

حذف نانوذرات نقره از پساب‌های صنعتی و شهری توسط فرآیند الکتروکواگولاسیون

رضا فرجی یایچی^۱، مهرداد منطقیان^{۲*}

۱- گروه فناوری نانو، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

نانو فناوری علمی است که توجه دانشمندان و پژوهشگران زیادی را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده‌است. کاربرد گسترده نانوذرات نقره در زندگی روزمره و صنایع مختلف از یک طرف و رها شدن این نانوذرات از طریق فاضلاب به محیط زیست از طرف دیگر، موجب توجه بیشتر محققین به نانوذرات نقره شده‌است. بنابراین، حضور نانوذرات نقره در واحدهای تصفیه فاضلاب دور از انتظار نیست. از سوی دیگر، اخیراً تکنولوژی الکتروکواگولاسیون (EC) به‌عنوان یک روش تصفیه نوین و سازگار با محیط زیست برای تصفیه انواع پساب‌های صنعتی و شهری در واحدهای تصفیه فاضلاب به کار گرفته شده‌است. بنابراین احتمال حضور نانوذرات نام برده شده در یک میدان الکتریکی در واحدهای تصفیه فاضلاب وجود دارد. رفتار نانوذرات نقره تحت میدان الکتریکی اعمال شده و تصفیه آنها از پساب‌های مختلف، بیشتر به پایدارکننده‌های آنها وابسته است. بنابراین، این تحقیق، رفتار نانوذرات نقره و پایدارکننده‌های آنها را تحت میدان الکتریکی اعمال شده، بررسی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: الکتروکواگولاسیون، پایدارکننده‌ها، پساب، نانوذرات نقره

Manteghi@modares.ac.ir : ایمیل نویسنده مسئول

۱-مقدمه

اخیراً سنتز نانوذرات نقره و مطالعه روی آنها در تحقیقات علمی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. دلیل این رشد و توجه کثیر، به خواص ویژه حاصل شده از نانو سائز کردن ذرات نقره مربوط می‌شود [۱]. در مقیاس نانو، مواد و سیستم می‌تواند خواص کاملاً جدیدی از خود نشان دهند؛ که بر روی خواص فیزیکی و شیمیایی پدیده‌ها و فرآیندها تأثیر می‌گذارد. تغییرات در خواص بسیار اساسی می‌باشد به‌طوری‌که خواص مواد در مقیاس نانو با حالت بالک ماده قابل مقایسه نمی‌باشند [۲]. خواص بی‌نظیر نانوذرات نقره موجب محبوبیت این نانوذرات در بسیاری از کاربردها نظیر نور و اپتیک، کاتالیز، ضد باکتری و غیره شده است. توجه به شکل، اندازه، میزان پراکندگی و پایداری نانوذرات برای کاربرد آنها در عرصه‌های مختلف امری مهم و اساسی می‌باشد [۳].

برخلاف مزایای بسیار نانومواد، آنها می‌توانند ویژگی‌های سمی از خود نشان داده و به‌سهولت توسط ارگانیسم‌های زنده جذب شوند. بنابراین خواص نانوذرات نیاز به مطالعه جهت شناسایی، ارزیابی، و مدیریت دارد تا خطرهای احتمالی ناشی از نانو سائز کردن ماده تشخیص و حذف گردد. پیش‌بینی‌ها بر آن است که خطرات زیست‌محیطی ناشی از نانومواد در حال ظهور، روبه - افزایش باشد. نانوذرات نقره که نقره کلئیدی نیز نامیده می‌شود، به‌دلیل خاصیت ضدباکتری آنها به مقدار زیادی در صنعت

استفاده می‌شود. در این زمینه اشاره به دو نکته در استفاده از نانوذرات نقره حائز اهمیت می‌باشد: نخست، نگرانی بر سر خطر بالقوه حضور به مقدار زیاد این نانو ذرات در محیط زیست [۲] و دیگری، خطر حضور آنها در واحدهای تصفیه فاضلاب [۴] که به-خاطر ایجاد اختلالات میکروبیولوژیکی می‌تواند منجر به کاهش راندمان تصفیه فاضلاب به‌ویژه در تصفیه بی‌هوازی شود. به‌دلیل اثرات مخرب بالقوه آنها [۵]، روش‌های تصفیه و دفع آنها جهت ثبات اکوسیستم باید مطالعه و توسعه داده شود [۲]. الکتروکواگولاسیون، یکی از روش‌های نوین تصفیه فاضلاب می‌باشد که اخیراً جایگزین روش‌های تصفیه فیزیکی و شیمیایی شده است.

اخیراً تکنولوژی الکتروکواگولاسیون به‌عنوان یک روش الکتروشیمیایی جهت تصفیه آب و فاضلاب، بسیار مورد توجه واقع شده‌است [۶، ۷]. شکل ۱ شماتیک فرآیند EC را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، این فناوری حداقل شامل یک جفت الکترود فلزی (آند و کاتد) می‌باشد که در داخل محلول مورد آنالیز فرو برده می‌شوند [۸، ۹]. تکنولوژی الکتروکواگولاسیون اساساً فرآیندی بر مبنای جریان الکتریکی می‌باشد که ذرات به‌صورت سوسپانسیون، امولسیون و یا آلودگی‌های حل شده در محلول‌های آبی را با استفاده از جریان الکتریکی مستقیم (DC) ناپایدار می‌سازد [۱۰-۱۳]. این فناوری جهت تصفیه آب‌های آلوده و پساب-

حذف می‌شود: ۱- شناور شدن لجن توسط گاز هیدروژن تولید شده در سطح الکتروکاتد، ۲- رسوب لجن در ته راکتور [۹، ۱۹، ۲۷]. لازم به ذکر است که به دلیل توقف تولید هیدروژن پس از اتمام فرآیند و همچنین افزایش دانسیته لجن در طول فرآیند، لجن شناور در نهایت رسوب می‌کند.

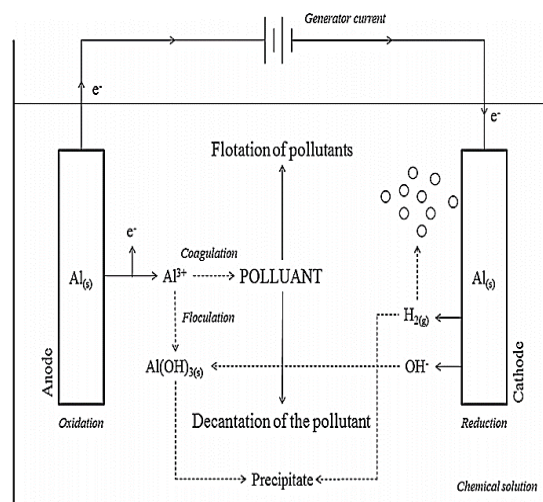
فرآیند جذب سطحی آلاینده توسط گونه‌های هیدروکسید فلزی، ترکیبی از فرآیندهای بسیار پیچیده نظیر انعقاد جاروبی^۲، ایجاد کمپلکس^۳، هم‌رسوبی و خنثی‌سازی الکتریکی می‌باشد [۷، ۳۱]. خنثی‌سازی الکتریکی ذرات دارای بار منفی، توسط کاتیون‌های تولیدشده و انعقاد ذرات توسط جاروب کردن آنها، مهم‌ترین مکانیسم‌های الکترودهای آهنی و آلومینیومی استفاده‌شده در فرآیند EC می‌باشند [۳۱، ۳۲، ۱۲]. جاذب‌ها، بار منفی ذرات پراکنده در داخل محلول را جهت تسهیل آگلومره شدن و انعقاد ذرات، خنثی می‌کنند و بدین ترتیب موجب آگلومره شدن نانوذرات و حذف آنها از داخل محلول می‌شوند [۳۴-۳۲].

علی‌رغم قابل توجه بودن تعداد تحقیقات علمی مبنی بر تصفیه پساب‌های صنعتی توسط فرآیند EC، تحقیقات بسیار اندکی درباره تصفیه پساب‌های حاوی نانوذرات نقره انجام شده‌است [۲، ۲۶]. آگلومره کردن نانوذرات و از بین بردن آنها به نوع، اندازه و پایدارکننده نانوذرات بستگی دارد. برای مثال نانوذرات اکسید سیلیسیوم (SiO_2) پوشش داده شده با توین-۲۰^۴ به راحتی توسط مکانیسم رسوب حذف می‌شوند؛ درحالی‌که نانوذرات SiO_2 بدون پوشش در پساب باقی می‌مانند [۲۵]. بنابراین، به نظر می‌رسد که مرور مطالعات اخیر پیرامون تصفیه نانوذرات نقره از پساب‌های صنعتی و شهری توسط فرآیند EC، می‌تواند موثر واقع شود.

۲- بخش تجربی

در این بخش به‌طور مختصر به روش انجام آزمایش که توسط Matias و همکارانشان [۲] انجام شده‌است، پرداخته می‌شود. در ابتدا نانوذرات نقره به ۴ روش مختلف توسط پایدارکننده‌های مختلف سیترات سدیم (روش ۱ و ۲) و سدیم پیروفسفات (روش ۳ و ۴) و احیاگرهای سیترات سدیم (روش ۱)، سدیم بورو هیدرید (روش ۲ و ۴) و دی‌گلوکز (روش ۳) سنتز شدند. غلظت مواد استفاده شده و عوامل احیاگر و پایدارکننده استفاده شده در هر روش، در جدول ۱ ارائه شده است.

های صنعتی مختلفی نظیر پساب‌های صنایع نفت و پتروشیمی [۱۴]، آب‌های آشامیدنی و زیرزمینی [۱۵]، فاضلاب‌های شهری [۱۶]، آب‌های آلوده شده با فلزات سنگین [۱۷]، کدورت [۱۸]، COD^۱ [۱۹]، رنگ‌ها [۱۱، ۱۸]، مواد ارگانیک و آلی [۲۰]، پساب صنایع نساجی [۲۱]، سختی آب [۲۲]، آنیون‌های معدنی شامل فلوراید، آرسنیک و فسفات [۲۳]، محلول‌های شامل نانوذرات سیلیکا [۲۴]، اکسید روی (ZnO) [۲۵] و نانوذرات نقره [۲، ۲۶] به کار گرفته شده‌است. کاربردهای ذکر شده برای فرآیند الکتروکواولاسیون، استقبال گسترده از این فرآیند در یک دهه اخیر را به وضوح نشان می‌دهد [۲۷]. عدم نیاز به افزودن مواد شیمیایی مکمل، سهولت در بهره‌برداری، کاهش چشمگیر لجن تولیدی [۱۲، ۲۸]، عدم تولید آلودگی ثانویه [۷، ۲۲]، قابل استفاده در مقیاس کوچک، مقرون به صرفه بودن و پایین بودن انرژی و هزینه نگهداری دستگاه [۲۳، ۲۹] از جمله ویژگی‌های مهم و بی‌نظیر فرآیند EC می‌باشند. از آنجایی‌که الکترون تنها واکنشگر شیمیایی استفاده شده در فرآیند EC می‌باشد؛ بنابراین، فرآیند مذکور به نام تکنولوژی سبز یا سازگار با محیط زیست نیز شناخته می‌شود [۱۷، ۲۱، ۲۹].



شکل ۱. شماتیک فرآیند الکتروکواولاسیون (سیستم ناپیوسته) [۲].

در فرآیند EC، برهمکنش بین منعقد کننده و آلاینده بسیار پیچیده می‌باشد. پس از اعمال میدان الکتریکی، الکترودهای آلومینیومی یا آهنی (به عنوان الکترودهای ارزان و در دسترس)، در داخل آب آلوده حل می‌شوند؛ این الکترودها به سرعت به گونه‌های پلیمری و مونومری هیدروکسید فلزی هیدرولیز می‌شوند [۱۷، ۲۱]. این گونه‌های ایجادشده، آلودگی‌های موجود در آب را جذب سطحی می‌کنند و در نتیجه ذرات معلق را ناپایدار کرده و موجب کلوخه شدن آنها می‌شوند [۱۹، ۱۱، ۶]. نیروی یونی، غلظت فلز و pH محلول، فاکتورهایی هستند که بر روی حلالیت، نوع و مقدار گونه‌های تولید شده، اثر می‌گذارند [۳۰، ۲۰، ۹]. لجن تولید شده در طول فرآیند EC به دو روش از محیط آبی

^۲ Sweep coagulation

^۳ Complexation

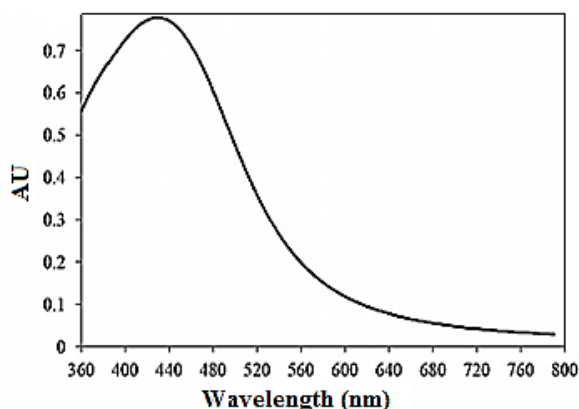
^۴ Tween-20

^۱ Chemical oxygen demand

راحتی حذف گردیدند، بنابراین، این نوع نانوذرات برای تصفیه مناسب می‌باشند [۲].

نتیجه مهم دیگر که Matias و همکارانشان به آن دست یافتند، افزایش جذب نانوذرات نقره در ابتدای فرآیند الکتروکواگولاسیون بود. مطابق شکل ۲ میزان جذب برای برخی از روش‌ها مخصوصاً روش ۱، پس از مدتی گذشت از شروع فرآیند به‌طور چشمگیری افزایش یافت. در این مطالعه، پژوهشگران، افزایش در جذب را به تولید نانوذرات جدید در طول فرآیند الکتروکواگولاسیون نسبت دادند [۲].

با وجود اینکه تولید نانوذرات در طول فرآیند الکتروکواگولاسیون انکارناپذیر بوده و در پژوهش یادشده نیز اثبات گردیده است (شکل ۳)، اما افزایش جذب پلاسمونی محلول نانوذرات شرط کافی برای تولید نانوذرات جدید نمی‌باشد و افزایش اندازه نانوذرات و کلوخه شدن آنها نیز منجر به افزایش جذب پلاسمونی می‌شود. دو شرط لازم و کافی برای بررسی تولید یا عدم تولید نانوذرات جدید و افزایش یا عدم افزایش غلظت نانوذرات، مقدار جذب پلاسمونی نانوذرات و طول موج ماکسیمم (λ_{max}) می‌باشد. تنها در صورتی می‌توان گفت که نانوذرات جدید در طول فرآیند تولید شده و در نتیجه غلظت نانوذرات افزایش یافته است که طول موج ماکسیمم در طول مدت افزایش جذب پلاسمونی محلول نانوذرات، ثابت و بدون تغییر مانده باشد. در مطالعه‌ای که Matias و همکارانشان انجام داده‌اند، تنها جذب پلاسمونی محلول‌ها در طول فرآیند الکتروکواگولاسیون ارائه شده است. بنابراین تنها با استناد به مقدار جذب نمی‌توان در مورد تولید یا عدم تولید نانوذرات نقره اظهار نظر کرد؛ درحالی‌که پژوهشگران تحقیق مورد بحث، افزایش جذب پلاسمونی نانوذرات نقره را به تولید نانوذرات نقره نسبت داده‌اند.



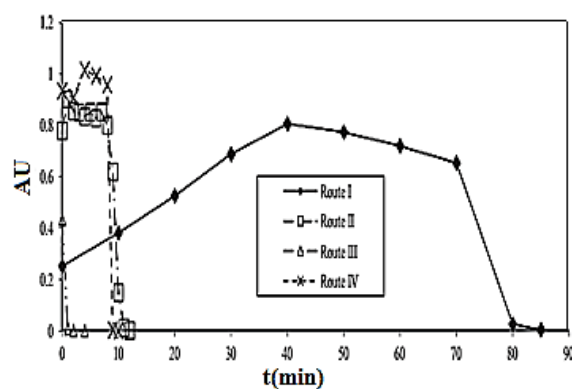
شکل ۳: طیف تشدید پلاسمونی نانوذرات نقره سنتز شده در طول فرآیند EC [۲].

در پژوهش ذکر شده نیز به‌مانند سایر پژوهش‌های مربوط به فرآیند الکتروکواگولاسیون، میزان انرژی و الکترو مصرفی برآورد شد. نتیجه گردید که افزایش ولتاژ یا چگالی جریان و افزایش زمان

جدول ۱: غلظت واکنشگرهای استفاده شده در چهار روش سنتز نانوذرات نقره [۲].

Reagents	Route I	Route II	Route III	Route IV
Reducing Agent	$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ 3 mM	NaBH_4 0.02 mM	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 1.6 mM	NaBH_4 0.01 mM
Stabilizing Agent		$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ 0.25 mM	$\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 0.025 mM	$\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 0.20 mM
AgNO_3	1 mM	0.25 mM	0.4 mM	0.25 mM

محلول نانوذرات نقره تهیه‌شده به روش‌های مختلف توسط سیستم الکتروکواگولاسیون تحت میدان الکتریکی قرار داده شدند. در طول فرآیند الکتروکواگولاسیون، از محلول نانوذرات نقره نمونه-برداری شده و توسط اسپکتروسکوپی مرئی-فرابنفش مورد آنالیز قرار گرفت. نتایج این آنالیز در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲. نمودار جذب بر حسب زمان فرآیند الکتروکواگولاسیون برای محلول نانوذرات نقره سنتز شده توسط روش‌های مختلف [۲].

۳- تجزیه و تحلیل نتایج

بازده فرآیند EC برای روش‌های مختلف سنتز نانوذرات نقره مطالعه شد. برای روش ۱ که سیترات سدیم به‌عنوان احیاگر و پایدارکننده استفاده شده بود، پس از ۸۵ دقیقه اعمال میدان الکتریکی، کاهش اساسی در پیک جذب پلاسمونی محلول نانوذرات نقره مشاهده گردید. در این حالت، بازده حذف نانوذرات نقره در داخل محلول به ۹۸/۶ درصد رسید. در روش ۲ پس از گذشت مدت زمان ۱۲ دقیقه از فرآیند، میزان جذب به حداقل مقدار قابل تشخیص توسط دستگاه مرئی-فرابنفش رسید؛ در این حالت نانوذرات نقره به میزان ۹۹/۹ درصد از محلول حذف شدند. اعمال میدان الکتریکی به مدت ۴ دقیقه بر روی محلول نانوذرات نقره تهیه‌شده توسط روش ۳ نیز موجب کاهش جذب به حداقل مقدار خود گردید. در نتیجه مقدار حذف نانوذرات نقره به ۹۹/۸ درصد رسید. در روش ۴ پس از ۱۰ دقیقه اعمال میدان الکتریکی بر روی محلول نانوذرات نقره، میزان ۹۹/۹ درصد از نانوذرات نقره از داخل محلول حذف گردید. بر مبنای این نتایج، محلول نانوذرات نقره حاوی سیترات سدیم، زمان زیادی را برای حذف نانوذرات می‌طلبد. درحالی‌که محلول‌های نانوذرات نقره فاقد سیترات، در تشکیل لخته بسیار موثر عمل کرده و به

- blue," *Materials Chemistry and Physics*, vol. xxx pp. 1-8, 2015.
- [4] L. Hou, K. Li, Y. Ding, Y. Li, J. Chen, X. Wu, *et al.*, "Removal of silver nanoparticles in simulated wastewater treatment processes and its impact on COD and NH₄ reduction," *Chemosphere*, vol. 87, pp. 248-252, 2012.
- [5] E. Jeong, W.-T. Im, D.-H. Kim, M.-S. Kim, S. Kang, H.-S. Shin, *et al.*, "Different susceptibilities of bacterial community to silver nanoparticles in wastewater treatment systems," *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, vol. 49, pp. 685-693, 2014/05/12 2014.
- [6] M. Kobya, F. Ulu, U. Gebologlu, E. Demirbas, and M. S. Oncel, "Treatment of potable water containing low concentration of arsenic with electrocoagulation: Different connection modes and Fe-Al electrodes," *Separation and Purification Technology*, vol. 77, pp. 283-293, 2011.
- [7] J. Lu, Y. Li, M. Yin, X. Ma, and S. Lin, "Removing heavy metal ions with continuous aluminum electrocoagulation: A study on back mixing and utilization rate of electro-generated Al ions," *Chemical Engineering Journal*, vol. 267, pp. 86-92, 2015.
- [8] O. Fadali, E. Ebrahiem, A. El-Gamil, and H. Altaher, "Investigation of the Electrocoagulation Treatment Technique for the Separation of Oil from Wastewater," *Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 9, p. 62, 2016.
- [9] S. Elabbas, N. Ouazzani, L. Mandi, F. Berrekhis, M. Perdicakis, S. Pontvianne, *et al.*, "Treatment of highly concentrated tannery wastewater using electrocoagulation: Influence of the quality of aluminium used for the electrode," *Journal of hazardous materials*, 2016.
- [10] H. J. Mansoorian, A. H. Mahvi, and A. J. Jafari, "Removal of lead and zinc from battery industry wastewater using electrocoagulation process: Influence of direct and alternating current by using iron and stainless steel rod electrodes," *Separation and Purification Technology*, vol. 135, pp. 165-175, 2014.
- [11] H. P. de Carvalho, J. Huang, M. Zhao, G. Liu, L. Dong, and X. Liu, "Improvement of Methylene Blue removal by electrocoagulation/banana peel adsorption coupling in a batch system," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 54, pp. 777-786, 2015.
- [12] A. García-García, V. Martínez-Miranda, I. G. Martínez-Cienfuegos, P. T. Almazán-Sánchez, M. Castañeda-Juárez, and I. Linares-Hernández, "Industrial wastewater treatment by electrocoagulation-electrooxidation processes powered by solar cells," *Fuel*, vol. 149, pp. 46-54, 2015.

فرآیند الکتروکاتالیز، موجب افزایش انرژی و الکترو مصرفی شده و در نتیجه هزینه‌های عملیاتی را افزایش می‌دهد.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، حذف نانوذرات نقره سنتز شده به روش‌های مختلف از پساب مصنوعی (پساب تهیه شده در آزمایشگاه) مطالعه شد. در این راستا نتایج زیر حاصل گردید:

- نانوذرات سنتز شده توسط سیترات سدیم، در قبال میدان الکتریکی اعمال شده پایداری بیشتری از خود نشان می‌دهند، درحالی‌که نانوذرات سنتز شده توسط سایر احیاگرها و پایدارکننده‌های بحث شده به سهولت کلوخه شده و از محیط محلول حذف شدند.
- نتیجه شد که ماهیت پایدارکننده و احیاگر بسیار مهم می‌باشد؛ بنابراین انتخاب پایدارکننده جهت سنتز نانوذرات برای یک کاربرد خاص از اهمیت بالایی برخوردار است.
- در تصفیه پساب‌های آلوده به نانوذرات نقره، زمان و انرژی صرف شده برای حذف نانوذرات سنتز شده با سیترات سدیم نسبت به نانوذرات سنتز شده توسط سایر پایدارکننده‌ها بسیار بالا می‌باشد.
- افزایش طیف تشدید پلاسمونی نانوذرات در طول فرآیند EC لزوماً بیانگر تولید نانوذرات جدید در طول فرآیند نمی‌باشد.
- فرآیند EC به‌عنوان یک تکنولوژی سبز و سازگار با محیط زیست، موجب حذف بالای ۹۸ درصد نانوذرات نقره از محیط محلول گردید. همچنین، این تکنولوژی می‌تواند برای حذف و تصفیه آلودگی‌های مختلف پساب‌های صنعتی و غیر صنعتی به کار گرفته شود.

۵- منابع

- [1] S. Ghader, M. Manteghian, M. Kokabi, and R. S. Mamoori, "Induction Time of Reaction Crystallization of Silver Nanoparticles," *Chem. Eng. Technol.*, vol. 30, pp. 1129-1133, 2007.
- [2] M. S. Matias, S. P. Melegari, D. S. Vicentini, W. G. Matias, C. Ricordel, and D. Hauchard, "Synthetic wastewaters treatment by electrocoagulation to remove silver nanoparticles produced by different routes," *Journal of Environmental Management* vol. 159 pp. 147-157, 2015.
- [3] L. Du, Q. Xu, M. Huang, L. Xian, and J. X. Feng, "Synthesis of small silver nanoparticles under light radiation by fungus *Penicillium oxalicum* and its application for the catalytic reduction of methylene



- [24] W. Den and C. Huang, "Electrocoagulation for removal of silica nano-particles from chemical-mechanical-planarization wastewater," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 254, pp. 81-89, 2005.
- [25] L. Hou, J. Xia, K. Li, J. Chen, X. Wu, and X. Li, "Removal of ZnO nanoparticles in simulated wastewater treatment processes and its effects on COD and NH_4^+ -N reduction," *Water Science and Technology*, vol. 67, pp. 254-260, 2012.
- [26] Q. Sun, Y. Li, T. Tang, Z. Yuan, and C.-P. Yu, "Removal of silver nanoparticles by coagulation processes," *Journal of hazardous materials*, vol. 261, pp. 414-420, 2013.
- [27] T. Yehya, M. Chafi, W. Balla, C. Vial, A. Essadki, and B. Gourich, "Experimental analysis and modeling of denitrification using electrocoagulation process," *Separation and Purification Technology*, vol. 132, pp. 644-654, 2014.
- [28] M. Al-Shannag, Z. Al-Qodah, K. Bani-Melhem, M. R. Qtaishat, and M. Alkasrawi, "Heavy metal ions removal from metal plating wastewater using electrocoagulation: Kinetic study and process performance," *Chemical Engineering Journal*, vol. 260, pp. 749-756, 2015.
- [29] M. Kobya, E. Demirbas, and F. Ulu, "Evaluation of operating parameters with respect to charge loading on the removal efficiency of arsenic from potable water by electrocoagulation," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 4, pp. 1484-1494, 2016.
- [30] E. Lacasa, P. Cañizares, C. Sáez, F. J. Fernández, and M. A. Rodrigo, "Removal of nitrates from groundwater by electrocoagulation," *Chemical Engineering Journal*, vol. 171, pp. 1012-1017, 2011.
- [31] V. Kuokkanen, T. Kuokkanen, J. Rämö, and U. Lassi, "Electrocoagulation treatment of peat bog drainage water containing humic substances," *Water research*, vol. 79, pp. 79-87, 2015.
- [32] B. Yang, Y. Han, G. Yu, Q. Zhuo, S. Deng, J. Wu, et al., "Efficient removal of perfluoroalkyl acids (PFAAs) from aqueous solution by electrocoagulation using iron electrode," *Chemical Engineering Journal*, 2016.
- [33] O. Sahu, "Performance of copper compounds in chemical and electro oxidation treatment of sugar industry waste water: Batch reaction," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2016.
- [34] Y.-H. Liu, C.-Y. Lin, J.-H. Huang, and S.-C. Yen, "Particle removal performance and its kinetic behavior during oxide-CMP wastewater treatment by electrocoagulation," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 60, pp. 520-524, 2016.
- [13] A. M. H. Elnenay, E. Nassef, G. F. Malash, and M. H. A. Magid, "Treatment of drilling fluids wastewater by electrocoagulation," *Egyptian Journal of Petroleum*, 2016.
- [14] G. J. Millar, J. Lin, A. Arshad, and S. J. Couperthwaite, "Evaluation of electrocoagulation for the pre-treatment of coal seam water," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 4, pp. 166-178, 2014.
- [15] M. Kobya and E. Demirbas, "Evaluations of operating parameters on treatment of can manufacturing wastewater by electrocoagulation," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 8, pp. 64-74, 2015.
- [16] D. D. Nguyen, H. H. Ngo, W. Guo, T. T. Nguyen, S. W. Chang, A. Jang, et al., "Can electrocoagulation process be an appropriate technology for phosphorus removal from municipal wastewater?," *Science of The Total Environment*, vol. 563, pp. 549-556, 2016.
- [17] Y. A. El-Taweel, E. M. Nassef, I. Elkheriany, and D. Sayed, "Removal of Cr (VI) ions from waste water by electrocoagulation using iron electrode," *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 24, pp. 183-192, 2015.
- [18] M. K. N. Mahmad, M. M. R. Rozainy, I. Abustan, and N. Baharun, "Electrocoagulation Process by Using Aluminium and Stainless Steel Electrodes to Treat Total Chromium, Colour and Turbidity," *Procedia Chemistry*, vol. 19, pp. 681-686, 2016.
- [19] A. R. Yazdanbakhsh, M. R. Massoudinegad, S. Eliasi, and A. S. Mohammadi, "The influence of operational parameters on reduce of azithromycin COD from wastewater using the peroxi-electrocoagulation process," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 6, pp. 51-57, 2015.
- [20] A. S. Fajardo, R. F. Rodrigues, R. C. Martins, L. M. Castro, and R. M. Quinta-Ferreira, "Phenolic wastewaters treatment by electrocoagulation process using Zn anode," *Chemical Engineering Journal*, vol. 275, pp. 331-341, 2015.
- [21] A. S. Naje, S. Chelliapan, Z. Zakaria, and S. A. Abbas, "Electrocoagulation using a rotated anode: A novel reactor design for textile wastewater treatment," *Journal of environmental management*, vol. 176, pp. 34-44, 2016.
- [22] S.-l. Zhi and K.-q. Zhang, "Hardness removal by a novel electrochemical method," *Desalination*, vol. 381, pp. 8-14, 2016.
- [23] V. Kuokkanen, T. Kuokkanen, J. Rämö, U. Lassi, and J. Roininen, "Removal of phosphate from wastewaters for further utilization using electrocoagulation with hybrid electrodes-Techno-economic studies," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 8, pp. e50-e57, 2015.