استفاده از روش الکتروشیمیایی(EC) برای تیمار پساب صنایع خمیر و کاغذ

لاله جاوید[1]، الهام کشمیری‌زاد[2*]، احمد جهان لتیباری[3]، بهنام حافظی[4]

تاریخ دریافت مقاله: شهریور ماه۱۳۹۳
تاریخ پذیرش مقاله: دی ماه ۱۳۹۳

چکیده

مصرف روزافزون آب و کمبود منابع آب تازه در دسترس، استفاده مجدّد از پساب در صنایع برای تأمین بخشی از آب مورد نیاز صنعت را به موضوعی اجتناب‌ناپذیر تبدیل کرده است. تولید روز افزون محصولات کاغذی به خصوص مصرف روز افزون کاغذ در صنایع بسته‌بندی از خمیر چوب و همچنین بازیافت محصولات مصرف شدهٔ آن‌ها که پیامد آن ورود بخش دیگری از آلاینده‌ها به محیط زیست است، افزایش نگرانی‌ها را در رابطه با محیط زیست در پی داشته است. بدین منظور در پژوهش حاضر، پساب صنایع خمیر و کاغذ (مطالعه موردی: واحد حوضچه هضم پساب یک کارخانه کاغذ بسته‌بندی) با بهره‌گیری از روش الکتروشیمیایی(EC) مورد ارزیابی و تیمار قرار گرفت. تأثیر عوامل مختلف از جمله مقادیر COD، TDS و TSS و هدایت الکتریکی پساب بررسی گردید. نتایج نشان داد که در مدّت زمان ۳۰ دقیقه، مقدار COD باقی‌مانده در حجم ۵۰۰ میلی لیتر پساب، از ۹۸۵ به ۲۴۰ میلی‌گرم در لیتر کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی

روش الکتروشیمیایی[5](EC)، تیمار پساب و خمیر کاغذ.

۱- مقدمه

یکی از پساب‌های صنعتی که اساساً در آلودگی آب نقش به سزایی دارد، پساب حاصل از صنعت خمیر و کاغذ می‌باشد. صنایع کاغذسازی با وجود نیاز روز افزون به محصولات‌شان، در عین حال، یکی از بزرگ‌ترین صنایع در تولید فاضلاب‌های آلوده هستند. این پساب‌ها به علت دارا بودن ترکیبات مختلف از درختانی مانند لیگنین[6]، رزین و سایر آلاینده‌های پلیمری، علاوه بر رنگ بسیار شدید، به دلیل سمیّت بالا، روی زندگی موجودات آبزی به شدّت تأثیرگذار بوده و تبعات زیست محیطی سنگینی در پی-دارد[۱]. علاوه بر این، در زمینه افزودنی‌های شیمیایی بر پساب کارخانه‌جات تولید کاغذ و مقوای بازیافتی مجدداً مورد استفاده قرار می‌گیرد و برروی خواص فیزیکی و شیمیایی کاغذ و مقوا تأثیرگذار است، خواص فیزیکی این نوع کاغذ و مقواها در هنگام استفاده به عنوان بسته‌بندی دچار مشکلاتی می‌شوند و نمی‌توانند آنچه انتظار مصرف-کننده است(سالم رساندن کالا به مقصد، حفاظت و نگهداری کالا، زیبایی و دوام بسته) را برآورده کند و بر روی کیفیت کاغذهای تولیدی برای بسته‌بندی از نظر ظاهر، چاپ‌پذیری و مقاومت اثر دارد.

۱- گروه شیمی واحد کرج دانشگاه آزاد اسلامی کرج – ایران. (laleh_javid@yahoo.com)
۲- گروه شیمی واحد کرج دانشگاه آزاد اسلامی کرج - ایران. (* نویسنده مسئول: Ekeshmirizadeh@gmail.com)
۳- گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج- ایران.(Latibari.aj@gmail.com)
٤- گروه سلولزی و بسته‌بندی، پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، پژوهشگاه استاندارد. (Hafezi.b@standard.ac.ir)

5- Electro coagulation
6- Lignin

همچنین استفاده از پساب تصفیه نشده، باعث تولید محصول غیربهداشتی می‌شود و از آنجایی که بسته‌بندی معمولاً مستقیم در تماس با مصرف‌کننده است باعث ایجاد انواع بیماری نیز می‌گردد. در ضمن در بازیافت کاغذ، این موضوع اهمیت اقتصادی دارد. سامانه‌های تصفیه پساب صنعت خمیر و کاغذ، موضوع کاری بسیاری از محققان بوده که از دیرباز روش‌های مختلفی برای انجام آن به کار رفته است. تصفیه پساب شامل: تصفیه اولیه(تصفیه فیزیکی-شیمیایی)، ثانویه و پیشرفته می‌باشد[۲]. صنایع تولیدکننده خمیر کاغذ و بازیافت کاغذ در مصارف مختلف از جمله بسته‌بندی کاغذ به عنوان صنایع سلولزی[1]، یکی از پر مصرف‌ترین صنایع از لحاظ مصرف آب و در نتیجه یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان پساب صنعتی به‌شمار می‌آیند. فاضلاب این صنایع به دلیل وجود مواد آلی دیر تجزیه‌پذیر و پیچیده مانند سلولز و لیگنین اثرگذاری‌های نامطلوبی مانند افزایش رنگ، بو و اکسیژن خواهی(BOD^{2} و COD^{3}) در آب-های پذیرنده دارند و حیات آبزیان را به شدّت به مخاطره انداخته و تأثیرگذاری‌های سوئی مانند جهش‌زایی و انتشار مواد سرطان‌زا را به همراه دارند[۲ و ۳]. در صنعت خمیر و کاغذ کاهش آلودگی محیط زیست یک مسئله مدیریتی و فنی است و به طور ریشه‌ای، دو سازوکار برای رسیدن به این هدف، دنبال می‌شود. یکی از آن‌ها کاهش آلودگی از منبع است که با تغییر در فرآیندها می‌توان به گونه مؤثری حجم پساب خروجی این صنایع را کاهش داد. سازوکار دیگر، استفاده از تیمارهای مختلف تصفیه پساب است. بر این اساس، روش‌های مختلفی برای تیمار و تصفیه پساب مورد بررسی، آزمایش و اجرا قرار گرفته‌اند[٤].

یکی از راه‌های کاهش هزینه تصفیه پساب، کاهش تولید آن و در حقیقت کاهش و کنترل مصرف آب تازه می‌باشد که مطالعات زیادی پیرامون این موضوع انجام شده است. در عین حال، روش‌های متنوعی در تصفیه پساب خمیر کاغذ و کاغذسازی بکار گرفته شده که استفاده از هر کدام، بستگی به نوع ماده اولیه مصرفی، مواد شیمیایی افزودنی، نوع فرآیند و جنبه اقتصادی آن دارد. تخلیه بی‌رویه پساب‌های صنعتی، غیرصنعتی و کشاورزی در آب‌های سطحی، موجب مرگ و میر حیوانات آبزی به‌خصوص ماهی‌ها می‌گردد. متلاشی شدن اجساد همین حیوانات خود مزید بر علت، موجب آلودگی هر چه بیشتر می‌گردد. کارخانه‌های مجهّز به تصفیه‌خانه مناسب، بسیار محدود هستند. دلیل این که بسیاری از واحدها از این گونه سامانه‌ها استفاده نمی‌کنند، اینست که هیچ‌گونه نظارتی بر فعالیت‌های آن‌ها به شکل جدّی صورت نمی‌گیرد. بنابراین با شرایط اقتصادی نابسامانی که دارند و از آنجایی که اکثر کارخانجات در ظرفیت‌های پایین ظرفیت اسمی خود فعالیت عملی دارند، تمایلی برای سرمایه‌گذاری بیشتر نداشته و این سرمایه‌گذاری را نوعی هزینه کرد تلقی نموده و به توسعه این فرآیند رغبت نشان نمی‌دهند.

بنابراین تلاش بر اینست که روشی انتخاب شود که در حین عملکرد بالا، سرمایه‌گذاری پایینی نیاز داشته باشد. در سال‌های اخیر، بسیاری از محققین، پژوهش‌های متعدّدی را در رابطه با بررسی پساب صنایع خمیر کاغذ انجام داده‌اند. از آن جمله می‌توان به پژوهش رابی همت آبادی[4] (۲۰۱۲) اشاره کرد. محققین در پژوهش خود به بررسی قابلیت استفاده از فرآیند الکتروکواگولاسیون[5] با استفاده از الکترود[6]های آلومینیوم در کاهش TSS^{7} و COD پساب کارخانه بازیافت کاغذ پرداختند.

هدف از این بررسی، ارزیابی بازده کاهش TSS و COD از پساب صنعتی بازیافت کاغذ توسط فرآیند الکتروشیمیایی با استفاده از الکترود آلومینیوم بود. شاخص‌های مورد بررسی روی بازده فرآیند الکتروکواگولاسیون برای تیمار این پساب مورد بررسی قرار گرفت که شامل موارد ذیل می‌باشد:

1- Cellulose
2- Biological oxygen demand
3- Chemical oxygen demand
4- Hematabadi rabi
5- Electro coagulation
6- Electrod
7- Total solid solution

۱- زمان الکترولیز[1] (۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۶۰ دقیقه).

۲- pH نخستین پساب (۳، ۵، ۷,۵ و ۱۰).

۳- ولتاژ (۹ و ۱۲ ولت).

افزایش زمان الکترولیز سبب کاهش TSS و COD پساب شد. افزایش ولتاژ از ۹ به ۱۲ ولت به طور چشمگیری سبب کاهش TSS و COD پساب شد به‌طوری که میزان کاهش در ولتاژ ۱۲ برای TSS و COD به ترتیب ۹۹ و ۷۷ درصد بودند؛ اما این میزان کاهش در ولتاژ ۹ به ترتیب ۹۷ و ۳۳ درصد بودند.

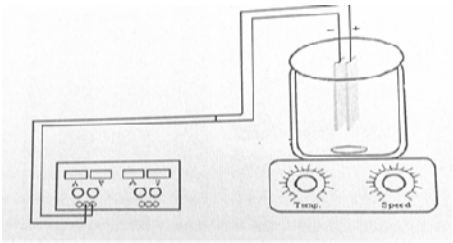
ویرا[2] و همکاران (۲۰۰۱)، برای حذف فلزات پساب صنعت خمیر و کاغذ روش اولترافیلتراسیون[3] را بکار گرفتند. در این بررسی از لیگاند[4] پلی‌مری پلی‌وینیل الکل[5] محلول در آب استفاده شد. نتایج نشان داد که افزودن پلی‌مر سبب کاهش سریع‌تر و بیشتر COD پساب می‌گردد.

همچنین یوگرولو[6] و همکاران (۲۰۰۷)، با استفاده از روش الکتروشیمیایی توانستند لیگنین و فنول[7] پساب کارخانه خمیر و کاغذ را به مقدار قابل توجّهی کاهش دهند. در این بررسی که از دو فلز آلومینیوم و آهن استفاده شده بود، بیشترین میزان کاهش آلودگی با استفاده از الکترود آلومینیوم در ولتاژ ۱۲ و شدّت جریان ۷۷/۱۳ mA به ترتیب ۸۰٪ لیگنین، ۹۸٪ فنول، ۷۰٪ BOD و ۷۵٪ COD بعد از گذشت ۷/۵ دقیقه به دست آمد. با توجّه به مرور انجام شده، اهمیت استفاده مجدّد از منابع آبی و بحث کمبود آب در کشور، استفاده از روش های نوین در بررسی، تصفیه پساب‌های صنعتی و بالاخص صنایع خمیر و کاغذ بازیافتی که نقش قابل توجّهی در صنایع بسته‌بندی دارند؛ ضروری به نظر می‌رسد.

1- Electrolys
2- Vieira
3- Ultrafiteracion
4- Ligand
5- Poly vinyl alcohol
6- Ugurlu
7- Phenol

۲- مواد و روش‌ها

روش الکترو کواگولاسیون در مقیاس آزمایشگاهی در آزمایشگاه صنعتی دانشگاه آزاد کرج و آزمایشگاه بسته‌بندی فلزی نیز در گروه پژوهشی سلولزی و بسته‌بندی سازمان ملّی استاندارد ایران انجام شده است. سلول الکتروشیمیایی مورد استفاده در این تحقیق، یک راکتور[8](بشر یک لیتری) می‌باشد در حالی که از حجم ۵۰۰ و در برخی موارد ۶۰۰ میلی‌لیتر از پساب حقیقی استفاده شده از الکترودهای متنوعی بهره‌گیری شده است(شکل ۱).



شکل ۱- تصویر شماتیک سلول الکتروشیمیایی

الکترودهای آلومینیومی(آلومینیوم خالص) با ابعاد ۳×۳ سانتی‌متر و به ترتیب با وزن ۰/۷۷۱۵ برای آند[9] و ۰/۷۶۰۵ برای کاتد[10]، الکترودهای آلومینیومی با ابعاد ۵×۳ سانتی‌متر و به ترتیب با وزن ۱/۲۷۰۶ گرم برای آند و ۱/۲۷۸۷ سانتی‌متر برای کاتد و نیز الکترودهای آلومینیومی معمولی با ۶×۴/۵ سانتی‌متر به ترتیب با وزن ۱۰/۷۲۶ برای آند و ۱۰/۰۱۱ گرم برای کاتد به عنوان الکترود در آزمایش مورد استفاده قرار گرفتند. در ادامه از محلول نمک با غلظت ۰/۵ مول بر لیتر به عنوان الکترولیت[11] استفاده شد و برای هر آزمایش ۵۰۰ میلی لیتر از پساب کارخانه خمیر و کاغذ در محفظه‌های آندی و کاتدی ریخته شد. به منظور بهبود انتقال جرم در سامانه، از یک پمپ مغناطیسی (SONSO, PMD-0311) استفاده شد تا الکترولیت را در راکتور به چرخش درآورد. یک منبع

8- Reactor
9- Anode
10- Cathode
11- Electrolyte

تنظیم برق DC (GPS-30300DD) برای تأمین برق DC خارجی بکار گرفته شد. منبع جریان DC برای ایجاد جریان مستقیم(EC) از منبع جریان مستقیم ساخت صنایع الکترونیک استفاده شده است(شکل ۲).

شکل ۲- منبع جریان برق مستقیم

برای قرار دادن الکترودها در داخل پساب یک بست چوبی با گیره فلزی طراحی شد(شکل ۳).

شکل ۳- بست طراحی شده برای الکترودها

برای کاهش زمان الکتروکواگولاسیون و افزایش راندمان از دستگاه مغناطیسی ساخت شرکت هیدآف[1] آلمان استفاده شده است (شکل ٤).

شکل ٤- دستگاه همزن استفاده شده در این مطالعه موجود در سازمان ملّی استاندارد

در طی انجام بررسی، ویژگی‌های پساب شامل COD کل،[2] TDS و TSS در فواصل زمانی بر طبق روش استاندارد[3] (APHA) ارزیابی و آنالیز[4] شد.

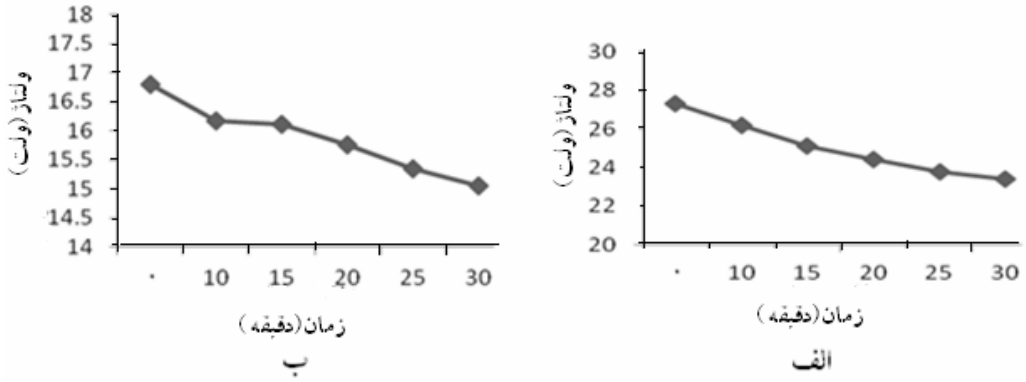
۳- نتایج و بحث

۳-۱- استفاده از روش الکتروشیمیایی

در گزینش روش تصفیه پساب‌های صنعتی باید نسبت به فرآیندی که منجر به تولید پساب می‌شود، شناخت کافی داشته و ویژگی پساب بخش‌های مختلف فرآیند را بررسی نمود و سپس در مورد روش مناسب تصفیه تصمیم گرفت. این مطلب در مورد صنایع بازیافت و تولید خمیر کاغذ بسیار مشهود است. تنوع زیاد فرآیندهای تولید و نوع ماده اولیه مصرفی، در صنایع خمیر و کاغذ سبب وجود ترکیبات پیچیده و آلاینده‌های متنوع در پساب می‌شود. این امر، سبب می‌شود که نتوان به آسانی پساب این صنایع را تصفیه کرد و خطرهای احتمالی آن‌ها را برای محیط زیست کاهش داد[۵]. از آنجا که فرآیند الکتروشیمیایی که در آن از سازوکار لخته‌شدگی(انعقاد) الکتریکی استفاده می‌شود، مورد توجّه بسیاری قرار گرفته است. این فرآیند به عنوان یک روش اقتصادی مؤثر و ساده که بدون عیب‌های ذکر شده در مقایسه با روش‌های معمول تصفیه می‌باشد، به طور موفقیت‌آمیزی برای بررسی انواع پساب‌های صنعتی بکار برده شده است[٦]، در این تحقیق، عبور جریان از الکترود آند سبب اکسید شدن آن و تولید یون‌های هیدروکسید[5] می‌شود که این یون‌ها قابلیت لخته‌کنندگی دارند. حرکت این یون‌ها در محلول، سبب ایجاد جذب سطحی مواد آلی یا آلودگی می‌شود. گاز هیدروژن آزاد شده در کاتد و همچنین اکسیژن آزاد شده در آند سبب ایجاد یک جریان رو به بالا می‌شود که این سبب حرکت ذرّات به روی سطح محلول می‌شود.

ایجاد پیوند بین ذرّه‌ها سبب چسبیدن ذرّه‌های لخته شده به هم می‌شود که جداسازی آن‌ها را از فاز آبی آسان می‌کند[۷].

1- Hidolf
2- Total disolve solid
3- American public health association
4- Analysis
5- Hydroxide

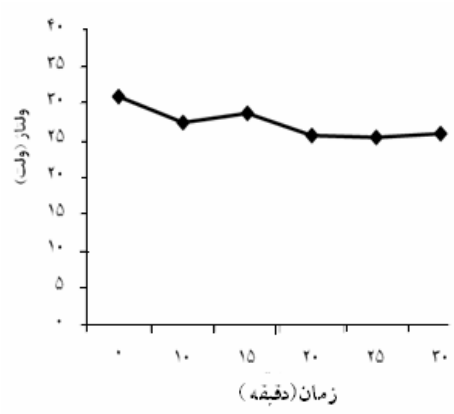


شکل ۵- تغییرات ولتاژ با گذشت زمان از قرارگیری الکترودها در نمونه پساب کارخانه خمیر و کاغذ، در شدّت جریان ۰/۸ آمپر (الف- الکترودهای ۵×۳ سانتی‌متری آلومینیوم خالص و ب- الکترودهای ۳×۳ سانتی‌متری آلومینیوم خالص)

۳-۲- بررسی اثر مهم‌ترین شاخص‌های عملیاتی

۳-۲-۱- اثر ولتاژ

بر اساس(شکل‌های ۵- الف، ۵- ب و ٦) مشاهده می‌گردد با گذشت زمان، ولتاژ سامانه برای الکترودهای آلومینیوم خالص به ابعاد ۵ سانتی‌متر مربع از ۱۷ (ولت) کاهش یافته و به ۱۵(ولت) می‌رسد. علت کاهش ولتاژ به خاطر ایجاد لایه مقاومتی بر روی سطح الکترودها است که ناشی از جذب سطحی آلاینده‌ها بر روی الکترود است. این اتفاق برای الکترود از آلومینیوم خالص برحسب سانتی‌متر مربع و همچنین الکترود آلومینیوم معمولی نیز روند کاهشی را نشان می‌دهد. تغییر و نوسان‌های شیمیایی، ناشی از واکنش انتقال الکترون از میان سطح مشترک محلول و الکترود می‌باشد. جریان الکتریکی از میان دو الکترود با صفحه‌های موازی عبور کرده و سبب اکسیداسیون[1] فلز به کاتیون[2] آن می‌شود. در واقع در این فرآیند، ولتاژ مورد استفاده بین دو الکترود در یک سلول واکنش را به پیش می‌برد. کاربرد روش الکتروشیمیایی برای کاهش مواد آلی آلوده‌کننده، برتری‌هایی شامل سازگاری با محیط زیست، استفاده مؤثر از انرژی، نیاز به تجهیزات ساده، آسانی و دوره کوتاه انجام کار و کاهش میزان لجن را نسبت به روش‌های شیمیایی، زیستی و دیگر روش‌ها دارد[۸].



شکل ٦- تغییرات ولتاژ برای سلول الکتروشیمیایی با الکترودهای آلومینیومی معمولی با ابعاد ٤/٥×٦ سانتی‌متر در طی انجام واکنش

در این تحقیق نیز کارایی فرآیند الکتروشیمیایی با استفاده از الکترودهای آلومینیومی در تصفیه پساب کارخانه بازیافت کاغذ بررسی شد که نتایج آن در ادامهٔ بحث آورده شده است.

۳-۲-۲- نتایج حاصل از استفاده الکترودهای آلومینیوم خالص

در این آزمایش، از دو نوع الکترود آلومینیوم خالص که به لحاظ ابعاد متفاوت بودند، برای بررسی اثر آن‌ها در فرآیند بررسی الکتروشیمیایی پساب کارخانه خمیر کاغذ استفاده گردید. دستهٔ اول الکترودها، آلومینیوم خالص با ابعاد ۳×۳ سانتی‌متر و دسته دوم الکترودهای آلومینیومی

1- Oxidation
2- Cationic

خالص با ابعاد ۵×۳ سانتی‌متر بودند[جذب اولیه و قبل از آزمایش هر یک از الکترودها در(جدول ۱) ارائه شده است].

حجم نمونه پساب مورد استفاده برای این آزمایش برای بررسی عملکرد هر دو دسته الکترودها، ۵۰۰ میلی‌لیتر بوده و نیز از نمک معمولی(NaCl) با غلظت ۰/۵ گرم بر لیتر به عنوان محلول الکترولیت در آزمایش آن‌ها استفاده شد.

همان‌گونه که در(شکل ۵ الف و ب) ملاحظه می‌گردد، در شدّت جریان عبوری ثابت ۰/۸۱ آمپر، با گذشت زمان از نقطه شروع(زمان صفر) تا نقطهٔ پایانی که همان ۳۰ دقیقه از گذشت آزمایش می‌باشد، ولتاژ ثبت شده به مرور زمان و به صورت منظم کاهش یافته است. همچنین بررسی وضعیت تغییرات جرم الکترودها نشان داد که پس از انجام آزمایش الکتروشیمیایی پساب با این الکترودها، جرم آند الکترودها اندکی کاهش داشته است و در مقابل جرم کاتدها مقدار کمی افزایش را نشان داد(جدول ۱) که روند منطقی آزمایش را نشان می‌دهد که با پیشروی واکنش، الکترود آند، اکسید شده و به خاطر خوردگی، کاهش وزن می‌یابد.

نکته دیگر اینکه بر اساس منحنی‌های(شکل ۵) که اختلاف پتانسیل برحسب زمان ثبت شده است، مشاهده می‌گردد که برای هر دو دسته الکترود با ابعاد مختلف، ولتاژهای متفاوتی باید اعمال گردد تا به حداکثر راندمان حذف برسد، یعنی مقادیر ولتاژ برای الکترودهای آلومینیوم خالص با ابعاد کوچک‌تر در محدوده ۲۴–۲۷ ولت و برای ابعاد بزرگ‌تر ۱۷–۱۵ ولت می‌باشد. بنابراین مشاهده می‌گردد هر چه در شرایط یکسان، الکترود کوچک‌تر استفاده شود، مصرف انرژی الکتریکی بیشتر خواهد بود. در بررسی الکتروشیمیایی با الکترودهای آلومینیوم خالص cm ۳×۳ و cm ۵×۳، مقادیر مربوط به خواص کیفی پساب از جمله تغییر pH پساب (pH قبل از بررسی الکتروشیمیایی و pH بعد از آن)، هدایت الکتریکی پساب، TDS و نیز COD اندازه‌گیری شدند که در(جدول ۲) به تفصیل نشان داده شده‌اند. بر اساس داده‌های به دست آمده، تغییر ابعاد الکترودهای آلومینیومی خالص، تأثیر قابل توجّهی بر هدایت الکتریکی و میزان کل مواد جامد حل شدهٔ پساب نداشته و تنها در مورد COD و pH اندکی تفاوت مشاهده می‌شود که مقدار COD اندازه‌گیری شده برای پساب بررسی شده با الکترودهای cm ۳×۳ نسبت به الکترودهای cm ۵×۳ اندکی کمتر شده و pH نیز از وضعیت تقریباً خنثی(pH=۶/۸) قبل از بررسی، به وضعیت قلیایی(pH=۸) بعد از بررسی تغییر یافته است که این نتیجه با نظریه الکتروکوآگولاسیون همخوانی تام دارد.

۳-۲-۳- استفاده از الکترودهای آلومینیومی معمولی و تأثیر آن بر ولتاژ با گذشت زمان آزمایش

در این بررسی از الکترودهای آلومینیوم معمولی که دارای ابعاد ۶×۴/۵ سانتی‌متر بودند، استفاده گردید. همچنین به مانند بررسی با الکترودهای آلومینیوم خالص، در این مورد نیز از حجم ۵۰۰ میلی لیتر نمونهٔ پساب کارخانه خمیر و کاغذ استفاده گردید تا اثر الکترودهای مذکور در فرآیند بررسی الکتروشیمیایی پساب مورد بررسی قرار گیرد. در این بررسی نیز محلول ۰/۵ مولار[1] نمک NaC_l به عنوان الکترولیت مورد استفاده قرار گرفت

جدول ۱- تغییرات جرم الکترودهای آند و کاتد آلومینیوم خالص قبل و بعد از بررسی الکتروشیمیایی پساب کارخانه خمیر و کاغذ

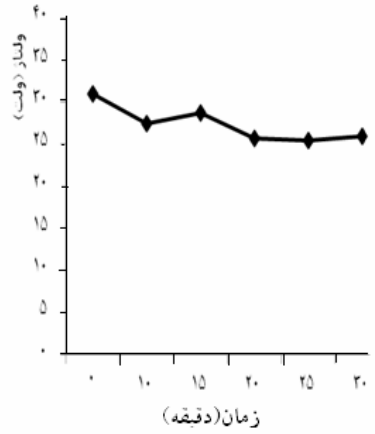
نوع الکترود (ابعاد)	جرم آند قبل از آمایش (gr)	جرم آند بعد از آمایش (gr)	جرم کاتد قبل از آمایش (gr)	جرم کاتد بعد از آمایش (gr)
آلومینیوم خالص cm ۳×۳	۰/۷۷۱۵	۰/۶۱۰۵	۰/۷۶۰۵	۰/۷۶۱۲
آلومینیوم خالص cm ۵×۳	۱/۲۷۰۶	۱/۱۱۸۴	۱/۲۷۸۷	۱/۲۷۹۱

1- Molar

جدول ۲- خواص کیفی نمونه پساب‌های کارخانه خمیر و کاغذ، پس از بررسی به روش EC با الکترودهای آلومینیوم خالص

الکترود	pH اولیه	pH بعد از آزمایش	Conductivity (ms/cm)	TDS	COD	٪حذف COD
۳×۳ cm	٦/۸	۷/۹-۸	۳/۲٤	۱٦۷۰	۳۱۹	٦۷
۳×٥ cm	٦/۸	۷/۹	۳/۲٤	۱٦۷۰	۳۹۳	٦۰

تا شدّت جریان الکتریکی در حین واکنش افت نکند. خاطر نشان می‌شود. این پساب مورد مطالعه چون خود از ابتدا دارای هدایت الکتریکی قابل توجّه بود، حتّی بدون افزودن NaC_l قادر بود که شدّت جریان الکتریکی را به راحتی هدایت کند. نتایج اکسیژن مورد نیاز شیمیایی قبل و بعد از آزمایش در حضور و بدون حضور الکترولیت نشان می‌دهد که نیازی به افزودن الکترولیت برای پساب مورد مطالعه ندارد. همان‌گونه که در(شکل ٦) ملاحظه می‌شود، بیشترین ولتاژ ثبت شده در این آزمایش برای نقطه شروع آزمایش یا همان نقطه زمانی صفر آزمایش می‌باشد که دارای ۳۰ ولت اختلاف پتانسیل است، با گذشت زمان از شروع بررسی الکتروشیمیایی تا حدود ۲۰ ساعت پس از شروع آزمایش ولتاژ کاهش یافته و از ساعت ۲۰ آزمایش به بعد، ولتاژ در مقدار ۲۵ ولت ثابت مانده و به همین ترتیب تا پایان آزمایش(۳۰ دقیقه آزمایش) ادامه می‌یابد.



شکل ٦- تغییرات ولتاژ برای سلول الکتروشیمیایی با الکترودهای آلومینیومی معمولی با ابعاد ٦×٤/٥ سانتی‌متر در طی انجام واکنش

آنچه در این آزمایش به وضوح مشاهده می‌شود، کاهش ولتاژ ثبت شده برای الکترودها می‌باشد که در شروع آزمایش در حداکثر مقدار خود(۳۰ ولت) بوده و تا حدودی از گذشت زمان آزمایش، روند کاهشی با شیب ملایم داشته و در دقیقه ۲۰ پس از شروع آزمایش، به وضعیت تقریباً پایداری رسیده و تا انتهای آزمایش در همان مقدار باقی می‌ماند؛ اما در رابطه با تغییر جرم الکترودهای مورد استفاده در این آزمایش، نتایج نشان داد در حالی که همانند آزمایش با الکترودهای آلومینیومی خالص، جرم آند اندکی کاهش یافته، جرم الکترود کاتد پس از انجام آزمایش تغییری نکرده و ثابت باقی مانده است(جدول ۳).

۳-۲-٤- استفاده از الکترودهای آلومینیومی معمولی و تأثیر آن بر ویژگی‌های پساب

در این تحقیق، نمونه پساب با حجم ٦۰۰ میلی لیتر مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور از شدّت جریان ثابت ۰/۸ آمپر استفاده شد و تأثیر آن بر شاخص‌های مختلف در رابطه با نمونه پساب بررسی شد. همان‌گونه که از(شکل ۷ الف ،ب و ج) ملاحظه می‌شود، بررسی الکتروشیمیایی نمونه پساب کارخانه خمیر و کاغذ، تأثیر قابل توجّهی بر ویژگی‌های پساب داشته است، به طوری که با انجام بررسی، و ضمن این که pH نمونه پساب از مقدار اولیه و اسیدی ۵ به pH قلیایی(pH= ۹) تغییر یافته، میزان COD نمونه پساب از ۹۸۵ میلی‌گرم در لیتر به مقدار ۲٤۰ میلی‌گرم در لیتر رسیده است(جدول ٤).

همچنین در رابطه با کدورت پساب نیز، بعد از بررسی

جدول ۳- تغییرات جرم الکترودهای آند و کاتد آلومینیوم معمولی، قبل و بعد از بررسی الکتروشیمیایی نمونه پساب کارخانه خمیر و کاغذ

نوع الکترود (ابعاد)	جرم آند قبل از آمایش (gr)	جرم آند بعد از آمایش (gr)	جرم کاتد قبل از آمایش (gr)	جرم کاتد بعد از آمایش (gr)
آلومینیوم خالص ٦×٤/٥ cm	١٠/٧٢٦	١٠/٥٦٤	١٠/٠١١	١٠/٠١١

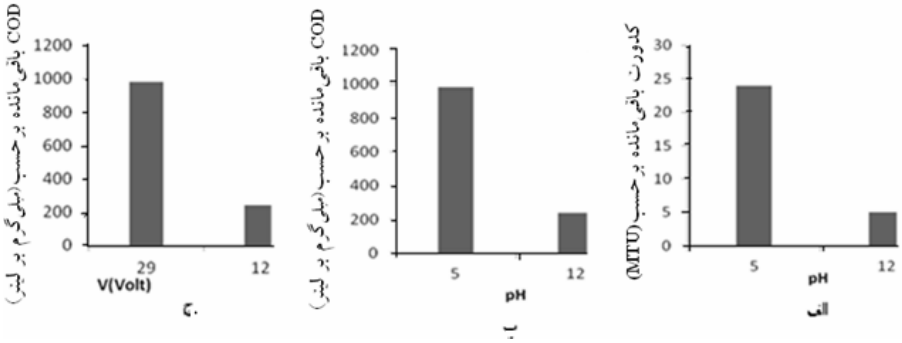
جدول ٤- خواص کیفی نمونه پساب‌های کارخانه خمیر و کاغذ، بعد از آمایش به روش EC با الکترودهای آلومینیوم معمولی

الکترود	pH اولیه	pH بعد از بررسی	هدایت الکتریکی (Ms/L)	TSS (mg/L)	COD	٪حذف COD
آلومینیوم معمولی با ابعاد ٦×٤/٥	٥	١٢	٣/٢	٥	٢٤٠	٧٥/٦

الکتروشیمیایی با الکترودهای آلومینیومی(معمولی) شاهد کاهش قابل ملاحظه کدورت نمونه پساب بودیم که از مقدار اولیه NTU ٢٤ به مقدار NTU ٥ کاهش یافت. اختلاف پتانسیل(ولتاژ) ثبت شده در این آزمایش نیز از مقدار اولیه ٢٩ با کاهش اندک به میزان ٢٨ ولت رسید. مقایسه بین مصرف انرژی الکتریکی سه نوع الکترود با هم در(جدول ٥) آورده شده است. ضمن این که pH اسیدی (pH=٥) نمونه پساب کارخانه خمیر و کاغذ بعد از انجام بررسی الکتروشیمیایی به وضعیت کاملاً قلیایی(pH=١٢) تغییر پیدا کرد.

٣-٢-٥- بهینه‌سازی مقدار شدّت جریان

در این مطالعه پس از انجام چند آزمایش با شدّت جریان‌های مختلف ٠/٥، ٠/٨و ١، آمپر با در نظر گرفتن این که افزایش شدّت جریان هم دارای عیب و هم دارای مزیت است(مزیت: هر چه شدّت جریان بیشتر باشد اکسیژن مورد نیاز شیمیایی کم‌تر می‌شود؛ عیب: هر چه شدّت جریان بیشتر باشد، مصرف انرژی الکتریکی بیشتر می‌شود)، بدین ترتیب شدّت جریان ٠/٨ آمپر به عنوان مناسب‌ترین شدّت جریان، انتخاب می‌گردد. نتایج ارزیابی و اندازه‌گیری خواص کیفی پساب بررسی شده با سیستم الکتروشیمیایی دارای الکترودهای آلومینیوم معمولی(ابعاد ٦×٤/٥ cm^2) نشان داد که COD باقی‌مانده در مقایسه با الکترودهای آلومینیوم خالص ٣×٣ cm و ٥×٣ cm، مقدار کم‌تری را نشان داده و pH نمونه پساب نیز از حالت خنثی قبل از بررسی (pH =٦/٨) به وضعیت قلیایی(pH=٨) بعد



شکل ٧- تغییرات خواص کیفی نمونه پساب کارخانه خمیر و کاغذ: (الف) مقادیر کدورت بر مبنای تغییر pH، (ب) COD باقی‌مانده بر مبنای تغییر pH و (ج) COD باقی‌مانده بر مبنای ولتاژ

جدول ۵- بررسی تغییرات مصرف انرژی الکتریکی بعد از آمایش به روش EC با الکترودهای آلومینیوم خالص و معمولی در شدّت جریان ثابت ۰/۸

نوع الکترود/ابعاد(cm^2)	ولتاژ V	زمان (ساعت)	مصرف انرژی الکتریکی E_1 EQ(4-3)) (KWh/L	مصرف انرژی الکتریکی برای نمونه E_2 EQ(4-4)) (KWh/L	%Typical Removal of COD
آلومینیوم معمولی با ابعاد ۶×۴/۵	۲۷/۵	۰/۱۶	۰/۷۰۴	۱/۲۲	۷۵/۶
	۲۵/۷	۰/۳۳	۱/۳۵۶		
	۲۵/۴	۰/۴۱	۱/۶۶۶		
آلومینیوم خالص با ابعاد ۳×۵	۱۶/۵	۰/۱۶	۱/۴۵۷۲	۰/۷۹	۶۰
	۱۵/۷	۰/۳۳	۰/۸۳۲		
	۱۵/۳۴	۰/۴۱	۱/۰۰۶		
آلومینیوم خالص با ابعاد ۳×۳	۲۷/۳	۰/۱۶	۱/۳۸۱	۰/۹۷	۶۷
	۲۶/۱۶	۰/۳۳	۱/۲۸۹		
	۲۴/۴۲	۰/۴۱	۱/۵۵۹		

از بررسی الکتروشیمیایی تغییر یافته است. تغییر قابل توجّهی در مقادیر سایر شاخص‌های کیفی پساب(از جمله TDS و هدایت الکتریکی) مشاهده نشد(جدول ٤).

۳-۲-٦- بررسی تغییرات مصرف انرژی الکتریکی

از نتایج ارائه شده در(جدول مقایسه‌ای ۵) مشاهده می‌گردد برای مقایسه مصرف انرژی الکتریکی در این کار پژوهشی با سایر مطالعات پیشین، تصمیم گرفته شد که از رابطه معتبر آیوپاک[1] نیز بهره‌گیری شود. با مقایسه شاخص‌های عملیاتی از جمله مقدار انرژی الکتریکی و زمان عملیات، می‌توان گفت که نتایج حاصل از این تحقیق، نسبت به کارهای پیشین کنچانا[2] (۲۰۱۲) از مزایای چشم‌گیری برخوردار است. جدول(٦) به تفصیل کلیه شاخص‌های بهینه شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. به عنوان نمونه، مصرف انرژی، زمان عملیات، سهولت دسترسی به الکترودهای ارزان و عدم نیاز به الکترولیت، از جمله مزایای به دست آمده در پژوهش حاضر است.

جدول ٦- مقایسه بین نتایج این تحقیق و تحقیقات پیشین

موارد آزمون	نتایج این تحقیق	نتایج تحقیق کانجانا،۲۰۱۲
E_1(KWh/L)=	۱	۸۴
E_{2IUPAC}(KWh/L)=	۱/۲	۳۶
Dos of NaCl(gr/L)=	۰	۲/۵
CODRemoval٪=	۷۸	۸۶
Type of electrods	Al/Al	TiO_2/RuO_2/steel
Time of reaction(h)	30(min)=0.5(h)	۸

٤- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی پساب صنایع تولیدکننده خمیر و کاغذ با بهره‌گیری از روش الکتروشیمیایی(EC) پرداخته شد. این روش به دلیل انطباق و سازگاری با محیط زیست اخیراً مورد توجّه قرار گرفته است. با مقایسه این روش با سایر روش‌های تصفیه سنتی، مزایای آن بیشتر آشکار می‌شود. از آن جمله می‌توان به تجهیزات ساده، بهره‌برداری آسان، زمان تصفیه کوتاه‌تر، مصرف انرژی الکتریکی بهینه، عدم نیاز به الکترولیت، کاهش استفاده از

1- Ayoupack
2- Kanchana

مواد شیمیایی افزودنی، تولید لجن کم‌تر و سرعت بالای رسوب لخته‌های منعقد شده اشاره کرد. در این مطالعه، مشخص شده روش الکترو کوآگولاسیون یک روش کارآمد برای حذف عواملی مانند COD,TDS,TSS و هدایت الکتریکی می‌باشد. همچنین این تحقیق در حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر پساب، میزان COD باقی مانده از ۹۸۵ به(mg/L) ۲۴۰ در مدّت زمان ۳۰ دقیقه کاهش یافت که این رویداد برای پساب‌های با حجم بیشتر نیز به خوبی قابل تعمیم است. همچنین در این تحقیق، هدف، استفاده مجدّد از آب بازیافتی مدنظر است. در این تحقیق بدون استفاده از الکترولیت و مقدار شدّت جریان(A) ۸۰/. آمپر به گونه‌ای بهینه تعیین شد تا انرژی الکتریکی مصرفی نیز به حداقل میزان برسد. از سوی دیگر در این تحقیق، از الکترودهای آلومینیوم که ارزان، مقرون به صرفه و دسترسی آسان دارند، استفاده شد در حالی که مطالعات پیشین از الکترودهای TiO_2/RuO_2 و استیل استفاده شده است. مقدار ولتاژ عملیاتی از حداکثر ۲۸ ولت تنظیم شد و مصرف انرژی الکتریکی E1=1 (KWh/L) و E2 AUPAC= 1.2 (KWh/L) بوده در حالی که در مطالعات پیشین E1=84 (KWh/L) و AUPAC= E2 (KWh/L)36 گزارش شده است.

با استفاده از این روش، می‌توان پساب تصفیه شده‌ای را در اختیار صنایع تولیدکننده کاغذ و مقوا قرار داد تا بتوانند مواد اولیه مناسب برای بسته‌بندی انواع کالاها را تولید کنند به طوری که هم اقتصادی بوده و هم از نظر بهداشتی مضر نباشد.

۵- منابع

1. Rastegarfar, N. 2011. Electrochemical treatment of black liquor from the pulping process soda tetrakinon. MS thesis. Tarbiat modarres university. 67 pages.

2. Ugurlua M., Gurses A., Dogar C., Yalcın M., 2007. "The removal of lignin and phenol from paper mill effluents by electrocoagulation". Journal of environmental management, 87(3), 420–428.

3. Ali, M., Sreekrishnan T.R., 2001. Aquatic toxicity from pulp and paper mill effluents: a review. Advances in environmental research. 5, 175–196.

4. H. Hematabadi1 and R. Behrooz. 2013. "Investigation of electro coagulation process on TSS and COD Removal from effluent of the paper recycling mill using al electrode". Iranian journal of wood and paper industries, Vol. 3, No. 2.

5. Ragunathan, R., and K. Swaminathan. 2004. "Biological treatment of a pulp and paper industry effluent by pleurotus spp". World journal of microbiology and biotechnology 20. (4): 389-393.

6. Daneshvar, N., Vatanpour, S.A., Rasoulifard, M.H., 2008. Electro-fenton treatment of dye solution containing orange II: Influence of operational parameters. electroanalytical chemistry, vol.615, 165-174.

7. Chen, G., 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment. separation and purification technology. 38, 11–41.

8. Vieira M, Tavares CR, Bergamasco R, Petrus JCC. 2001. "Application of ultrafiltration–complexation process for metal removal from pulp and paper industry wastewater". J Membr Sci; 194:273–6.

9. Mollah, M.Y.A., Schennach, R., Parga, J.R., Cocke, D.L., 2001. Electrocoagulation(EC) science and application. Hazardous materials. 84, 29–41.

آدرس نویسنده

گروه شیمی - کرج- دانشگاه آزاد اسلامی کرج- ایران.