ۵ گرم در لیتر میزان درصد حذف تقریباً ثابت می شود؛ بنابراین این دوز به عنوان دوز بهینه در نظر گرفته شد. دلیل این موضوع، بیشتر شدن مکان های جذب در دسترس برای حذف فلز آلومینیوم روی سطح جاذب است. Duan و همکاران، مطالعه ای در مورد حذف یون های کادمیوم از محلول های آبی توسط سرباره اصلاح شده فولاد انجام دادند. نتایج مطالعه نشان داد با افزایش جرم جاذب از ۵ گرم به ۲۰ گرم در ۱۰۰ میلی لیتر، بهره وری جذب افزایش می یابد و در دوز ۱۰ گرم در لیتر میزان

حذف تقریباً ثابت می ماند [۱۲].

براساس نتایج این پژوهش، با کاهش غلظت اولیه آلومینیوم، بازدهی حذف افزایش می یابد؛ به طوری که بازده حذف در غلظت ۱ میلی گرم بر لیتر به ۷۱/۳۵۸ درصد می رسد. دلیل کاهش بهره وری حذف در غلظت های بالا، اشباع شدن مکان های فعال جذب قرار گرفته روی سطح جاذب توسط آلاینده است. Sheng و همکاران طی مطالعه خود جذب یون های سرب را روی سرباره فولاد مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد با کاهش غلظت اولیه سرب، بازدهی حذف افزایش می یابد [۲۲].

براساس نتایج مطالعه حاضر، جذب یون های آلومینیوم توسط سرباره فولاد از مدل ایزوترم Langmuir با ضریب همبستگی ۹۹/۹۸ درصد پیروی می کند. Kim و همکاران، در مطالعه ای که به بررسی حذف مس از محلول های آبی توسط سرباره فولاد پرداختند به این نتیجه رسیدند که داده های جذب از مدل Langmuir تبعیت می نماید [۱۱]. Zahar و همکاران نیز در مطالعه خود که بررسی حذف منگنز از محلول های آبی بود به نتایج مشابهی از داده های جذب دست یافتند که تابع مدل Langmuir بود [۲۳].

مطابق با نتایج به دست آمده، سینتیک جذب آلومینیوم توسط سرباره اصلاح شده فولاد با مدل شبه درجه دوم با ضریب همبستگی ۹۹ درصد بهتر توصیف شده و نشان دهنده این است که عمل جذب در مکان های ناهمگن روی جاذب انجام می گیرد. Yusuf و همکاران، مطالعه ای در مورد حذف یون های نیکل از محلول های آبی توسط سرباره قوس الکتریکی انجام دادند و داده ها با مدل شبه درجه دوم با ضریب همبستگی ۹۹/۶ درصد همخوانی داشت [۲۴].

روش های متداول حذف آلومینیوم از محیط آبی شامل: تعویض یون، جذب و فرآیندهای غشایی می شوند و از روش های گران قیمت و با صرف هزینه سرمایه گذاری و بهره برداری بالا محسوب می شوند. بدین ترتیب برای حذف مؤثر فلزات از آب و فاضلاب، نیاز مبرمی به توسعه روشی جدید، ارزان قیمت و

اقتصادی وجود دارد. برای رفع این نیاز در سال های اخیر مطالعات در زمینه جذب به وسیله جاذب های ارزان قیمت شدت گرفته است. در این مطالعه از سرباره که یکی از زائدات صنعت فولاد به شمار می رود به عنوان جاذب استفاده شد. برای افزایش سطح ویژه سرباره، عملیات اسیدشویی به منظور اصلاح آن، صورت گرفت. سرباره اصلاح شده فولاد خصوصیات حذف مناسب برای یون فلز آلومینیوم را دارا می باشد و با داشتن ترکیبات شیمیایی که دارای خاصیت قلیایی بالایی است، توانسته گزینه مناسبی برای جذب فلز آلومینیوم باشد. این مطالعه تجربی در مقیاس آزمایشگاهی به منظور بررسی و حذف آلومینیوم از محلول آبی توسط سرباره اصلاح شده فولاد در سیستم جریان ناپیوسته صورت گرفت. در مطالعه حاضر متغیرهای آزمایش از جمله: pH، جرم جاذب، غلظت اولیه آلومینیوم و زمان واکنش، بررسی شد. نتایج نشان داد که کارایی حذف آلومینیوم روی سرباره اصلاح شده فولاد، به پارامترهای pH، جرم جاذب، غلظت اولیه فلز و زمان واکنش وابسته است. pH بهینه برای حذف آلومینیوم برابر ۴ بود. کارایی حذف با بیشتر شدن دوز جاذب و زمان تماس، افزایش یافت و با افزایش غلظت اولیه، کارایی حذف کم شد؛ در حالی که ظرفیت جذب با افزایش غلظت اولیه، افزایش یافت. بهره وری بهینه حذف در pH برابر ۴، دوز جاذب ۵ گرم در لیتر، غلظت اولیه فلز ۲۰ میلی گرم در لیتر و زمان تماس ۶۰ دقیقه به دست آمد. ایزوترم جذب آلومینیوم با سرباره اصلاح شده فولاد از مدل Langmuir تبعیت بهتری داشت. تجزیه و تحلیل سینتیک جذب آلومینیوم با استفاده از معادلات سرعت شبه درجه اول و دوم، تبعیت جذب این فلز را از مدل سینتیک شبه درجه دوم نشان داد؛ بنابراین سرباره اصلاح شده فولاد، می تواند به عنوان جاذب ارزان قیمت برای حذف فلزات، مورد استفاده قرار گیرد.

قدردانی

نویسندگان این مطالعه از کمیته تحقیقات دانشجویی،

بهداشتی- درمانی اهواز، برای حمایت‌های مالی طرح، تشکر و قدردانی ویژه می‌نمایند.

کارشناسان محترم آزمایشگاه شیمی دانشکده بهداشت و همچنین معاونت محترم پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی و خدمات

References

1. Mahvi AH, Naghipour D, Vaezi F, Nazmara S. Teawaste as an adsorbent for heavy metal removal from industrial wastewaters. *J Appl Sci* 2005; 2:372-5 (Persian)
2. Kadirvelu K, Thamaraiselvi K, Namasivayam C. Removal of heavy metals from industrial wastewaters by adsorption onto activated carbon prepared from an agricultural solid waste. *Bioresour Technol* 2001; 76(1):63-5.
3. Miri M, Ghaneyan MT, Shahriari A, Fallahzaeh RA. Effectiveness of rosewater waste in de-colorization of reactive blue 19 from synthetic textile wastewater. *J Health Res Community* 2016; 1(4):28-36.
4. Soni MG, White SM, Flamm WG, Burdock GA. Safety evaluation of dietary aluminum. *Regul Toxicol Pharmacol* 2001; 33(1):66-79.
5. Meiri H, Banin E, Roll M, Rousseau A. Toxic effects of aluminum on nerve cells and synaptic transmission. *Prog Neurobiol* 1993; 40(1):89-121.
6. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality. Geneva: World Health Organization; 2006.
7. Mohammadi M, Fotovat A, Haghiya G. Efficiency of sand-soil-organic matter filter, the removal of heavy metals copper, nickel, zinc and chromium from industrial wastewater. *J Soil Water* 2009; 262:23-51 (Persian).
8. Bina B, Abtahi M, Vahiddasjerdi M. The use of sawdust in the removal of heavy metals from industrial wastewater. *J Res Med Sci* 2003; 8(2):19-22 (Persian).
9. Gholami M. Evaluation of waste management, manufacturing industries, from an environmental standpoint (case study: Savojbolagh city Alborz Province). *J Health Res Community* 2016; 2(1):1-11 (Persian).
10. Malarvizhi T, Santhi T, Manonmani S. A comparative study of modified lignite fly ash for the adsorption of nickel from aqueous solution by column and batch mode study. *Res J Chem Sci* 2013; 3(2):44-53.
11. El-Shafey EI. Removal of Zn (II) and Hg (II) from aqueous solution on a carbonaceous sorbent chemically prepared from rice husk. *J Hazard Mater* 2010; 175(1):319-27.
12. Duan J, Su B. Removal characteristics of Cd (II) from acidic aqueous solution by modified steel-making slag. *Chem Eng J* 2014; 246:160-7.
13. Kim DH, Shin MC, Choi HD, Seo CI, Baek K. Removal mechanisms of copper using steel-making slag: adsorption and precipitation. *Desalination* 2008; 223(1):283-9.
14. Xue Y, Wu S, Zhou M. Adsorption characterization of Cu (II) from aqueous solution onto basic oxygen furnace slag. *Chem Eng J* 2013; 231:355-64.
15. Demotica JS, Amparado Jr RF, Malaluan RM, Demayo CG. Characterization and leaching assessment of ferronickel slag from a smelting plant in Iligan City, Philippines. *Int J Environ Sci Dev* 2012; 3(5):470-4.
16. Navarro C, Díaz M, Villa-García MA. Physico-chemical characterization of steel slag. Study of its behavior under simulated environmental conditions. *Environ Sci Technol* 2010; 44(14):5383-8.
17. Kaghazchy T, Adadi Yeganeh M. Investigation of raw material on activated carbon properties. Proceedings of the Ninth National Congress of Chemical Engineering, Tehran, Iran; Feb 3-5, 2004.
18. Bhattacharya AK, Naiya TK, Mandal SN, Das SK. Adsorption, kinetics and equilibrium studies on removal of Cr (VI) from aqueous solutions using different low-cost adsorbents. *Chem Eng J* 2008; 137(3):529-41.
19. Dehghani MH, Mahvi AH, Rastkari N, Saeedi R, Nazmara S, Iravani E. Adsorption of bisphenol A (BPA) from aqueous solutions by carbon nanotubes: kinetic and equilibrium studies. *Desalination Water Treat* 2015; 54(1):84-92.
20. Liu SY, Gao J, Qu B, Yang Y. Adsorption behaviors of heavy metal ions by steel slag-an industrial solid waste. *Bioinformatics and Biomedical Engineering. Proceeding of 3rd International Conference on*; 2009.
21. Xiong J, He Z, Mahmood Q, Liu D, Yang X, Islam E. Phosphate removal from solution using steel slag

- through magnetic separation. J Hazard Mater 2008; 152(1):211-5.
22. Sheng YU, Gao J, Yang YJ, Yang YC, Ye ZX. Adsorption intrinsic kinetics and isotherms of lead ions on steel slag. J Hazard Mater 2010; 173(1-3):558-62.
23. Zahar MS, Kusin FM, Muhammad SN. Adsorption of manganese in a queous solution by steel slag. Proc Environ Sci 2015; 30:145-50.
24. Yusuf M, Luqman Chuah A, Mohammed MA, Shitu A. Investigations of nickel (II) removal from aqueous effluents using electric arc furnace slag. Res J Chem Sci 2013; 3(12):29-37.