



حذف نیکل از آب خنک کننده مصنوعی نیروگاه اتمی با استفاده از نانوذرات آهن اکسید

نویسندگان: محمدحسن احرامپوش* محمدحسین سلمانی ندوشن** محدثه ابویان جهرمی*** حمیدرضا

زارع**** محمدتقی قانعیان***** محسن عسکرشاهی***** مهري سازواری*****

*استاد گروه بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی شهید صدوقی یزد

**مربی گروه بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی شهید صدوقی یزد

***نویسنده مسئول: دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی

شهید صدوقی یزد، تلفن: ۰۹۱۷۱۹۴۰۴۰۸ - Email: mohaddesehabooean791@gmail.com

****دانشیار گروه شیمی، دانشگاه یزد

*****استادیار گروه بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی شهید صدوقی یزد

*****عضو هیئت علمی گروه آمار و اپیدمیولوژی، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی شهید صدوقی یزد

*****دانشجوی کارشناسی مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی شهید صدوقی یزد

چکیده

سابقه و اهداف: خنک کننده اولیه یک بستر خنک کنندگی ضروری برای کنترل حرارت در نیروگاه‌های هسته‌ای است. در طی فرآیند اکسیداسیون، نیکل می‌تواند در خنک کننده اولیه آزاد شود که آلودگی آنرا افزایش می‌دهد. مشکلات بهره‌برداری و هزینه بالای تصفیه آب خنک کننده در روش‌های موجود، تحقیقات برای روش‌های جدیدتر را ضروری می‌سازد. هدف از انجام این تحقیق بررسی حذف Ni(II) از محیط حقیقی آب خنک کننده مصنوعی نیروگاه اتمی با استفاده از نانوذرات آهن اکسید و پارامترهای موثر بر آن می‌باشد.

روش بررسی: در این پژوهش نانوذرات آهن صفر ظرفیتی به نانوذرات آهن اکسید تبدیل شد و کارایی حذف آن برای یون Ni(II) در آب خنک کننده مصنوعی ناپیوسته مورد مطالعه قرار گرفت. هم‌چنین تاثیر عوامل موثر در فرآیند حذف شامل غلظت نانوذرات آهن اکسید، pH محلول و زمان تماس بررسی و ایزوترم جذب و مدل سینتیکی واکنش معین گردید.

یافته‌ها: تصاویر STM نشان داد که اندازه ذرات نانو ذرات اکسید آهن کمتر از ۴۰ nm می‌باشد. در pH اولیه محلول و $t = 4\text{ h}$ حذف تقریباً کامل یون نیکل در غلظت ۴۰ g/L جاذب بدست آمد. در $C = 1\text{ g/L}$ جاذب و $t = 4\text{ h}$ ، بیشترین راندمان حذف در $\text{pH} = 10$ بود. جذب نیکل بر نانوذرات آهن اکسید در $C = 35\text{ g/L}$ جاذب و $\text{pH} = 2/71$ از ایزوترم لانگمیر تبعیت می‌کرد و سینتیک واکنش شبه درجه دوم بود.

نتیجه‌گیری: نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش pH در محیط قلیایی راندمان حذف افزایش می‌یابد. زیرا وقتی که pH محلول بالای نقطه ایزوالکتریک باشد، سطح اکسید به طور منفی شارژ می‌شود و می‌تواند با کاتیون‌ها (مثلاً یون‌های فلزی) تشکیل کمپلکس‌های سطحی دهد. با اعمال شرایط بهینه نانو ذرات آهن اکسید توانایی خالص سازی آب خنک کننده را دارد.

واژه‌های کلیدی: نیکل، نانوذرات آهن اکسید، آب خنک کننده مصنوعی نیروگاه اتمی

این مقاله حاصل از پایان نامه کارشناسی ارشد بهداشت محیط مصوب دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی شهید صدوقی یزد می‌باشد.

طلوع بهداشت

فصلنامه علمی پژوهشی

دانشکده بهداشت یزد

سال یازدهم

شماره: اول

بهار ۱۳۹۱

شماره مسلسل: ۳۴

تاریخ وصول: ۱۳۹۰/۶/۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۰/۱۹



مقدمه

خنک کننده اولیه یک بستر خنک کننده ضروری برای کنترل حرارت در نیروگاه های اتمی است. معمول ترین خنک کننده اولیه آب خیلی خالص است. در طی بهره برداری از نیروگاه هسته ای، محصولات مختلفی از سطوح داخلی لوله ها و ژنراتور بخار تحت فشار و دمای بالا بر اثر فرآیند خوردگی تولید می شوند.

انواع خوردگی با جریان نوترون در مرکز راکتور فعال می شود و فرم های متنوع رادیونوکلئید تولید می شود. در بین فرم های متنوع رادیونوکلئیدها ^{60}Co ، ^{58}Co ، ^{63}Ni و ^{55}Fe به عنوان گونه های اصلی که به سرعت آزاد می شوند، شناخته شده اند و باعث افزایش اکتیویته، آلودگی سیستم خنک کننده اولیه و در معرض قرارگیری تشعشعات شغلی می شود. بنابراین آلودگی زدایی سیستم از طریق کاهش سطح تشعشعات یک وظیفه مهم در یک نیروگاه اتمی است.

برای دستیابی به این هدف، روش های متنوع فیزیکوشیمیایی مثل فیلتراسیون و تبادل یون به کار گرفته شده است. در یک نیروگاه اتمی نوع تحت فشار پروسه فرآیند فیلتر کارتریج-تبادل یون (IX) برای حذف محصولات خوردگی به علت سادگی و آسان بودن به طور وسیع در حال استفاده ولی یک فرآیند جایگزین برای حذف محصولات خوردگی مورد نیاز است (۱).

اندازه ذره یک ویژگی نسبتاً مهم ذرات در جذب و واکنش با آلاینده هاست، به عبارت دیگر هرچه اندازه ذره کمتر و سطح مقطع ذره بیشتر شود میزان واکنش پذیری ذرات افزایش می یابد (۲). وقتی که nZVI در معرض اکسیژن قرار می گیرد، توسعه

لایه اکسید آهن ایجاد می شود و به ساختار هسته- پوسته نانو ذرات آهن منجر می شود که در آن هسته از طبیعت Fe^0 حفاظت می کند در حالی که پوسته دارای اکسیدهای آهن می باشد (FeOH ، Fe_3O_4 و Fe_2O_3). پوسته اکسیدی آهن به مقدار زیادی بی شکل است. نانوذرات آهن که حدود ۶ ماه ذخیره شده بوده، شکل شبه زنجیره با ضخامت لایه اکسید nm ۱۰-۵ را حفظ می کنند. هر چند نواحی که در آن گاهی اوقات اکسیداسیون های حجیم اتفاق می افتد به یک شکل متفاوت منجر می شود و ضخامت لایه اکسید در نانو ذرات با ساختار هسته- پوسته بزرگتر از nm ۱۰ می باشد (۳). در مطالعات مشابه حذف Ni(II) از محلول حاوی Ni(II) تنها با استفاده از نانوذرات آهن اکسید (۴) یا حذف Ni(II) از آب خنک کننده مصنوعی با استفاده از رزین های تبادل یون و لیف نارگیل انجام شده است (۵ و ۶). هدف از انجام این تحقیق بررسی حذف Ni(II) از محیط حقیقی آب خنک کننده مصنوعی نیروگاه اتمی با استفاده از نانو ذرات آهن اکسید و پارامترهای موثر بر آن می باشد.

روش بررسی

این مطالعه تجربی است و تمام آزمایشات در آزمایشگاه تحقیقات پیشرفته دانشکده بهداشت انجام شد. آب خنک کننده مصنوعی با بررسی مقالات در آزمایشگاه از مخلوط کردن نمک کاتیونهای مورد نظر تهیه شد (۷). یکی از روش های تولید نانوذرات آهن اکسید قراردادن nZVI در معرض اکسیژن فوق خالص است (۴). خصوصیات نانوذرات آهن صفر ظرفیتی مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.



جدول ۱: خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نانوذرات آهن صفر ظرفیتی

نام تجاری: FfeN-20			
	O	ناخالصی	Fe
اجزای شیمیایی %	(استاندارد چین ۹) ۰/۱ <	(استاندارد بین المللی ۰/۴) ۰/۳ <	اضافی
خصوصیات فیزیکی	میانگین اندازه ذرات nm/	مساحت سطحی مخصوص / (m ² /g)	چگالی توده / (g/m ³)
	< ۳۰	> ۲۰	۰/۰۴ ~ ۵

بخش رویی محلول با اسید نیتریک غلیظ ۱٪ حجمی تثبیت شد. غلظت Ni(II) در مایع فیلتر شده به وسیله دستگاه طیف‌سنجی جذب اتمی اندازه‌گیری گردید. به منظور اطمینان از نتایج دستگاه جذب اتمی برای سه بار تکرار تنظیم و از میانگین غلظت‌ها استفاده گردید. برای مشخص نمودن اندازه ذرات نانو از میکروسکوپ روبشی تونلی (STM) مدل SS₂ ساخت ایران استفاده گردید.

یافته‌ها

نتایج حاصل از کارایی حذف نانو ذرات آهن اکسید در متغیرهای اشاره شده در شکل‌های ۱ تا ۴ و جدول ۲ آورده شده است. شکل تصاویر حاصل از اندازه‌گیری ابعاد نانو ذرات آهن اکسید را نشان می‌دهد.

تصاویر STM نشان داد که اندازه ذرات کمتر از ۴۰ nm و در مقیاس نانو می‌باشد. نتایج حاصل از فرآیند در غلظت‌های (۱، ۱۰، ۱۵، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ g/L) نانو ذرات آهن اکسید در pH اولیه محلول (۲/۷)، زمان ۴ h، غلظت اولیه نیکل در آب خنک-کننده (۱۵ mg/L) و دمای آزمایشگاه در شکل ۲ ارائه شده

در این پژوهش نانوذرات آهن اکسید از طریق قرار دادن نانوذرات آهن صفر در معرض هوا ایجاد که در نتیجه آن جرقه و حرارت تولید شد. پس از سرد شدن ذرات به هم چسبیده و سفت شدند که به منظور یکنواخت شدن در هاون چینی ساییده شدند. بعد از تولید نانوذرات راندمان این نانوذرات در حذف Ni(II) از محیط مصنوعی آب خنک‌کننده نیروگاه اتمی مورد بررسی قرار گرفت. برای تعیین راندمان حذف از رابطه زیر

$$R(\%) = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 \text{ استفاده شد.}$$

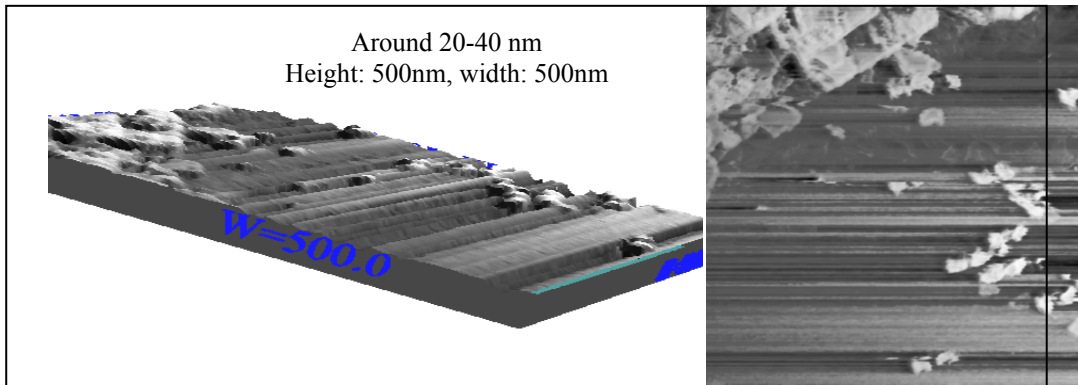
در این فرمول، R راندمان حذف نیکل (بر حسب درصد) در هر زمان، C₀ غلظت اولیه نیکل در آب خنک‌کننده و C غلظت باقیمانده در هر زمان می‌باشد

آزمایش‌ها با تغییر فاکتورهای غلظت نانوذرات آهن اکسید به میزان (۱، ۱۰، ۱۵، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ g/L)، pH (۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰) و زمان اختلاط (۱۰ min، ۳۰ min، ۱ h، ۴ h، ۸ h و ۲۴ h) تکرار شد. با توجه به داده‌های بدست آمده، ایزوترم جذب و سنتیک واکنش نیز محاسبه شد. همه آزمایش‌ها در حالت ناپیوسته در ارزن با حجم ۲۵۰ mL انجام شد. بعد از تکمیل واکنش سوسپانسیون سانتریفیوژ (۳۵۰۰ rpm) شد و

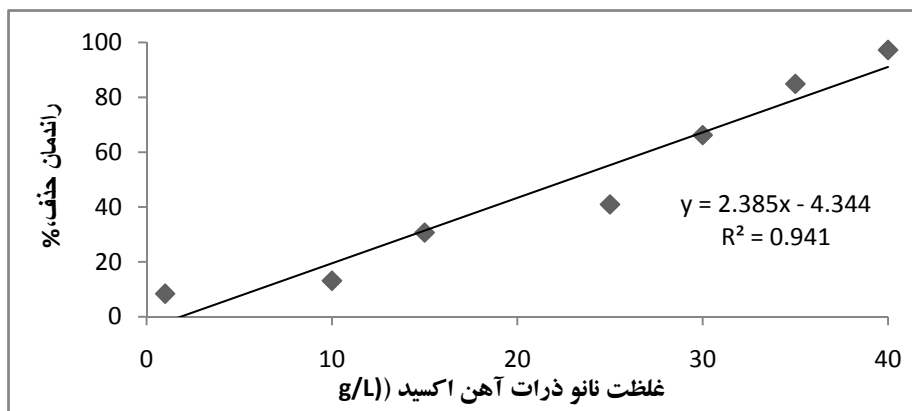


بررسی داده‌های آزمایشگاهی با دو مدل لانگمیر و فروندلیچ و مقایسه ضرایب هم‌بستگی آن‌ها نشان داد که جذب نیکل بر نانو ذرات آهن اکسید در $C = 35 \text{ g/L}$ جاذب و $\text{pH} = 2/71$ از ایزوترم لانگمیر تبعیت می‌کند و ضریب هم‌بستگی (R_2) معادل $0/872$ می‌باشد (شکل ۴). حداکثر جذب نیکل از آب خنک-کننده مصنوعی معادل $0/12 \text{ mg/g}$ و ضریب ثابت لانگمیر (b) نیز بر اساس محاسبات انجام شده معادل $(-0/96) \text{ L/mg}$ بود. مدل سینتیکی جذب را با بکاربردن معادلات سینتیک درجه ۱ و درجه ۲ مورد بررسی قرار دادیم. در $C = 35 \text{ g/L}$ جاذب، $\text{pH} = 2/71$ و زمان‌های مختلف، q_e محاسبه شده و q_e تجربی بر هم منطبق بود و مویید این مطلب بود که سینتیک واکنش شبه درجه دوم است (جدول ۲).

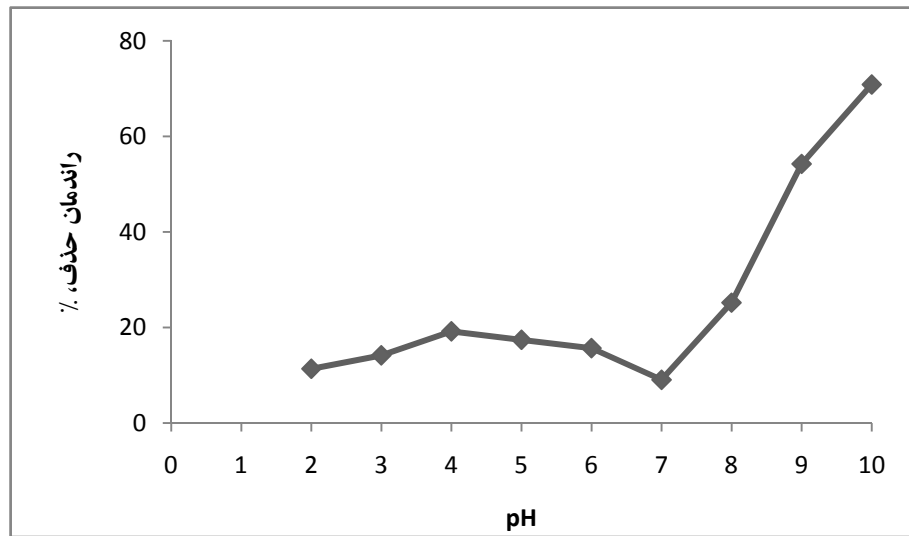
است. در شرایط ذکر شده حذف تقریباً کامل ($97/3\%$) یون نیکل در غلظت 40 g/L جاذب بدست آمد و در غلظت 1 g/L جاذب، راندمان حذف $8/4\%$ نبود. از آنجایی که با افزایش pH ، در اثر فرآیند رسوب مقداری از فلزات حذف می‌شود، بنابراین قبل از اضافه کردن جاذب، یون نیکل اندازه‌گیری شد تا مقدار حذف شده به تشکیل رسوب نسبت داده نشود. در pH بیشتر از 10 تقریباً کل نیکل (15 mg/L) رسوب کرد و بنابراین تاثیر نانو ذرات آهن در pH 10 و کمتر بررسی شد. همان طور که شکل ۴ نشان می‌دهد بیشترین راندمان حذف (71%) در $\text{pH} = 10$ (قلیایی)، کمترین راندمان حذف (9%) در $\text{pH} = 7$ (خنثی) و در $\text{pH} = 2$ راندمان حذف 11% است.



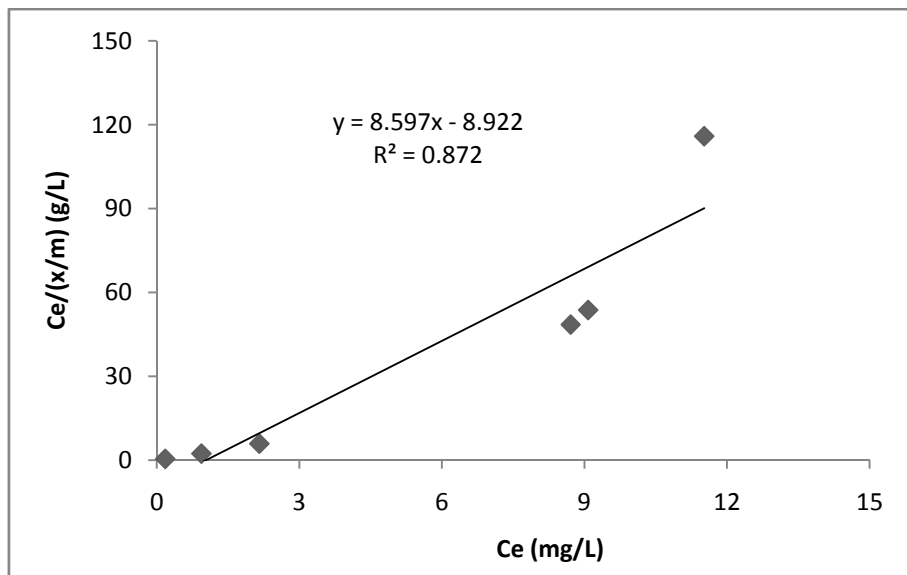
شکل ۱: تصاویر STM نانوذرات آهن اکسید



شکل ۲: تاثیر تغییرات غلظت نانوذرات آهن اکسید بر کارایی حذف نیکل از آب خنک کننده مصنوعی نیروگاه اتمی ($t = 4 \text{ h}$ و $\text{pH} = 2/71$)



شکل ۳: تاثیر تغییرات pH بر کارایی حذف نیکل از آب خنک کننده مصنوعی نیروگاه اتمی با استفاده از نانو ذرات آهن اکسید (C = ۱ g/L جاذب و t = ۴ h)



شکل ۴: ایزوترم جذب لانگمیر در حذف نیکل در pH = ۲/۷ و C = ۳۵ g/L جاذب

جدول ۲: ثابت سرعت جذب، q_e محاسبه شده و ضریب همبستگی مرتبط با مدل شبه درجه دوم در آب خنک کننده مصنوعی نیروگاه اتمی در C = ۳۵ g/L جاذب و pH = ۲/۷

$K_{2,ads}$	q_e (mg/g) Exp.	q_e (mg/g) Cal.	R_2
۰/۰۴	۰/۴۴	۰/۳۶	۰/۹۹۸



بحث و نتیجه گیری

بررسی مقالات نشان می دهد که ترکیب دقیق پوسته اکسیدی به پروسه های ساخت و هم چنین شرایط محیطی بستگی دارد. برای مثال، پوسته نانو ذرات $\alpha\text{-Fe}$ که با صدای شبه انفجار تولید می شود یا حاوی مگمایت ($\delta\text{-Fe}_2\text{O}_3$) است یا مگنتیت که بخشی از آن اکسید شده است (Fe_3O_4) (۴).

از طرف دیگر اگر Fe_3O_4 در هوا برای ۵h در 250°C حرارت داده شود، رنگ آن از سیاه به قهوه ای-قرمز تغییر می کند و نشان می دهد که Fe_3O_4 به $\delta\text{-Fe}_2\text{O}_3$ تغییر شکل داده است (۸). با توجه به پروسه ساخت (صدای شبه انفجار) و رنگ محصول (قهوه ای-قرمز) فرمول نانوذرات آهن، $\delta\text{-Fe}_2\text{O}_3$ و با توجه به تصاویر STM اندازه نانوذرات کمتر از ۴۰ nm می باشد.

مقدار جاذب یک پارامتر مهم در تعیین توانایی جاذب است. مطابق با نتایج افزایش غلظت نانوذرات آهن، باعث افزایش راندمان حذف می شود. وقتی که مقدار جاذب افزایش می یابد مکان های دردسترس برای یون نیکل نیز افزایش می یابد و در نتیجه جاذب بهتری اتفاق می افتد. مطالعات انجام شده توسط نوروزی و همکاران نیز نشان داد که با افزایش غلظت نانوذرات کارایی حذف کروم افزایش می یابد (۲).

بیشترین کارایی حذف در pH قلیایی صورت گرفت، به عبارت دیگر با افزایش pH در محیط قلیایی راندمان حذف افزایش می یابد. زیرا وقتی که pH محلول بالای نقطه ایزوالکتریک باشد، سطح اکسید به طور منفی شارژ می شود و می تواند با کاتیون ها (مثل یون های فلزی) تشکیل کمپلکس های سطحی دهد. در pH پایین، اکسیدهای آهن به طور مثبت شارژ می شود و به لیگاندها

جذب می شود (برای مثال فسفات). معقول است که فرض کنیم خصوصیات اتصال سطحی و جذب مشابه با اکسیدها/ هیدروکسیدهای فلزی کلاسیک می باشد. مطالعه Xiao-qin Li نشان داد که توانایی حذف هر ۲ نوع نانو ذرات nZVI و نانو ذرات آهن اکسید با افزایش pH افزایش می یابد (۴) و با این مطالعه مطابقت دارد. جذب نیکل بر روی نانوذرات آهن اکسید در شرایط اشاره شده در قسمت نتایج از ایزوترم لانگمیر تبعیت می کند. بر طبق مطالعه Liang-Shu Zhong اطلاعات آزمایش برای Cr(VI) و As(V) به خوبی با ایزوترم جذب لانگمیر متناسب است (۸). به عبارت دیگر مدل ایزوترم جذب با این مطالعه یکسان می باشد. در مطالعه P. Panneerselvam نیز اطلاعات تجربی از هر دو مدل ایزوترم لانگمیر و فروندلیچ تبعیت می کند (۹). ضریب هم بستگی برای مدل سینتیکی درجه دوم تقریباً معادل ۱ بود و مطابق با جدول ۳ اعداد تنوری q_e به خوبی با اعداد تجربی هم خوانی داشت. این به آن معناست که جذب نیکل از مدل سینتیکی درجه دوم تبعیت می کند و K_2 در $C = 35 \text{ g/L}$ جاذب و $\text{pH} = 2/71$ ، $\text{pH} = 0/04 \text{ g/mg min}$ است. ولی مطالعه P. Panneerselvam و همکاران نشان داد که جذب نیکل در محلول ها با استفاده از $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-TW}$ از درجه اول تبعیت می کند و K_1 ، $\text{min}^{-1} * 10^{-2} * 1/9$ می باشد (۹). نانوذرات آهن اکسید در شرایط بهینه دارای توانایی بالایی در حذف نیکل از آب خنک کننده مصنوعی نیروگاه اتمی می باشد و پیش بینی می شود از این نانو ذرات در مقیاس وسیع جهت حذف محدوده گسترده ای از آلاینده ها از آب و آب خنک کننده به کار گرفته شود.



تقدیر و تشکر

پژوهش یاری نموده‌اند تشکر و قدردانی نمایند، لازم به ذکر

است این مقاله حاصل از پایان‌نامه دانشجویی می‌باشد.

نویسندگان لازم می‌دانند از کسانی که ما را در انجام این

References

- 1- Song JH, Song MC, Yeon KH, et al. Purification of a primary coolant in a nuclear power plant using a magnetic filter - electrodeionization hybrid separation system. J. Radioanal. Nucl. Chem 2004; 262(3): 725-732.
- 2- Rahmani AR, Norozi R , Samadi MT, et al. Hexavalent Chromium Removal from Aqueous Solution by Produced Iron Nanoparticles. Iran. J. Health & Environ 2009; 1(2): 67-74. [Persian]
- 3- Nazlı E. Characterization of the adsorption behaviour of aqueous Cd(II) and Ni(II) ions on nanoparticles of zero_valent iron.[MS.c Thesis]. Izmir Institute of Technology İZMİR. 2008.
- 4- Li Xq, Zhang Wx. Sequestration of Metal Cations with Zerovalent Iron Nanoparticles -A Study with High Resolution X-ray Photoelectron Spectroscopy (HR-XPS). J. Phys. Chem. C 2007; 111: 6939-6946.
- 5- Rengaraj S, Yeon KH, Moon SH. Removal of nickel from water and synthetic nuclear power plant coolant water by ion exchange resins. J. Radioanal. Nucl. Chem 2002; 253(2): 241-245.
- 6- Parab H, Joshi S, Shenoy N, et al. Determination of kinetic and equilibrium parameters of the batch adsorption of Co(II), Cr(III) and Ni(II) onto coir pith. Process biochem Biochem 2006; 41: 609-615.
- 7- Salmani MH, Ehrampoush MH, Aboueian-Jahromi M, Zare HR, ability of iron oxide nanoparticles in ion silver removal from synthetic wastewater. Tolooebehdasht 2011;10(1):62-69. [Persian]
- 8- Zhong LS, Hu JS, Liang HP, et al. Self-Assembled 3D Flowerlike Iron Oxide Nanostructures and Their Application in Water Treatment. Adv. Mater 2006; 18: 2426–2431.
- 9- Panneerselvam P, Morad N, Tan KA. P. Magnetic nanoparticle (Fe₃O₄) impregnated onto tea waste for the removal of nickel(II) from aqueous solution. J hazard mater 2011; 186(1): 160-8.



Nickel Removal from Synthetic Nuclear- Power- Plant Coolant Water by Iron Oxide Nanoparticles

Ehrampoush MH* (Ph.D) Salmani MH** (M.S) Aboueian-Jahromi M*** (MS.c) Zare HR**** (Ph.D) Ghaneian MT***** (Ph.D) Askarshahi M***** (Ph.D) Sazvari M***** (B.S)

*Associate Professor, Department of Environment Health, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences, Yazd, Iran
 ** Instructor, Department of Environmental Health, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences, Yazd, Iran
 ***MS.c Student of Environmental Health, Department of Environmental Health, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences Yazd, Iran.

****Associate Professor of Chemistry, Department of Chemistry, Yazd University, Yazd, Iran

*****Instructor, Department of Biostatistics & epidemiology, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences, Yazd, Iran

*****B.S Student of Environmental Health, Department of Environmental Health, Shahid Sadoughi University of Medical Sciences, Yazd, Iran

Abstract

Background: The primary coolant is an essential cooling medium used to control heat in a nuclear power plant. During the oxidation process, Nickel may be released in the primary coolant which increases its contamination. The operational problems and high cost of treatment necessitate the research for some newer methods. The aim of this research is investigation of nickel removal from synthetic nuclear-power-plant by using iron oxide nanoparticles and the effective parameters.

methods: In this research, zerovalent iron nanoparticles was converted to Iron oxide nanoparticles and its efficiency for Ni(II) ion removal in synthetic coolant water batch system was studied. Also the impact of effective parameters including iron oxide nanoparticles concentration, solution pH, and agitation time were investigated and adsorption isotherm and kinetic model reaction were determined.

Results: STM images indicate that the particles size is less than 40 nm. The complete removal was in primary pH of the solution, $t=4h$, and $C=40g/l$. In alkaline pH, $t=4h$, $C=1g/l$ were obtained with maximum removal. Ni(II) adsorption at adsorbent $C= 35g/L$ and $pH = 2.71$ obeys Langmuir isotherm and the kinetic reaction is pseudo-second-order.

Conclusion: The results of the study show that increasing pH in alkaline condition, heightens removal efficiency. The reason is that when the pH of the solution is above the isoelectric point, the oxide surface becomes negatively charged and can form surface complexes with cations (e.g., metal ions). In optimal condition, iron oxide nanoparticles have the potential of purifying coolant water.

Keywords: Nickel, Iron oxide nanoparticles, Synthetic nuclear-power-plant coolant water