Archive of SID.ir

Research Article

DOI: 10.22034/ijche.2023.368645.1250

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license(CC BY-NC-ND 4.0).

An Investigation into the Effect of Key Parameters on COD Reduction in Synthetic Wastewater with Detergents Using Electrocoagulation Process

A. Rostami[1], B. Pourtalebi[2], S. M. Abdoli[3*], A. Akbari[3]

1- M. Sc. Student of Chemical Engineering, Sahand University of Technology

2- M. Sc. in Chemical Engineering, Sahand University of Technology

3- Assistant Proffessor of Chemical Engineering, Sahand University of Technology

Email: abdoli@sut.ac.ir

Abstract

Detergents are one of the most widely used chemicals in the daily life of humans. Their entry into the environment, especially water, can increase the COD of water and cause serious problems for living organisms. There are different methods to reduce COD. The electrocoagulation process as an electrochemical method is a suitable solution to reduce COD. In this study, the effect of electrocoagulation to reduce COD caused by laundry detergent has been surveyed. Process voltage, the number of electrodes, along with coagulation time as key parameters were investigated as influential parameters. The results showed that the 2-electrode mode reduced COD by 70% in 40 minutes at a voltage of 15 volts. This value was the most optimal energy consumption in terms of process time and the amount of reducing the pollution index.

Received: 5 November 2022
Accepted: 10 April 2023
Page Number: 44-55

Keywords:
Electrocoagulation,
Number of Electrodes,
Voltage,
COD Reduction

Please Cite this Article Using:

Rostami, A., Pourtalebi, B., Abdoli, S. M., & Akbari, A. (2024). An Investigation into the Effect of Key Parameters on COD Reduction in Synthetic Wastewater with Detergents Using Electrocoagulation Process. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 23(132), 44-55, [In Persian].

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

مقـــالـــــه پـــــژوهشی

DOI: 10.22034/ijche.2023.368645.1250

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license(CC BY-NC-ND 4.0).

بررسی تأثیر مشخصه‌های کلیدی بر کاهش COD در پساب سنتزی حاوی مواد شوینده با استفاده از فرایند انعقاد الکتریکی

عطاالله رستمی[۱]، برهان پورطالبی[۲]، سیدمجید عبدلی[۳*]، علی اکبری[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند

۲- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند

۳- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند

پیام نگار: abdoli@sut.ac.ir

چکیده

مواد شوینده یکی از پرکاربردترین مواد شیمیایی در زندگی روزمرهٔ انسان‌هاست. ورود آن‌ها به محیط زیست به ویژه آب‌ها می‌تواند باعث بالارفتن COD آب و بروز مشکلات جدی برای موجودات زنده شود. روش‌های گوناگونی برای کاهش COD وجود دارد. انعقاد الکتریکی به‌عنوان یک روش الکتروشیمیایی راهکار مناسبی برای کاهش COD است. در این مطالعه به بررسی تأثیر انعقاد الکتریکی برای کاهش COD ناشی از موادشویندهٔ لباس‌شویی پرداخته شده‌است. ولتاژ فرایند و تعداد الکترود به‌همراه زمان انعقاد به‌عنوان مشخصه های تأثیرگذار بررسی شدند. نتایج نشان داد که حالت ۲ الکترود در مدت زمان ۴۰ دقیقه در ولتاژ ۱۵ ولت، منجربه کاهش COD تا ۷۰٪ می‌شود. این مقدار بهینه‌ترین میزان مصرف انرژی ازنظر زمان فرایند و مقدار کاهش شاخصهٔ آلودگی بود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۱
شماره صفحات: ۴۴ تا ۵۵

کلیدواژه‌ها:
انعقاد الکتریکی،
تعداد الکترودها،
ولتاژ، کاهش COD

* تبریز، دانشگاه صنعتی سهند، گروه مهندسی شیمی

استناد به مقاله:
رستمی، عطاالله، پورطالبی، برهان، عبدلی، سیدمجید، و اکبری، علی. (۱۴۰۳). بررسی تأثیر مشخصه‌های کلیدی بر کاهش COD در پساب سنتزی حاوی مواد شوینده با استفاده از فرایند انعقاد الکتریکی، *نشریه مهندسی شیمی ایران*، ۲۳(۱۳۲)، ۴۴-۵۵.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۱. مقدمه

آب مهم‌ترین مایع برای ادامهٔ زندگی انسان و جانداران کرهٔ زمین است. از گذشته وجود آب از مهم‌ترین مؤلفه‌های تأثیرگذار در انتخاب محل زندگی برای انسان‌ها بوده‌است. بعدها با گذشت زمان و افزایش روزافزون جمعیت، آب بیش از پیش اهمیت پیدا کرد؛ چراکه با افزایش جمعیت، تقاضا برای آن افزایش یافت و از سویی دیگر منابع آب شیرین محدود است. به‌مرور زمان و با پیشرفت جوامع، آب سالم مد نظر کشورها در اختیارشان قرار گرفت، زیرا آب سالم باعث افزایش سلامت عمومی مردم و هم‌چنین موجب جلوگیری از ابتلا به بیماری‌های ناشی از آب آلوده می‌شود. در ادامه باتوجه‌به محدودیت تأمین آب آشامیدنی، بحث صرفه‌جویی و هم‌چنین تصفیه و استفادهٔ مجدد از پساب مطرح شد. انتشار بی‌رویهٔ پساب‌های صنعتی حاوی انواع ترکیبات سمی نظیر ترکیبات کلردار، فنول‌ها، آروماتیک‌ها و سورفکتانت‌ها بر منابع آبی، تأثیر منفی بر کیفیت خاک و کل زیست‌بوم گذاشته است. برای مقابله با آلودگی محیط زیست، بسیاری از کشورها مقررات سخت‌گیرانه‌ای را دربارهٔ تخلیهٔ پساب اعمال کرده‌اند. بنابراین تصفیه یک راهکار مهم برای جلوگیری از آلودگی زیست‌محیطی و هم‌چنین صرفه‌جویی در مصرف آب است. لذا پژوهشگران بسیاری در تلاش‌اند تا با استفاده از راهکارهای گوناگون و با تصفیهٔ پساب، آن را به چرخهٔ استفادهٔ مجدد برگردانند و یا زمینهٔ لازم برای تخلیهٔ ایمن به محیط زیست را فراهم کنند. موادی برای پیش‌گیری از رسوب‌گذاری، سورفکتانت‌ها و مواد نرم‌کننده، ساختار اصلی مواد شوینده را تشکیل می‌دهند[۱]. پساب حاوی مواد شوینده در خشکشویی‌ها و فعالیت‌های خانگی به‌دلیل وجود سورفکتانت‌ها اثرات مستقیم و غیرمستقیم بر محیط زیست و سلامت انسان‌ها می‌گذارد[۲]. باتوجه‌به مصرف زیاد آب در مصارف خانگی، ارائهٔ یک راهکار مناسب برای تصفیهٔ پساب خروجی از برخی دستگاه‌های خانگی نظیر ماشین لباس‌شویی برای استفادهٔ مجدد در امر شست‌وشوی سطوح می‌تواند یک موضوع جالب برای انجام تحقیق باشد. هر دستگاه ماشین لباس‌شویی جدید در هر بار شست‌وشو حدود ۵۰ لیتر و ماشین‌های لباس‌شویی قدیمی در حدود ۱۵۰ لیتر آب مصرف می‌کنند.

برای حذف مواد شوینده از پساب، روش‌های مختلفی به‌کار گرفته شده است. اوزوناسیون یکی از این روش‌هاست که برای حذف سورفکتانت‌های موجود در پساب موادشوینده به‌کار گرفته شده است. هزینهٔ نسبتاً زیاد را می‌توان از کاستی‌های این روش نام برد[۳]. روش دیگر برای حذف مواد شوینده استفاده از فناوری غشایی است. فناوری غشایی اگرچه بازدهی مناسبی دارد، اما دارای کاستی‌هایی مانند گرفتگی و از کار افتادن غشاست. کوالسکا[1] و همکاران دربارهٔ کاهش COD از پساب به‌وسیلهٔ غشای اولترافیلتراسیون بازدهی ۸۵٪ را گزارش کردند؛ اما نمی‌توان از نیاز به فشار برای انجام جداسازی صرف نظر کرد که یکی دیگر از کاستی‌های این روش است[۴]. انعقاد شیمیایی از دیگر روش‌ها برای کاهش مقدار سورفکتانت‌های موجود در پساب است. افزودن یک مادهٔ شیمیایی به‌عنوان منعقدکننده به پساب برای انجام عمل انعقاد شیمیایی از کاستی‌های این روش است. کالتا و الکتورووِیچ[2] در تحقیقی نشان دادند که مقدار حذف سورفکتانت به‌وسیلهٔ منعقدکننده‌های سولفات آلومینیوم و کلرید آهن بازدهی مناسبی نداشته است. بنابراین کم بودن بازدهی نیز یکی از کاستی‌های این روش محسوب می‌شود[۵].

فرایند انعقاد الکتریکی به‌عنوان یک فناوری الکتروشیمیایی در حال ظهور، در سال های اخیر توجه بیشتری را به خود جلب کرده است. این روش، توانایی کاهش مقدار COD[3] و BOD[4] پساب‌های مواد روغنی و نفتی، فلزات سنگین و رنگ را داراست[۶-۸]. شاخصهٔ آلایندگی در این آزمایش‌ها COD است که مقدار آن بسته‌به مقدار مواد شوینده در آب متفاوت است. اکسیژن‌خواهی شیمیایی یکی از مهم‌ترین شاخص‌های سنجش آلودگی پساب است. آلودگی پساب ناشی از مواد خارجی است که وارد آب شده و به‌صورت معلق یا محلول باعث آلودگی آن و تولید پساب شده است. بدیهی است هرچه مقدار این مواد در پساب بیشتر باشد، بار آلودگی آن نیز بیشتر خواهد شد. بنابراین اندازه‌گیری مقدار مواد خارجی پساب، مشخصهٔ اصلی در تعیین مقدار آلودگی و آلایندگی پساب است. طبق استانداردهای سازمان محیط زیست ایران، مقدار COD برای استفادهٔ کشاورزی و آبیاری نباید از مقدار $\frac{mg}{L}$ ۲۰۰ بیشتر باشد.

فرایند انعقاد الکتریکی با دو سازوکار عمده، باعث تولید مواد منعقدکننده (هیدروکسیدهای فلزی) می‌شود. درصورت استفاده از

1. Kowalska
2. Kaleta & Elektorowicz
3. Chemical oxygen demand
4. Biological oxygen demand

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

الکترودهای آهنی به‌صورت رابطه‌های (۱) تا (۸) برای واکنش‌های انجام‌گرفته بیان می‌شود[۹].

سازوکار ۱:

در آند (۱) $4Fe \rightarrow 4Fe^{2+}_{(aq)} + 8e^-$

در آند (۲) $4Fe^{2+}_{(aq)} + 10H_2O + O_{2(g)} \rightarrow 4Fe(OH)_3 + 8H^+_{(aq)}$

در آند (۳) $8H^+_{(aq)} + 8e^- \rightarrow 4H_{2(g)}$

واکنش کلی (۴) $4Fe + 10\ H_2O + O_{2(g)} \rightarrow 4Fe(OH)_3 + 4H_{2(g)}$

سازوکار ۲:

در آند (۵) $Fe \rightarrow Fe^{2+}_{(aq)} + 2e$

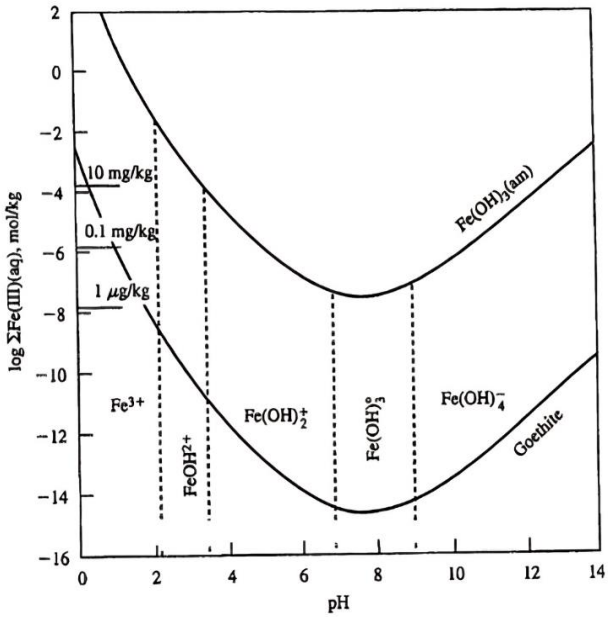
در آند (۶) $Fe^{2+}_{(aq)} + 2OH^-_{(aq)} \rightarrow 4Fe(OH)_2$

در کاتد (۷) $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_{2(g)} + 2\ OH^-_{(aq)}$

واکنش کلی (۸) $Fe + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + H_{2(g)}$

در فرایند انعقاد الکتریکی ابتدا در آند، یون‌های آهن تولید می‌شوند، سپس با هیدروکسید تولیدی در کاتد واکنش می‌دهند و سبب تولید مادهٔ منعقدکننده می‌شوند. مواد منعقدکننده سبب می‌شوند تا آلاینده‌های موجود در محلول ناپایدار شوند. درآخر آلاینده‌ها با تجمع به‌صورت فلاک[1] درمی‌آیند که می‌توانند شناور یا ته‌نشین شوند[۱۰]. باتوجه‌به شکل (۱)، نوع مادهٔ منعقدکنندهٔ تولیدی به pH پساب بستگی دارد. pH برروی پایداری هیدروکسیدهای فلزی تأثیر می‌گذارد. pH پساب سنتزی مورد استفاده در آزمایش‌های این مقاله برابر با ۸ بود. بنابراین سازوکار اول، سازوکار غالب تشکیل مادهٔ منعقدکننده در طول فرایند است.

انعقاد الکتریکی یک روش با بازده مناسب و تجهیزات کم‌هزینه برای تصفیهٔ پساب مواد شوینده است. این روش در سال‌های اخیر به‌عنوان یک فناوری شناخته‌شده، بدون افزودن هرگونه مادهٔ شیمیایی، قادربه کاهش یا حذف آلاینده‌هاست[۱۲]. مشخصه‌های عملیاتی تأثیرگذار در فرایند انعقاد الکتریکی شامل زمان عملیات، تعداد الکترود، فاصلهٔ بین الکترود و مقدار ولتاژ اعمالی است. ایجاد تغییرات در هرکدام از مشخصه‌ها می‌تواند باعث تغییر در میزان کاهش آلودگی شود.



شکل ۱: تاثیر pH بر روی نوع هیدروکسید فلزی تشکیل شده[۱۱].

Fiqure1: Effect of pH on type of metal hydroxide formed [11].

1. Flock

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۱-۱ زمان

زمان فرایند با مقدار حذف آلاینده‌ها رابطهٔ مستقیم دارد. با افزایش زمان انعقاد، مقدار منعقدکننده‌های تولید شده و درنتیجه مقدار حذف آلاینده افزایش می‌یابد. هنگامی‌که زمان انعقاد افزایش یابد، مقدار حذف آلاینده کم‌تر می‌شود[۱۳].

۱-۲ تعداد الکترود

افزایش تعداد الکترود باعث افزایش بازدهی است. دلیل آن را می‌توان به افزایش آمپراژ و درنتیجه افزایش توانایی سامانه در تولید مواد منعقدکننده نسبت داد. البته باید به این نکته توجه کرد که افزایش آمپراژ سامانه باعث افزایش هزینه‌های ناشی از مصرف انرژی می‌شود[۱۴].

۱-۳ فاصلهٔ بین الکترودها

افت ولتاژ[1] با فاصلهٔ الکترود رابطهٔ مستقیم دارد، که در رابطهٔ (۹) آورده شده است:

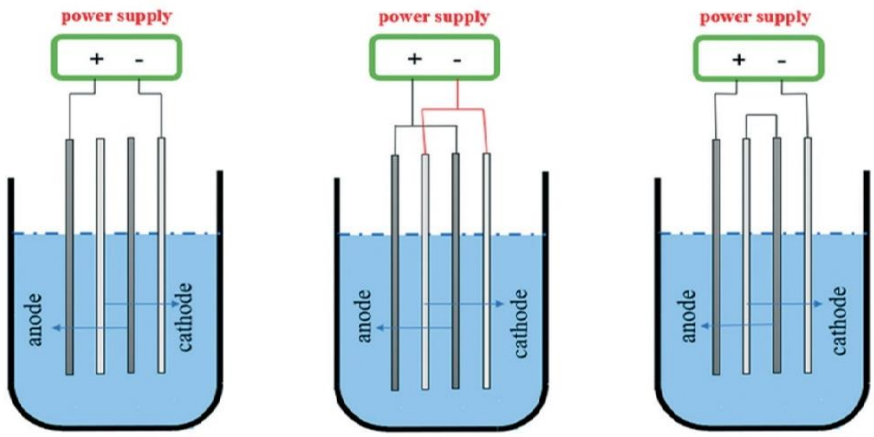
$$\eta_{IR} = dI\rho \qquad (۹)$$

که در آن η_{IR} نشان‌دهندهٔ افت ولتاژ(V)، d نشان‌دهندهٔ فاصلهٔ الکترود (m)، I چگالی جریان ($\frac{A}{m^2}$) و ρ مقاومت الکترولیت (Ω.m) است. با افزایش فاصلهٔ الکترود، افت ولتاژ افزایش می‌یابد و درنتیجه مصرف انرژی بیشتر می‌شود. با این حال، استفاده از فاصلهٔ بسیار کوتاه بین الکترودها توصیه نمی‌شود؛ زیرا جاذبهٔ الکترواستاتیکی قوی ممکن است باعث تعداد بالایی از برخورد بین فلاک‌ها شود که منجربه کاهش کیفیت آن‌ها می‌شود. طبق منابع علمی، این فاصله معمولاً در محدودهٔ ۰/۵ تا ۳/۰ سانتی‌متر انتخاب می‌شود[۱۲].

۱-۴ ولتاژ

ولتاژ سامانه عامل کنترل‌کنندهٔ مواد منعقدکنندهٔ تولیدی در سامانه است. با افزایش ولتاژ سامانه، مقدار شدت جریان و درنتیجه مقدار چگالی جریان افزایش می‌یابد، که باعث تولید مواد منعقدکنندهٔ بیشتری در سامانه می‌شود و مقدار حذف افزایش می‌یابد.

این فرایند می‌تواند سه نوع آرایش الکترودی داشته باشد؛ آرایش الکترودی می‌تواند به‌صورت دو قطبی (BP-S)[2] یا تک‌قطبی (MP)[3] باشد. شکل (۲) طرحوارهٔ آرایش الکترودها در فرایند انعقاد الکتریکی را نشان می‌دهد. در سامانهٔ دوقطبی هیچ ارتباطی بین الکترودها وجود ندارد؛ اما در سامانهٔ تک‌قطبی الکترودها به‌هم دیگر وصل می‌شوند. سامانهٔ تک‌قطبی را می‌توان به‌صورت تک‌قطبی موازی و تک‌قطبی سری وصل کرد که حالت تک‌قطبی موازی بازدهی بیشتری نسبت‌به حالت سری در کاهش COD دارد[۱۲].



(a) (b) (c)

شکل ۲. طرحوارهٔ حالت اتصال الکترودها در فرایند انعقاد الکتریکی. (a) دوقطبی (b) تک‌قطبی موازی (c) تک‌قطبی سری[۱۱].

Figure 2. Schematic of the connection state of the electrodes in the electrocoagulation process. (a) bipolar (b) parallel monopolar (c) series monopolar [11].

1. IR
2. Bipolar-Serial
3. Monopolar

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

برای انجام فرایند انعقاد الکتریکی محاسبهٔ مصرف انرژی الکتریکی ضروری است؛ زیرا بیشترین هزینهٔ فرایند مربوطبه هزینه‌های مصرف انرژی است. مصرف انرژی الکتریکی را در طول فرایند انعقاد الکتریکی می‌توان با استفاده از رابطهٔ (۱۰) حساب کرد[۱۵].

$$W = \frac{U.I.t}{V} \qquad (۱۰)$$

که در آن، W مصرف انرژی ($kW.h.m^{-3}$)، U ولتاژ اعمال شده (V)، I جریان اعمال‌شده (A)، t زمان فرایند (h)، و V حجم پساب (m^3) است.

در ادامه به بررسی تعدادی مقاله پرداخته می‌شود که در آن‌ها فرایند انعقاد الکتریکی برای کاهش و حذف آلاینده‌های مختلف به‌کار برده شده است.

هاشیم[1] و همکاران با درنظر گرفتن برخی مشخصه‌ها به حذف فسفات با انعقاد الکتریکی پرداخته‌اند. در این مطالعه برای انجام فرایند انعقاد الکتریکی از الکترودهای آلومینیومی حفره‌دار استفاده شده است. تأثیر pH اولیه و زمان بررسی شد و درنهایت مقدار حذف فسفات به ۹۹٪ در مدت زمان ۶۰ دقیقه و pH برابر با ۶ رسید[۱۶]. جنس الکترودهای مصرفی یکی از مشخصه‌های تأثیرگذار در فرایند انعقاد الکتریکی است. در بررسی ایردمیز[2] و همکاران، الکترودهای آلومینیوم و آهن را برای استفاده و مقایسه در حذف فسفات انتخاب کردند. نتایج نشان داد که حذف فسفات با الکترودهای آلومینیومی بیشتر بود و به ۱۰۰٪ رسید[۱۷]. باتوجه‌به تأثیر انعقاد الکتریکی در حذف بسیاری از آلاینده‌ها، تأثیر حذف آن‌ها برروی فلزات سنگینی مانند آرسنیک به‌وسیلهٔ خان[3] و همکاران بررسی شد. آزمایش‌ها نشان داد که حذف ۹۵٪ آرسنیک در محیط آبی با استفاده از فرایند انعقاد الکتریکی امکان پذیر است. هم‌چنین مقدار مصرف انرژی قابل قبولی را داراست[۱۸]. نظری[4] و همکاران مقدار حذف سورفکتانت آنیونی و کاهش COD را با استفاده از انعقاد الکتریکی بررسی کردند و نتایج قابل توجهی در میزان حذف به‌دست آوردند. در این مطالعه مقدار کاهش سورفکتانت در حدود ۹۳٪ و مقدار کاهش COD ۹۰٪ بود. هم‌چنین مقدار مصرف انرژی نیز محاسبه و امکان حذف سورفکتانت با فرایند انعقاد الکتریکی تأیید شد[۱۹].

1. Hashim
2. İrdemez
3. Khan
4. Nazari

هدف از انجام این پژوهش بررسی تعدادی مشخصهٔ مؤثر در حذف مواد شوینده از پساب ماشین لباس‌شویی است که خود مواد شوینده باعث افزایش COD در پساب می‌شود. تلاش برای کاهش و رساندن مقدار COD پساب به حد نصاب کشاورزی برای بازچرخانی آب و هم‌چنین انتخاب بهترین مقدار حذف در بهترین زمان عملیاتی بررسی شد.

۲. مواد و روش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها ابتدا یک منبع تغذیهٔ ۳۰ ولت و ۳/۵ آمپر تهیه شد. هم‌چنین برای سهولت در کار یک ظرف پلاستیکی شفاف به ابعاد ۱۴×۱۴×۱۴ سانتی‌متر مکعب به‌عنوان ظرف فرایند انتخاب شد. دلیل این امر، تسهیل در دسترسی و هم‌چنین عدم رسانایی الکتریکی ظرف است. برای ایجاد اختلاط مناسب در ظرف، یک دستگاه هوادهی آکوا مدل AP-320 با شیرکنترل مناسب تهیه شد تا وظیفهٔ اختلاط در سامانه را داشته باشد. اختلاط باعث پخش مواد منعقدکنندهٔ تولیدی به سراسر پساب و هم‌چنین جلوگیری از تجمع مواد منعقدکننده و هیدروژن تولیدی در روی آند و کاتدها می‌شود. مقدار هوادهی با استفاده از روتامتر روی ۱/۵ لیتر بر دقیقه تنظیم شد. تعداد ۶ الکترود با ابعاد ۸×۶ سانتی‌متر مربع و ضخامت ۲ میلی‌متر و سطح فعال ۶×۷ سانتی‌متر مربع، انتخاب و برای حالت‌های مختلف از آن‌ها استفاده شد. فاصلهٔ بین الکترودها ۱ سانتی‌متر درنظر گرفته شد و از تغییر در فاصلهٔ آن‌ها در طول آزمایش صرف نظر شد. برای انجام تست COD، سولفات نقره، سولفات جیوه، دی‌کرومات پتاسیم و هم‌چنین سولفوریک اسید تهیه و محلول‌های مورد استفاده برای انجام تست با این مواد آماده شد[۲۰]. محاسبهٔ درصد تغییرات COD در طول فرایند با رابطهٔ (۱۱) انجام گرفت.

$$\eta = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 \qquad (۱۱)$$

برای نمونه‌برداری، یک شیر قطره‌ای به ظرف نصب شد تا بتوان در مدت زمان‌های مشخصی از ظرف نمونه‌برداری کرد و آنالیز COD از نمونه گرفته شود. شکل (۳)، تصویر دستگاه مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. پساب این تحقیق در آزمایشگاه با افزودن ۱/۵ گرم مادهٔ شوینده به یک لیتر آب شهری تهیه شد. برای

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

اطمینان از حل کامل مواد شوینده در آب، محلول به‌مدت ۱۰ دقیقه هم زده و درنهایت برای انجام آزمایش به ظرف انعقاد الکتریکی منتقل شد. هم‌چنین بعد از نمونه‌گیری، ۳۰ دقیقه زمان ته‌نشینی در نظر گرفته شد تا فلاک‌ها در کف ظرف نمونه ته‌نشین شوند. مشخصات ابتدایی پساب شامل pH، مقدار مادهٔ شوینده و مقدار COD در جدول (۱) آورده است. هم‌چنین مواد شیمیایی و تجهیزات استفاده‌شده در این فرایند در جدول (۲) گزارش شده است.

جدول ۱. مشخصات ابتدایی فاضلاب.

Table 1: Basic characteristics of wastewater.

Parameter	Value
pH	8
Washing liquid	1.5 g/L
COD	640 mg/L

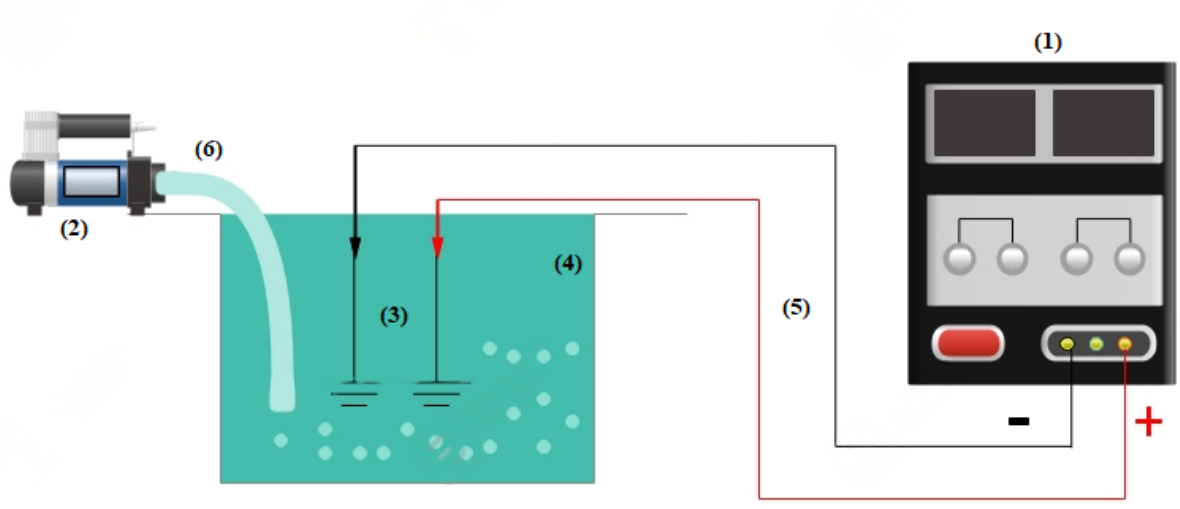
۳. بحث و نتایج

مشخصه‌های تأثیرگذار و عملیاتی در فرایند انعقاد الکتریکی شامل زمان فرایند، ولتاژ اعمالی و تعداد الکترودهاست که در ادامه هریک به‌صورت جداگانه، مطالعه و بررسی می‌شوند.

جدول ۲. مواد شیمیایی و تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌ها.

Table 2: Chemical and equipment used in experiments.

Laundry detergent manufactured by Active Company
Silver sulfate (Merck)
Mercury sulfate (Merck)
sulfuric acid (Mojalali)
Potassium dichromate
Thermoreactor model spectroquant TR620
Spectrophotometer model spectroquant prove 600
Aeration device model AP-320
Colorless cubic plastic container
Drip irrigation faucets



شکل ۳. طرحوارهٔ دستگاه استفاده‌شده در مطالعهٔ حاضر؛ ۱) منبع تغذیه، ۲) پمپ هوادهی، ۳) الکترودها، ۴) ظرف انعقاد، ۵) سیم اتصال، ۶) شلنگ هوادهی.

Figure 3. Schematic of the device used in the current study; 1) DC power supply, 2) Areation pump, 3) Electrodes, 4) Reactor, 5) wires, 6) Areation hose.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

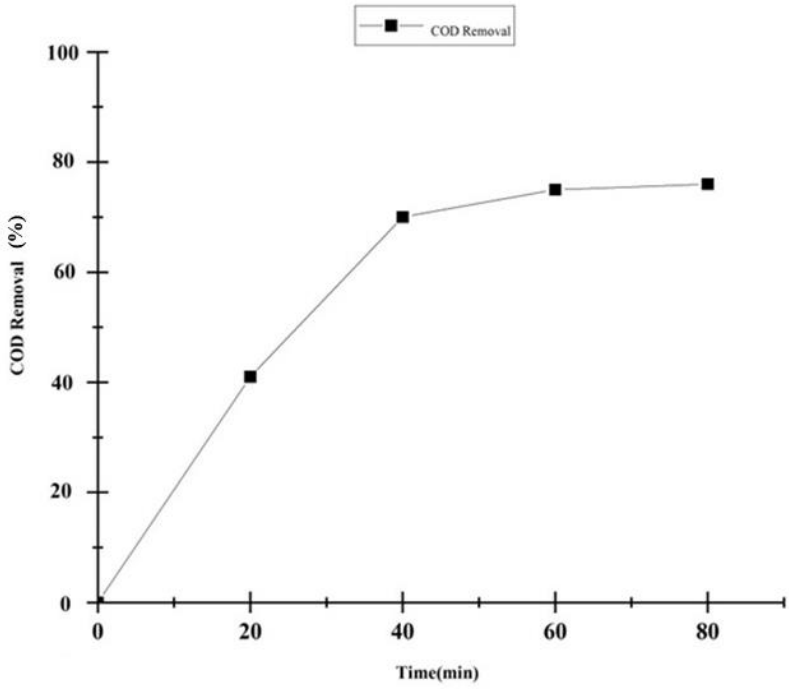
۳-۱ تأثیر زمان فرایند در کاهش COD

زمان انعقاد الکتریکی یک مشخصهٔ اساسی در انجام عملیات است. بسته‌به مقدار ولتاژ انتخاب زمان بسیار مهم است؛ اما به‌طور کلی می‌توان گفت با افزایش زمان فرایند مقدار کاهش آلاینده‌ها بیشتر خواهد بود[۲۱]. شکل (۴) درصد کاهش COD درحالت ۲ الکترود و ولتاژ ۱۵ ولت را نشان می‌دهد. باتوجه‌به نتایج، مقدار COD با افزایش مدت زمان فرایند، کاهش پیدا کرده است و بعد از مدت ۴۰ دقیقه مقدار COD تقریباً ثابت مانده است و شیب نمودار کاهش محسوسی داشته که این نشان می‌دهد افزایش زمان پس از ۴۰ دقیقه نمی‌تواند تأثیر چندانی روی تغییرات COD داشته باشد. هم‌چنین افزایش بیش از حد مدت زمان فرایند باعث افزایش هزینه‌های ناشی از مصرف انرژی می‌شود. بنابراین شناسایی زمان مناسب فرایند ضروری است.

۳-۲ تأثیر ولتاژ اعمالی در حذف COD

مقدار ولتاژ رابطهٔ مستقیمی با جریان اعمالی دارد. با افزایش ولتاژ مقدار جریان و چگالی جریان افزایش خواهد یافت. هم‌چنین افزایش مقدار جریان باعث تولید بیشتر مواد منعقدکننده می‌شود[۲۲].

شکل (۵) روند تغییرات COD را بر حسب زمان برای حالت ۲ الکترود نشان می‌دهد. باتوجه‌به نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش ولتاژ مقدار حذف افزایش پیدا کرده است. به‌طوری‌که در ولتاژ ۲۰ ولت و مدت زمان ۸۰ دقیقه مقدار COD تا ۸۵٪ کاهش داشته است. در ولتاژهای ۱۵ و ۲۰ ولت بعد از ۴۰ دقیقه حذف آلاینده‌ها به‌کندی امکان پذیرفته است، اما در ولتاژ ۱۰ ولت، مقدار حذف تا ۶۰ دقیقه نزول قابل توجهی داشته که علت آن می‌تواند تولید کمتر مواد منعقدکننده در ۴۰ دقیقهٔ ابتدایی فرایند باشد. بعد از مدت زمان ۶۰ دقیقه، مقدار حذف با سرعت کمتری انجام شد. مقدار جریان الکتریکی، اندازه و نرخ تولید حباب H_2 و لخته‌های هیدروکسید فلز را در سامانه انعقاد الکتریکی تعیین می‌کند. سطح معینی از چگالی جریان باید به‌دست آید تا اطمینان حاصل شود که مقدار کافی از رسوب هیدروکسید فلز برای حذف مؤثر آلاینده در دسترس است. با این وجود، اگر چگالی جریان اعمال‌شده خیلی زیاد باشد، غیرفعال شدن الکترود حاصل ممکن است منجربه مصرف انرژی بیشتر شود. بنابراین، برای پساب‌های صنعتی مختلف، تعیین تجربی مقدار ولتاژ مناسب که باعث تغییر در چگالی جریان می‌شود، بسیار مهم است.

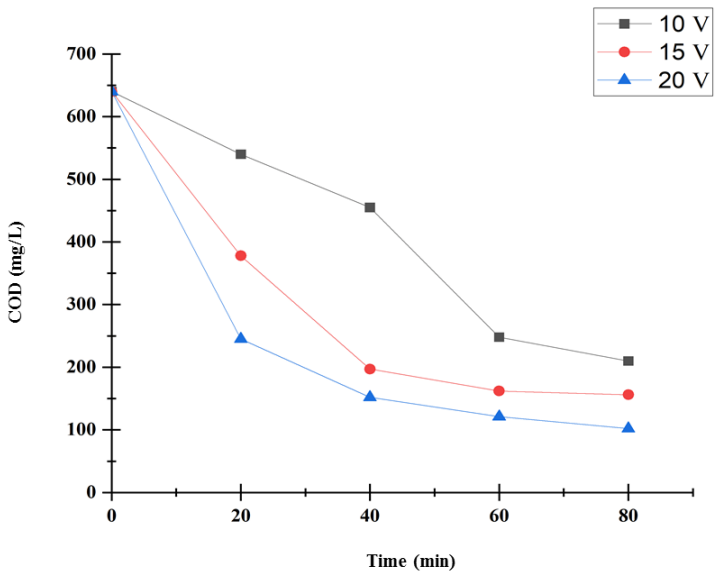


شکل ۴. درصد کاهش COD در حالت ۲ الکترود و ولتاژ ۱۵ ولت در زمان‌های متفاوت.

Figure 4. COD reduction percentage in the case of 2 electrodes and 15 V voltage at different times.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل ۵. مقدار کاهش COD در حالت ۲ الکترود در ولتاژهای مختلف.

Figure 5. The amount of COD reduction in the case of 2 electrodes at different voltages.

شکل (۶) مقادیر بی‌بعد COD در مقایسه با مصرف انرژی بی‌بعد را نشان می‌دهد. مقدار مصرف انرژی با رابطهٔ (۱۰) برای هر مدت زمان در حالت دو الکترود حساب شد. مقادیر به‌دست‌آمده بر بیشترین مقدار که همان حالت ۸۰ دقیقه و ولتاژ ۲۰ ولت است، تقسیم شد. مقدار COD در زمان‌های مختلف نمونه‌برداری مشخص شد. برای بی‌بعدسازی COD نیز همانند مصرف انرژی مقادیر به‌دست آمده در مدت زمان‌های نمونه‌گیری بر بیشترین مقدار (مقدار اولیه برابر با ۶۴۰ میلی‌گرم بر لیتر) تقسیم شد. این عمل برای همسان‌سازی نمودارهای COD انجام شد. سپس مقادیر بی‌بعد رسم شدند. باتوجه‌به شکل، برای دست‌یابی به مقدار COD قابل استفاده در کشاورزی که با خط‌چین سبزرنگ مشخص شده، باید مقدار مصرف انرژی بررسی شود. باتوجه‌به نمودارهای COD مشخص است که در حالت ۱۰ ولت در مدت زمان ۶۰ دقیقه و به بعد مقدار مطلوب COD به‌دست آمده است. در حالت ۱۵ ولت از مدت زمان ۴۰ دقیقه و به بعد این مقدار حاصل شده است. درنهایت برای حالت ۲۰ ولت نیز در مدت زمان ۲۰ دقیقه به نزدیکی مقدار استاندارد لازم رسیده است، اما باتوجه‌به محدودیت مصرف انرژی در فرایند انعقاد الکتریکی، هرچقدر مصرف انرژی کمتری در فرایند وجود داشته باشد، بهترین انتخاب خواهد بود. البته باید در نظر داشت که زمان فرایند نباید طولانی باشد؛ زیرا افزایش زمان فرایند باعث طولانی‌شدن زمان تصفیه می‌شود و مقدار کاهش آلایندگی با افزایش زمان در بازه‌های یکسان کمتر می‌شود. بنابراین برای صرفه‌جویی در زمان و مصرف انرژی، نقاط اول نزدیک به خط‌چین سبز قابل قبول خواهد بود. البته اگر محدودیت زمانی وجود نداشته باشد، می‌توان با افزایش زمان در ولتاژ پایین، مصرف انرژی را نیز کاهش داد. باتوجه‌به این موارد، برای انجام عملیات انعقاد الکتریکی، حالت ۱۵ ولت و مدت زمان ۴۰ دقیقه حالت مناسبی است، زیرا هم ازنظر مقدار مصرف انرژی در سطح متوسط است و هم باتوجه‌به مقدار زمان کل فرایند در مقدار متوسطی قرار دارد و توانسته است مقدار آلایندگی را ۷۰٪ کاهش دهد.

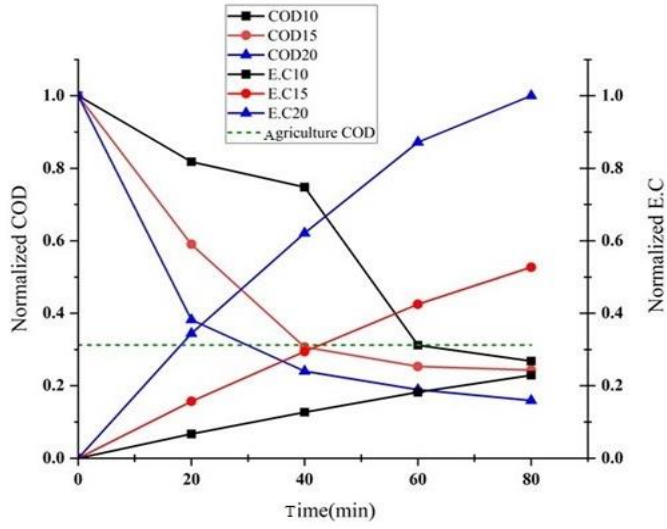
۳-۳ بررسی تأثیر تعداد الکترود در مقدار کاهش COD

باتوجه‌به آزمایش‌های انجام‌یافته، افزایش تعداد الکترود باعث کاهش بیشتر آلایندگی خواهد شد. دلیل آن را می‌توان به تولید منعقدکنندهٔ بیشتر نسبت داد[۲۳]. شکل (۷) تفاوت میزان حذف در حالت ۲ الکترود و ۴ الکترود را نشان می‌دهد. برای اتصال حالت چهار الکترود مطابق شکل ((۲)-b) اتصال تک‌قطبی موازی انتخاب شد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، افزایش تعداد الکترود باعث کاهش بیشتر آلایندگی در زمان‌های یکسان شده است. دلیل آن را می‌توان به افزایش جریان نسبت داد به‌طوری‌که با افزایش تعداد

Archive of SID.ir

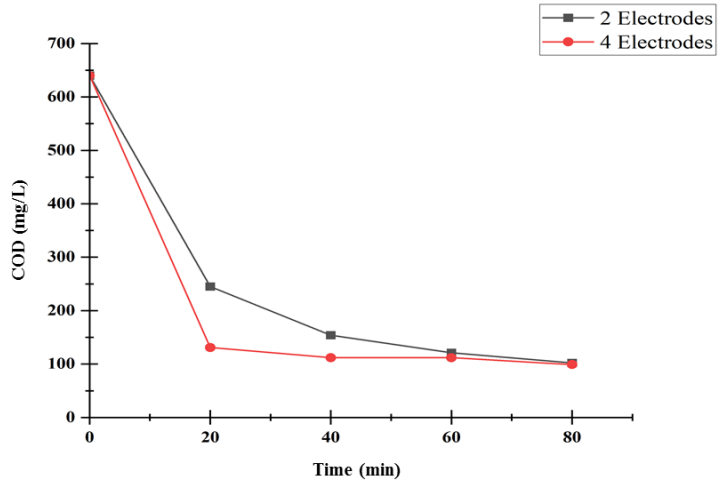
Archive of SID.ir

الکترودها، سطح فعال افزایش یافته است. باتوجه‌به شکل (۷)، مقدار حذف در حالت ۲ الکترود در مدت زمان ۲۰ دقیقه و ولتاژ ۲۰ ولت، در حدود ۶۲٪ است که با رابطهٔ (۱۱) حساب شد. درحالی‌که در مدت زمان و ولتاژ مشابه این مقدار حذف در حالت ۴ الکترود به ۸۰٪ رسید که نشان از حذف بیشتر آلاینده‌ها دارد. به‌عبارت دیگر، با افزایش تعداد الکترود از ۲ به ۴ عدد، مقدار کاهش COD ۱۸٪ افزایش یافته است. مصرف انرژی با استفاده از رابطهٔ (۱۰) برای حالت ۲ الکترود $3/4\ kW.h.m^{-3}$ حساب شد که این مقدار در حالت ۴ الکترود $8/7kW.h.m^{-3}$ است. نتایج حاکی از آن است که با دو برابر کردن تعداد الکترودها، مصرف انرژی افزایش ۲/۵ برابری دارد. دلیل افزایش مصرف انرژی را می‌توان به افزایش ۲/۵ برابری جریان الکتریکی در حالت ۴ الکترود نسبت داد. بنابراین افزایش تعداد الکترود اگرچه باعث کاهش بیشتر COD خواهد بود، اما مصرف انرژی بالاتری را درپی خواهد داشت. در شرایط عملیاتی ۱۵ ولت و زمان ۴۰ دقیقه، برای حالت ۲ الکترود و چهار الکترود، مقدار مصرف انرژی به‌ترتیب برابر $2/9\ kW.h.m^{-3}$ و $8/2\ kW.h.m^{-3}$ حساب شد.



شکل ۶. مقایسهٔ مصرف انرژی بی‌بعد با میزان کاهش COD بی‌بعد در مدت زمان مشخص در حالت دو الکترود.

Figure 6. Comparison of normalized energy consumption with the amount of normalized COD removal in a certain time.



شکل ۷. مقایسهٔ مقدار کاهش COD در حالت ۲ الکترود و ۴ الکترود در ولتاژ ۲۰ ولت در حالت اتصال تک‌قطبی موازی.

Figure 7. Comparison of the amount of COD reduction in 2-electrodes and 4-electrodes mode at 20 V voltage in parallel monopolar connection mode.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، به تأثیر مقدار ولتاژ و تعداد الکترود در کاهش مقدار COD پساب سنتزی حاوی مواد شوینده ماشین لباس‌شویی با استفاده از فرایند انعقاد الکتریکی پرداخته شد. نتایج تغییر مقدار ولتاژ و تعداد الکترودها در کاهش COD باهم مقایسه شد. نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش زمان، مقدار COD کاهش می‌یابد؛ اما با افزایش بیش‌ازحد زمان فرایند، مصرف انرژی افزایش می‌یابد و کاهش COD کندتر می‌شود. بهترین زمان حذف در حالت ۲ الکترود باتوجه‌به مقدار کاهش CODزمان ۴۰ دقیقه و ولتاژ ۱۵ بود که هم ازنظر زمان فرایند در حد متوسطی قرار داشت و هم مصرف انرژی آن $kW.h.m^{-3}$ ۲/۹ بود و مقدار کاهش COD ۷۰٪ حساب شد. البته با افزایش زمان فرایند مقدار COD با سرعت کمتری کاهش یافت. بنابراین اگر برای زمان فرایند و هم‌چنین میزان مصرف انرژی محدودیتی اعمال نشود، می‌توان به درصد بالاتری از کاهش آلایندگی رسید. به‌طور مثال در حالت ۲ الکترود و زمان ۸۰ دقیقه و ولتاژ ۱۵ ولت مقدار آلایندگی تا ۷۶٪ کاهش داشته‌است. در حالت ۴ الکترود و شرایط عملیاتی مشابه نیز مقدار آلایندگی تا ۸۷٪ کاهش یافت، که دلیل آن افزایش جریان اعمالی به سامانه با اضافه‌شدن تعداد الکترودها و سطح فعال است. باتوجه‌به نتایج، انعقاد الکتریکی می‌تواند یک روش کارامد برای کاهش آلایندگی مواد شوینده موجود در پساب‌ها، به‌ویژه پساب ماشین لباس‌شویی باشد.

مراجع

[1] Uzma, S., Khan, S., Murad, W., Taimur, N., & Azizullah, A. (2018). Phytotoxic effects of two commonly used laundry detergents on germination, growth, and biochemical characteristics of maize (Zea mays L.) seedlings. *Environmental monitoring and assessment*, 190: 1-14, doi: 10.1007/s10661-018-7031-6.

[2] Ni'am, M. F., Othman, F., Sohaili, J., & Fauzia A. (2008). Electrocoagulation technique for removal of COD and turbidity to improve wastewater quality. *Ultrapure Water*, 25: 36–43.

[3] Joseph, C. G., Farm, Y. Y., Taufiq-Yap, Y. H., Pang, C. K., Nga, J. L. H., & Puma, G. Li. (2021). Ozonation treatment processes for the remediation of detergent wastewater: A comprehensive review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9: 33-68, doi: 10.1016/j.jece.2021.106099.

[4] Kowalska, I., Kabsch-Korbutowicz, M., Majewska-Nowak, K., & Pietraszek, M. (2005). Removal of detergents from industrial wastewater in ultrafiltration process. *Environment Protection Engineering*, 31: 4-9.

[5] Kaleta, J., & Elektorowicz, M. (2013). The removal of anionic surfactants from water in coagulation process. *Environmental technology*, 34: 999–1005, doi: 10.1080/09593330.2012.733415.

[6] İrdemez, Ş., Yildiz, Y. Ş., & Tosunoğlu, V. (2006). Optimization of phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with aluminum plate electrodes. *Separation and purification Technology*, 52: 394–401, doi: 10.1016/j.seppur.2006.05.020.

[7] Onder, E., Koparal, A., & Ogutveren, U. (2007). An alternative method for the removal of surfactants from water: Electrochemical coagulation. *Separation and Purification Technology*, 52: 527–532, doi: 10.1016/j.seppur.2006.06.006.

[8] Moreno-Casillas, H. A., Cocke, D. L., Gomes, J. A. G., Morkovsky, P., Parga, J. R., & Peterson, E. (2007). Electrocoagulation mechanism for COD removal. *Separation Purification Technology*, 56: 204–211, doi: 10.1016/j.seppur.2007.01.031.

[9] Gönder, Z. B., Balcıoğlu, G., Vergili, I., & Kaya, Y. (2017). Electrochemical treatment of carwash wastewater using Fe and Al electrode: Techno-economic analysis and sludge characterization, *Journal Environmental Management*, 200, 380–390, doi: 10.1016/j.jenvman.2017.06.005.

[10] Suprihatin. and Aselfa F. S. (2020). Pollutants removal in electrocoagulation of detergent wastewater, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Indonesia, Bogor, 472: 5-9, doi: 10.1088/1755-1315/472/1/012032.

[11] Langmuir, D. (1975). Issue paper on the environmental chemistry of metals, First edition. U.S. Environmental Protection Agency Risk Assessment Forum, Washington, DC, 42.

[12] Jing, G., Ren, S., Pooley, S., Sun, W., Kowalczuk, P. B., & Gao, Z. (2021). Electrocoagulation for industrial wastewater treatment: an updated review. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 7: 1177–1196, doi: 10.1039/ D1EW00158B.

[13] Shahedi, A., Darban, A. K., Taghipour, F., & Jamshidi-Zanjani, A. (2020). A review on industrial wastewater treatment via electrocoagulation processes. *Current Opinion Electrochemistry*, 22: 154–169, doi.: 10.1016/j.coelec.2020.05.009.

[14] Gusa, R. F., Sari, D. N., Afriani, F., Sunanda, W., & Tiandho, Y. (2020). Effect of electrode numbers in electrocoagulation of Batik Cual wastewater: Analysis on water quality and energy used, IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, Indonesia, Bangka Belitung Islands, 599: 1-4, doi: 10.1088/1755-1315/599/1/012061.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

[15] Dalvand, A., Gholami, M., Joneidi, A., & Mahmoodi, N. M. (2011). Dye Removal, Energy Consumption and Operating Cost of Electrocoagulation of Textile Wastewater as a Clean Process. *CLEAN - Soil Air Water*, 39: 665–672, doi: 10.1002/clen.201000233.

[16] Hashim, K. S., Khaddar, R., & Jasim, N. (2019). Electrocoagulation as a green technology for phosphate removal from river water. *Seperation Purification Technology*, 210: 135–144, doi: 10.1016/j.seppur.2018.07.056.

[17] İrdemez, Ş., Demircioğlu, N., Yıldız, Y. Ş., & Bingül, Z. (2006). The effects of current density and phosphate concentration on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation using aluminum and iron plate electrodes. *Seperation Purification Technology*, 52: 218–223, doi: 10.1016/j.seppur. 2006.04.008.

[18] Khan, S. U., Farooqi, I. H., Usman, M., & Basheer, F. (2020). Energy Efficient Rapid Removal of Arsenic in an Electrocoagulation Reactor with Hybrid Fe/Al Electrodes: Process Optimization Using CCD and Kinetic Modeling. *Water*, 12: 1-11, doi: 10.3390/w12102876.

[19] Nazari, M., & Ayati, B. (2018). Investigation of anionic surfactant removal using unipolar electro-flotation and electro-coagulation. *Journal of water and wastewater*, 29: 54–65.

[20] Baird, R. B,. Eaton, A. E,. & Rice, E. W. (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23RD edition. American public health association Washington, DC, 590.

[21] Aoudj, S., Khelifa, A., Drouiche, N., Hecini, M., & Hamitouche, H. (2010). Electrocoagulation process applied to wastewater containing dyes from textile industry. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49: 1176–1182, doi: 10.1016/j.cep.2010.08.019.

[22] Janpoor, F., Torabian, A., & Khatibikamal, V. (2011). Treatment of laundry waste-water by electrocoagulation. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 86: 1113–1120, doi: 10.1002/jctb.2625.

[23] Malakootian, M.,Yousefi, N., & Fatehizadeh, A. (2011). Survey efficiency of electrocoagulation on nitrate removal from aqueous solution. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 8: 107–114, doi: 10.1007/BF03326200.

Archive of SID.ir