

ارزیابی کارایی پلی آلومینیوم کلراید در حذف کدورت پساب کارخانه نورد گرم فولاد

محسن حبیبی^۱، محسن نوروزی مبارکه^{۲*}، عاطفه چمنی^۳ و لقمان چواه عبدالله^۴

چکیده

تصفیه پساب صنایع فولاد به عنوان یکی از مهم ترین صنایع و از طرفی پر مصرف ترین صنایع از نظر آب به خصوص به منظور استفاده مجدد از پساب مورد توجه است. یکی از مهم ترین و جدیدترین روش ها جهت تصفیه پساب صنعتی، روش انعقاد و لخته سازی است که می توان در آن راندمان فرآیند را با کنترل عوامل مختلفی نظیر دما، pH و زمان ماند و غلظت منعقدکننده، تا حد زیادی افزایش داد. در این مطالعه کارایی پلی آلومینیوم کلراید در حذف کدورت پساب شبیه سازی شده نورد گرم کارخانه فولادسازی در حضور متغیرهای مستقل pH، زمان همزدن، دما، غلظت روغن و مواد جامد معلق ارزیابی شد. آزمایشات انجام شده توسط نرم افزار Design expert 8، جهت طراحی آزمایش ها از روش طراحی مرکب مرکزی که متداول ترین نوع طراحی در روش رویه پاسخ است، استفاده شد. نتایج نشان داد افزایش ماده منعقدکننده پلی آلومینیوم کلراید تا حدود ۵ میلی گرم در لیتر، باعث افزایش راندمان حذف کدورت و در نتیجه کاهش مقدار کدورت به مقادیر کمتر از ۲۰ NTU که استاندارد کدورت آب مورد استفاده در فرآیند نورد است، شد. افزایش دما نیز از دمای ۲۷ تا ۵۵ درجه تغییر اندکی در بهبود راندمان حذف کدورت داشت. با توجه به نتایج طراحی آزمایش، مقادیر بهینه برای بدست آوردن بهترین راندمان حذف کدورت از پساب مورد مطالعه در صورتی است که دوز پلی آلومینیوم کلراید ۱ میلی گرم بر لیتر، مقدار مواد جامد معلق ۱۵۰۰ میلی گرم بر لیتر و زمان همزدن ۳۰ ثانیه بوده که در این صورت دامنه راندمان حذف کدورت ۵۱ تا ۶۲ درصد می باشد. این نتایج نشان داد pH، دما و مقدار روغن پارامترهای با اثرگذاری پایین تری بودند. در مجموع نتایج مطالعه حاضر بیانگر این است که اگر پلی آلومینیوم کلراید در یک غلظت بهینه به پساب اضافه گردد توانایی خوبی در حذف کدورت پساب دارد.

واژه های کلیدی: دما، روغن، زمان همزدن، کدورت، pH، غلظت منعقدکننده.

ارجاع: حبیبی م.، نوروزی مبارکه م.، چمنی ع. و چواه عبدالله ل. ۱۴۰۱. ارزیابی کارایی پلی آلومینیوم کلراید در حذف کدورت پساب کارخانه نورد گرم

فولاد. مجله پژوهش آب ایران. ۴۴: ۷۹-۸۷. DOI: <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2022.10016.2339>

۱- دانشجوی دکتری آلودگی محیط زیست، گروه محیط زیست، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۲- گروه محیط زیست، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۳- دانشیار گروه محیط زیست، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

۳- استاد تمام گروه مهندسی شیمی و محیط زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه یو پی ام، مالزی.

* نویسنده مسئول: mo5227@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۰

مقدمه

رشد جمعیت و صنعت در سال‌های اخیر، موجب بروز بحران کم آبی در بسیاری از کشورها شده است به‌طوری‌که قرن ۲۱ را قرن استرس آبی یا استرس هیدرولوژیک نامیده‌اند (سلمانی و همکاران، ۲۰۱۰). از آنجا که مشکل کم آبی علاوه بر ایجاد خطرات جدی برای انسان، عملکرد صنایع را نیز به شدت مختل می‌کند، استفاده بهینه از منابع آب جهت مصارف خانگی، صنعتی، کشاورزی و همچنین استفاده مجدد از پساب تصفیه شده بسیار حائز اهمیت است (کویست جنسن و همکاران، ۲۰۱۵؛ حسین و همکاران، ۲۰۱۶).

فاضلاب‌های صنعتی یکی از منابع آلاینده مهم و خطرناک محیط زیست بشمار می‌آیند که در صورت تخلیه بدون تصفیه یا تصفیه ناقص، صدمات جبران ناپذیری به سلامت اکوسیستم‌ها و سایر جانداران وارد می‌کنند (حجازی، ۲۰۱۳). پساب صنایع فولاد را می‌توان در زمره یکی از آلاینده‌ترین فاضلاب‌های صنعتی قلمداد کرد که علاوه بر غلظت بالای عناصر فلزی خطرناک، نیازمند حجم بسیار زیادی از آب برای خنک سازی مستقیم و غیر مستقیم فرآیند تولید است (افخمی و همکاران، ۱۳۹۴).

در فرآیند خنک‌سازی مستقیم خط تولید فولاد، آب مصرف شده آغشته به موادی از جمله اکسیدهای آهن و روغن هستند. برای تصفیه این پساب، ذرات جامد معلق با اندازه بیش از ۱۰۰ میکرومتر عموماً در حوضچه‌های ته‌نشینی رسوب می‌کنند، حال آن‌که انعقاد ذرات معلق کوچکتر و روغن با استفاده از روش‌های شیمیایی متنوعی صورت می‌گیرد (مدنی و همکاران، ۱۳۹۶). در کارخانجات فولادی بسته به نوع فرآیند، روش‌های مختلفی برای تصفیه پساب آن‌ها بکار گرفته می‌شود و در اکثر این روش‌ها مراحل آشغال‌گیری، متعادل‌سازی، ایستگاه پمپاژ، چربی‌گیری، انعقاد و لخته‌سازی، ته‌نشینی و فیلترشنی صورت می‌پذیرد. تفاوت در الزامات روش‌های شیمیایی مختلف و همچنین راندمان متفاوت آن‌ها باعث شده تا هم‌چنان تلاش‌های زیادی برای جایگزین کردن روش‌های مرسوم با روش‌های شیمیایی جدید و بهینه صورت بگیرد (دومینگز و همکاران، ۲۰۰۵).

یکی از مهم‌ترین و جدیدترین روش‌ها جهت تصفیه پساب صنعتی، روش انعقاد و لخته‌سازی است که می‌توان در آن راندمان فرآیند را با کنترل عوامل مختلفی نظیر دما، pH و

زمان ماند و غلظت منعقدکننده، تا حد زیادی افزایش داد (طاهریون و معماری‌پور، ۱۳۹۸).

لذا در این تحقیق سعی شده است روش جدیدی برای تصفیه پساب کارخانه فولادسازی معرفی شود که ضمن کاهش مراحل فوق و انجام تصفیه یک مرحله‌ای، مدت زمان تصفیه، انرژی مصرفی و همچنین هزینه این فرآیند را در مقایسه با تصفیه به روش مرسوم که در حال حاضر در کشور مورد استفاده قرار می‌گیرد، بهبود بخشد. این روش نو، شامل افزودن یک ترکیب از مواد شیمیایی لخته‌ساز و کمک لخته‌ساز به پساب حاوی مقدار زیادی جامدات معلق و روغن است که تحت شرایط نیروهای تنش ناشی از جریان متلاطم قرار دارد. چنین شرایطی باعث به‌وجود آمدن پیوند و چسبندگی بین ذرات کوچک و درشت و روغن می‌شود. این فرآیند فیزیکی- شیمیایی باعث حذف ذرات ریز به همراه ذرات درشت شده و عمده این ذرات در تانک ته‌نشینی اولیه ته‌نشین می‌شوند و امکان کاهش کدورت پساب به زیر عدد 20NTU (که استاندارد مورد استفاده در صنایع فولاد است)، وجود خواهد داشت (مارتینز و گوئیکوچیا، ۲۰۰۸).

مصطفی‌پور و همکاران (۱۳۸۷) در مطالعه‌ای به بررسی مقایسه‌ای کارایی منعقدکننده‌های سولفات آلومینیوم، کلراید فریک و پلی‌آلومینیوم کلراید در حذف کدورت از آب آشامیدنی پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش تعداد ذرات و افزایش احتمال برخورد بین آن‌ها برای تشکیل ذرات بزرگتر سرعت حذف کدورت را افزایش می‌دهد.

رحیمی و همکاران (۱۳۹۵) در مطالعه‌ای با هدف تعیین شرایط بهینه فرآیند انعقاد و لخته‌سازی با پلی‌آلومینیوم کلراید برای تصفیه فاضلاب صنعت لبنی نتیجه گرفتند با افزایش pH کارایی حذف به‌طور کلی افزایش پیدا می‌کند و این مقدار افزایش در حذف آلاینده‌ها تا pH برابر ۸ برای اکثر آلاینده‌های مورد بررسی به حدکثر مقدار خود می‌رسد.

در راستای مطالعات انجام شده، هدف از مطالعه حاضر ارزیابی کارایی پلی‌آلومینیوم کلراید در حذف کدورت (که در واقع بیانگر مقدار مواد جامد معلق پساب است) پساب شبیه‌سازی شده نورد گرم کارخانه فولادسازی، در حضور متغیرهای مستقل pH، زمان هم‌زدن، دما و روغن و مواد جامد معلق می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در تحقیق حاضر، از پساب شبیه‌سازی شده نورد گرم کارخانه فولاد صبا زاگرس واقع در استان چهارمحال و بختیاری استفاده شد. این کارخانه در سال ۱۳۹۳ و با هدف تولید و نورد شمش و میلگرد فولادی با ظرفیت ۳۰۰ هزار تن در سال احداث شد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی پساب مذکور با توجه به پارامترهای مد نظر این تحقیق در جدول ۱ ذکر شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی پساب فولاد

مشخصات	محدوده تغییرات در پساب
کدورت (NTU)	۵۵ - ۱۱۰
اکسیژن مورد نیاز شیمیایی	۱۲۵ - ۳۵۰
pH	۷ - ۷.۲
روغن (میلی گرم بر لیتر)	۱۲۵۰ - ۱۷۵۰
مواد جامد معلق (میلی گرم بر لیتر)	۱۶۵ - ۴۸۰

در این تحقیق متغیرهای مستقل مقدار مواد جامد، روغن، pH، مدت زمان هم‌زدن، دمای پساب شبیه‌سازی شده و همچنین دوز پلی آلومینیوم کلراید طبق شرایط زیر تهیه و تنظیم شد.

مقدار مواد جامد معلق: جهت بررسی تأثیر غلظت ذرات، دامنه تغییر این پارامتر از ۲۰۰ تا ۱۵۰۰ میلی گرم بر لیتر در نظر گرفته شد (ژو و همکاران، ۱۹۹۷). جهت تهیه این نمونه‌ها، ابتدا لجن تصفیه خانه نورد گرم جمع‌آوری شده و به‌منظور شبیه‌سازی پساب، ذرات جامد آن قبل از استفاده با حلال و مواد شوینده رفع آلودگی شدند. سپس با توجه به حجم پساب مورد استفاده در هر آزمایش، ذرات جامد به‌وسیله ترازوی دیجیتال اندازه‌گیری و به نمونه اضافه شد. بین کدورت و مواد جامد یک رابطه خطی قوی وجود دارد (هانوچ و همکاران، ۲۰۱۱).

مقدار روغن: جهت بررسی تأثیر غلظت روغن، دامنه تغییر این پارامتر از ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ میلی گرم بر لیتر در نظر گرفته شد (ژو و همکاران، ۱۹۹۷). جهت تهیه این نمونه‌ها، از روغن‌های مورد استفاده در کارخانه مذکور که اغلب شامل روانکارها می باشند استفاده شد. با توجه به حجم پساب در هر آزمایش جهت تهیه غلظت‌های مورد نیاز (۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ میلی گرم بر لیتر) روغن توسط سمپلر به‌منظور تهیه غلظت مورد نظر به پساب اضافه شد.

pH: برای بررسی تأثیر pH، دامنه تغییر این پارامتر از ۴ تا ۹ در نظر گرفته شد (یانگ و همکاران، ۲۰۱۰). جهت تهیه این نمونه‌ها، pH پساب توسط محلول‌های ۰/۱ مولار اسید کلریدریک و سود تنظیم شد.

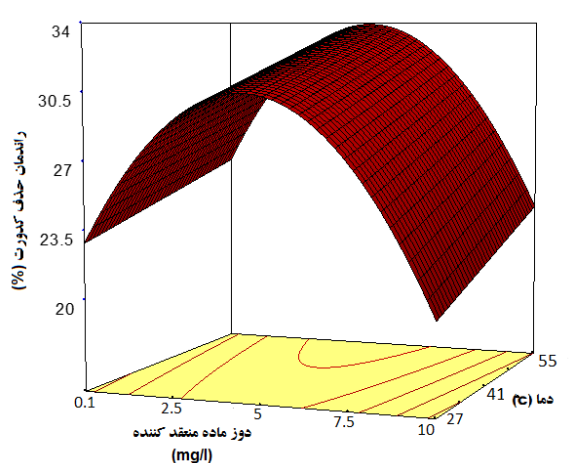
دما: با توجه به اینکه فرآیند نورد گرم در حرارت بالای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود دمای آب خنک‌کننده نیز بالا است و این دما تا حدود ۳۰ الی ۵۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. بنابراین در این تحقیق تأثیر دما در دامنه ۲۷ تا ۵۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. همچنین به‌منظور بررسی تأثیر دوز ماده منعقدکننده، دامنه تغییر این پارامتر از ۰/۱ تا ۱۰ میلی گرم بر لیتر در نظر گرفته شد (شر و همکاران، ۲۰۱۳). پلی آلومینیوم کلراید $(Al_n(OH)_mCl_{3n-m})$ به‌عنوان ماده منعقدکننده از شرکت سیگما آلدریج تهیه و مورد استفاده قرار گرفت. بدین ترتیب که ماده منعقدکننده را در بالن ۲۰۰ میلی-لیتر به وزن رسانده و محلول ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر از آن تهیه شد. سپس با توجه به دامنه تغییر پارامتر مذکور در تحقیق، در غلظت‌های ۰/۱ و ۱ و ۱۰ میلی گرم بر لیتر به پساب افزوده شد.

مقدار کدورت، دما، pH به‌ترتیب با استفاده از کدورت سنج آکوالیتیک آلمان مدل Al250T، دماسنج جیوه‌ای و دستگاه HACH دیجیتال مدل EC30 اندازه‌گیری شد. جهت هم‌زدن پساب شبیه‌سازی شده از همزن برقی با سرعت ۱۲۰ دور بر دقیقه به مدت صفر و ۳۰ ثانیه استفاده شد. آزمایشات انجام شده توسط نرم‌افزار Design expert 8 انجام شد. جهت طراحی آزمایش‌ها از روش طراحی مرکب مرکزی که متداول‌ترین نوع طراحی در روش رویه پاسخ است، استفاده شد. در آزمایش‌های متداول در صورتی که چند عامل مؤثر در یک فرآیند وجود داشته باشد، در هر نوبت از آزمایش، یکی از عوامل به‌صورت متغیر و سایر عوامل به‌صورت ثابت در نظر گرفته می‌شوند. این شکل از انجام آزمایش در صورت تعدد عامل‌ها و سطوح تعریف شده، ضمن ایجاد تعداد بسیار زیاد آزمایش، منجر به صرف هزینه و زمان زیادی خواهد شد. در چنین شرایطی استفاده از روش‌های طراحی آزمایش (Design of Experiment) تعداد آزمایش‌ها را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد. در این روش در متغیرهای ورودی فرآیند تغییراتی ایجاد می‌شود تا از این طریق مقدار تغییرات حاصل در پاسخ خروجی فرآیند مشاهده و

نتایج و بحث

شکل ۱ راندمان حذف کدورت در سطوح مختلف دما و پلی آلومینیوم کلراید را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱ در حضور دمای متغیر، افزایش مقدار پلی آلومینیوم کلراید تا حدود ۵ میلی گرم در لیتر، باعث افزایش راندمان حذف کدورت (تا ۳۴ درصد) و در نتیجه کاهش کدورت به مقادیر کمتر از ۲۰ NTU می‌شود. پس از آن، با افزودن مقادیر بیشتر پلی آلومینیوم کلراید راندمان حذف کدورت با شیب تندی کاهش پیدا می‌کند. افزایش دما نیز از دمای ۲۷ تا ۵۵ درجه تغییر اندکی در بهبود راندمان حذف کدورت و به تبع آن کاهش کدورت پساب مورد آزمایش داشت.

مطالعه آزمایشگاهی کاربرد پلیمر معدنی آلومینیوم در حذف کدورت آب توسط بنی هاشمی و همکاران انجام شد. در این مطالعه ماده منعقدکننده پلی آلومینیوم کلراید به دلیل سرعت ته نشینی بیشتر فاکتورهای حاصله، عدم حساسیت به دمای آب تصفیه شده، در حذف کدورت از آب مناسب‌تر از سولفات آلومینیوم و کلروفریک گزارش شد. این موضوع عملکرد مناسب پلی آلومینیوم کلراید را در درجه حرارت‌های متغیر آب در فصل تابستان و زمستان نشان می‌دهد (بنی هاشمی و همکاران، ۱۳۸۷). کاهش جزئی کدورت با افزایش دما می‌تواند به علت جنب و جوش ذرات و به تبع آن تماس ذرات افزایش پیدا کند و در نتیجه روند اتصال ذرات کلوئیدی و رسوب و ته نشست آن‌ها را افزایش می‌دهد.



شکل ۱- راندمان حذف کدورت در سطوح مختلف دما و پلی آلومینیوم کلراید

شناسایی شود. در این میان روش رویه پاسخ (Response Surface Methodology) یکی از بهترین روش‌های طراحی آزمایش بوده که از مهم‌ترین مزایای استفاده از این روش می‌توان به صرفه‌جویی در وقت و هزینه، قابلیت تعیین حالت بهینه برای هر پارامتر و نیز تهیه مدل رگرسیونی فرآیند مورد بررسی اشاره کرد (طاهریون و معماری‌پور، ۱۳۹۸).

متغیرهای مورد بررسی در این تحقیق شامل مقدار مواد جامد، مقدار روغن، pH، مدت زمان هم‌زدن و دما، که به ترتیب در ۲، ۲، ۳، ۲ و ۲ سطح مورد مطالعه قرار گرفت. آنالیز جارتست براساس روش استاندارد ASTM 2035 انجام شد و از ظروف استاندارد یک لیتری استفاده شد. آزمایش جار در واقع مدلی کوچک از واحدهای اختلاط سریع، انعقاد، لخته‌سازی و ته‌نشینی می‌باشد. بر این اساس از بشرهای ۱ لیتری استاندارد به عنوان ظروف آزمایش استفاده می‌شود. نمونه‌ها براساس برنامه آزمایش در سه سطح غلظتی از ماده منعقدکننده تهیه شده که با توجه به تغییر مواد جامد معلق در دو سطح ۲۰۰ و ۱۵۰۰ میلی گرم بر لیتر، روغن در غلظت‌های ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ میلی گرم در لیتر، دماهای ۲۷ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد، زمان هم‌زدن ۰ و ۳۰ ثانیه و اسیدیته‌های ۴ و ۷ و ۹ در مجموع تعداد ۱۴۴ آزمایش انجام شد. پس از انجام هر کدام از آزمایشات فوق ظروف از زیر دستگاه آزمایش جار خارج شده، میزان موردنیاز نمونه از حدود ۲ سانتی‌متر سطح ظرف توسط پیپت برداشته شده و جهت انجام آزمایش کدورت مورد استفاده قرار گرفت.

با استفاده از آنالیز واریانس مدل‌های ارائه شده برای پاسخ‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. در طراحی آزمایش به دلیل این‌که تنها بخشی از آزمایش‌ها انجام می‌شود، باید از نتایج اطمینان حاصل شود. آنالیز واریانس روش استاندارد آماری است که به بررسی کمی و کیفی داده‌ها پرداخته و میزان معنی‌دار بودن تأثیر هر عامل را بر پاسخ موردنظر بررسی می‌نماید. در این روش، تحلیل اطلاعات به صورت مستقیم انجام نمی‌گیرد، بلکه با تحلیل و بررسی تغییرات داده‌ها، درجه اطمینان محاسبه می‌شود. هدف اصلی از این آنالیز، استخراج واریانس هریک از عوامل نسبت به واریانس کل است (طاهریون و معماری‌پور، ۱۳۹۸).

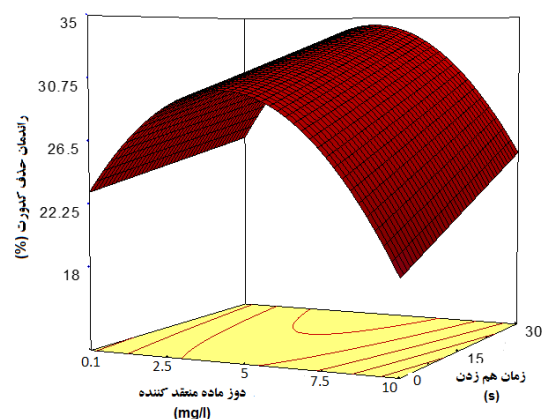
تغییرات دما و زمان هم‌زدن پساب از خود نشان داد. چنانچه در شکل ۳ نشان داده شده است، غلظت ۵ میلی گرم در لیتر پلی‌آلومینیوم کلراید به‌عنوان نقطه عطفی در افزایش و سپس کاهش بازدهی حذف کدورت به کمتر از ۲۳ درصد ایفا کرده است. همچنین نتایج نشان داد که افزایش pH محیط اثر مثبت و محسوسی بر کاهش کدورت داشته است.

pH محلول یکی از مهم‌ترین پارامترها در فرآیند انعقاد و حذف آلاینده‌ها از راه محلول‌های آبی است. فقط با استفاده از یک ماده منعقدکننده در pH مطلوب حذف اکثر آلاینده‌ها اتفاق می‌افتد. محققان تنها روش مطمئن برای تعیین محدوده pH مناسب در فرآیند انعقاد و لخته‌سازی را روش آزمون و خطا و استفاده از نتایج آزمایشگاهی معرفی نموده‌اند (ال-ناس و همکاران، ۲۰۱۰). در این تحقیق افزایش pH در حضور منعقدکننده پلی‌آلومینیوم کلراید اثر مثبت و محسوسی را بر کاهش کدورت پساب داشته است که در مقایسه با سایر پارامترهای مورد بررسی کمتر می باشد. با توجه به تأثیر اندک قلیائیت بر کارایی این منعقدکننده به احتمال زیاد مکانیسم حذف ذرات کلوییدی به روش انعقاد جارویی و جذب سطحی و خنثی‌سازی بار خواهد بود (کوپریواناک و همکاران، ۲۰۰۹). حذف آلاینده‌ها در محدوده pH قلیایی احتمالاً به‌علت واکنش با یون‌های هیدروکسید که تشکیل لخته‌های هیدروکسید می‌دهند، می‌باشد (چو ۲۰۰۱؛ قربانیان و همکاران، ۲۰۱۵). رحیمی و همکاران (۱۳۹۵) در مطالعه‌ای با هدف تعیین شرایط بهینه فرآیند انعقاد و لخته‌سازی با پلی‌آلومینیوم کلراید برای تصفیه فاضلاب صنعت لبنی نتیجه گرفتند با افزایش pH کارایی حذف به‌طور کلی افزایش پیدا می‌کند و این مقدار افزایش در حذف آلاینده‌ها تا pH برابر ۸ برای اکثر آلاینده‌های مورد بررسی به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

طبق نتایج شکل ۴ با افزایش مقدار روغن، کدورت کاهش پیدا کرده است، درحالی‌که با افزایش دوز پلی‌آلومینیوم کلراید تا حدود ۵ میلی گرم در لیتر، مقدار کدورت در ابتدا کاهش یافته و با افزایش ماده منعقدکننده به مقادیر بیشتر از ۵ میلی گرم بر لیتر، مقدار کدورت با شیب تند افزایش پیدا کرده است. بررسی تأثیر متقابل مقدار روغن پساب و مقدار پلی‌آلومینیوم کلراید نشان داد در مقادیر بالای پلی‌آلومینیوم کلراید، افزایش مقدار روغن منجر به کاهش

چنان‌که در شکل ۲ نشان داده شده است، با افزایش مدت زمان هم‌زدن پساب، راندمان حذف کدورت افزایش می‌یابد یا به عبارتی مقدار کدورت کاهش پیدا کرده است. افزایش دوز پلی‌آلومینیوم کلراید تا حدود ۵ میلی گرم در لیتر، باعث افزایش راندمان حذف کدورت (تا ۳۵ درصد) و در نتیجه کاهش کدورت به مقادیر کمتر از ۲۰ NTU شد. اما با افزایش پلی‌آلومینیوم کلراید به بیش از ۵ میلی گرم در لیتر، حذف کدورت کاهشی چشمگیر داشته و به زیر ۲۰ درصد رسید. تأثیر متقابل مدت زمان اختلاط و مقدار پلی‌آلومینیوم کلراید نشان داد در مقادیر بالای پلی‌آلومینیوم کلراید و افزایش مدت زمان هم‌زدن، بازده حذف کدورت به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

در واقع هم‌زدن بیشتر به مفهوم توزیع بهتر ماده منعقدکننده در نقاط مختلف، به ویژه نقاط کور است و در این حالت سرعت واکنش بیشتر و روند اتصال ذرات کلوییدی و ته نشینی آن‌ها بیشتر می‌شود. افزایش زمان هم‌زدن منجر به افزایش تماس ذرات و کلوییدی شدن آن‌ها و نهایتاً کاهش کدورت می‌شود. مصطفی‌پور و همکاران (۱۳۸۷) در مطالعه‌ای به بررسی مقایسه‌ای کارایی منعقدکننده‌های سولفات آلومینیوم، کلراید فریک و پلی‌آلومینیوم کلراید در حذف کدورت از آب آشامیدنی پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش تعداد ذرات و افزایش احتمال برخورد بین آن‌ها برای تشکیل ذرات بزرگتر سرعت حذف کدورت را افزایش می‌دهد که این نتیجه همسو با نتایج به‌دست آمده در این تحقیق می‌باشد.



شکل ۲- راندمان حذف کدورت در سطوح مختلف زمان هم‌زدن و پلی‌آلومینیوم کلراید

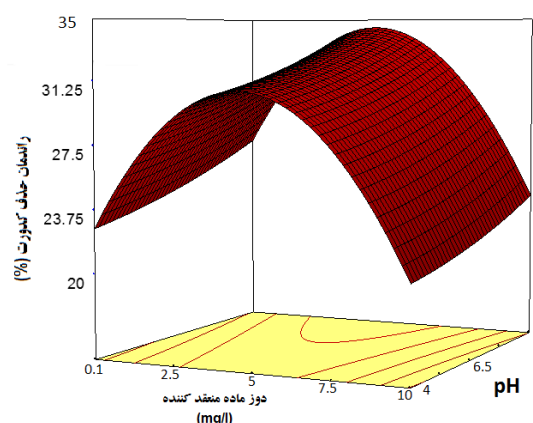
راندمان حذف کدورت در غلظت‌های مختلف پلی‌آلومینیوم کلراید و سطوح مختلف اسیدیته نیز روند مشابهی با

۲۰۱۰). با اضافه کردن دوز زیادی از ماده منعقدکننده بار سطحی ذرات به علت جذب پیوسته گونه‌های هیدرولیز مونو پلی هسته‌ای منعقدکننده معکوس می‌شود. هنگامی که ذرات مثبت کلوئیدی به‌طور مثبت باردار می‌شوند دیگر قابل حذف طی پروسه‌های لخته‌سازی نیستند (ورما و همکاران، ۲۰۱۰).

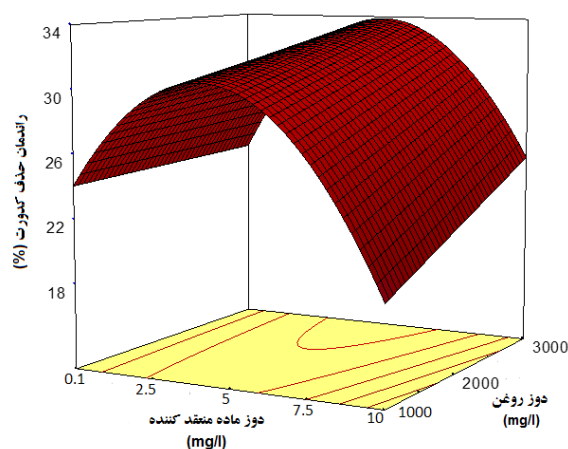
دوز ماده منعقدکننده یکی از پارامترهای مهم به‌منظور تعیین شرایط بهینه عملکرد در انعقاد و لخته‌سازی می‌باشد. اساساً، دوز ناکافی و یا دوز بیش از حد منجر به عملکرد ضعیف تشکیل لخته شود. بنابراین، تعیین مقدار بهینه برای به حداقل رساندن هزینه و شکل‌گیری لجن و همچنین برای به‌دست آوردن عملکرد مطلوب در تصفیه مهم است (سرکار و همکاران، ۲۰۰۶). ناطقی و همکاران (۲۰۱۱) بیان کردند افزایش دوز منعقدکننده تا مقداری بالاتر از مقدار بهینه، سبب پایداری مجدد کلوئیدها می‌شود. پلی آلومینیوم کلراید از لحاظ ترکیب یک ماکرو مولکول معدنی است که مونومرهای آن یک کمپلکس دو هسته‌ای از آلومینیوم می‌باشد. این ترکیب در محیط آبی تشکیل کمپلکس‌های چند هسته‌ای می‌دهد. پلی آلومینیوم کلرایدها، عملیات ناپایداری را از طریق جذب در سطح ذره کلوئیدی و پل‌سازی انجام می‌دهند. بنابراین نمک‌های پلی آلومینیوم کلرایدی فلزی نظیر پلی آلومینیوم کلراید می‌توانند ناپایداری فوق را به صورت توأم انجام دهند که در این صورت عملیات ناپایداری سریع‌تر و جداسازی بهتر انجام خواهد شد افزایش بیش از این مقدار باعث افزایش بار مواد کلوئیدی شده و پایداری مجدد کلوئیدها به وجود می‌آید (مصطفی‌پور و همکاران، ۹۵). در جدول ۲ نتایج آنالیز واریانس مدل درصد حذف کدورت ارائه شده است.

در این مدل جمله‌هایی که مقدار p آن‌ها کوچکتر از ۰/۰۵ است در مدل اهمیت بیشتری دارند. با توجه به نتایج جدول ۲ تمام جمله‌های خطی و برخی از جمله‌های برهم‌کنش درجه ۲ با توجه به اینکه میزان p آن‌ها کوچکتر از ۰/۰۵ است بر روی مدل تاثیرگذار هستند.

کدورت می‌شود، در حالی که در مقادیر پایین پلی آلومینیوم کلراید، افزایش روغن تاثیری در کاهش کدورت ندارد. در مقادیر بالای روغن، افزایش دوز پلی آلومینیوم کلراید تا پنج میلی گرم در لیتر منجر به کاهش کدورت می‌شود و با افزایش بیشتر دوز ماده منعقدکننده، مقدار کدورت افزایش پیدا می‌کند. همچنین این الگو در مقادیر پایین روغن نیز اتفاق می‌افتد.



شکل ۳- راندمان حذف کدورت در سطوح مختلف pH و پلی آلومینیوم کلراید



شکل ۴- راندمان حذف کدورت در سطوح مختلف روغن و پلی آلومینیوم کلراید

داود و همکاران (۲۰۱۵) حذف روغن را از پساب بیودیزل با استفاده از پروسه‌های انعقاد و لخته‌سازی بررسی کردند. نتایج نشان داد پروسه حذف روغن با افزایش دوز پلی آلومینیوم کلراید تا یک مقدار بهینه افزایش یافته و سپس مقدار حذف کاهش پیدا می‌کند. علت این امر پایداری ذرات کلوئیدی به‌علت استفاده بیش از حد پلی آلومینیوم کلراید ذکر شده است (آیگان و ایلماز،

جدول ۲- جدول نتایج تحلیل واریانس مدل درصد حذف کدورت

مقدار P	مقدار F	متوسط مجموع مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	منبع
< ۰/۰۰۰۱	۲۰/۰۸	۱۶۱۶/۷۱	۳۰	۴۸۵۰۱/۳۵	مدل
۰/۰۵۶۳	۳/۶۸	۲۹۶/۰۳	۱	۲۹۶/۰۳	پلی آلومینیوم کلراید-A
< ۰/۰۰۰۱	۳۰/۳۰	۲۴۳۹/۰۳	۱	۲۴۳۹/۰۳	مواد جامد معلق-B
۰/۰۰۳۶	۸/۶۳	۶۹۴/۶۴	۱	۶۹۴/۶۴	روغن-C
۰/۰۰۰۳	۱۳/۲۸	۱۰۶۸/۷۴	۱	۱۰۶۸/۷۴	دما-D
< ۰/۰۰۰۱	۱۶/۰۵	۱۲۹۲/۳۷	۱	۱۲۹۲/۳۷	زمان همزدن-E
۰/۰۰۸۳	۷/۰۸	۵۶۹/۸۷	۱	۵۶۹/۸۷	F-pH
۰/۱۶۵۸	۱/۹۳	۱۵۵/۴۷	۱	۱۵۵/۴۷	AB
۰/۰۱۷۱	۵/۷۶	۴۶۳/۸۲	۱	۴۶۳/۸۲	AC
۰/۶۸۹۴	۰/۱۶۰۱	۱۲/۸۹	۱	۱۲/۸۹	AD
۰/۰۹۴۲	۲/۸۲	۲۲۷/۲۱	۱	۲۲۷/۲۱	AE
۰/۷۳۸۵	۰/۱۱۱۷	۸/۹۹	۱	۸/۹۹	AF
۰/۷۵۵۴	۰/۰۹۷۳	۷/۸۳	۱	۷/۸۳	BC
< ۰/۰۰۰۱	۱۹/۵۴	۱۵۷۳/۰۱	۱	۱۵۷۳/۰۱	BD
۰/۰۰۰۳	۱۳/۳۰	۱۰۷۰/۸۸	۱	۱۰۷۰/۸۸	BE
۰/۰۵۲۳	۰/۱۶۷۷	۱۳/۵۰	۱	۱۳/۵۰	BF
۰/۰۵۴۵	۳/۷۳	۱۵/۳۱	۱	۱۵/۳۱	CD
۰/۳۷۷۱	۰/۷۸۲۸	۶۳/۰۲	۱	۶۳/۰۲	CE
۰/۰۳۵۸	۴/۴۵	۳۵۸/۵۵	۱	۳۵۸/۵۵	CF
۰/۰۰۵۲	۷/۹۶	۶۴۰/۷۳	۱	۶۴۰/۷۳	DE
۰/۵۷۸۵	۰/۳۰۹۴	۲۴/۹۱	۱	۲۴/۹۱	DF
۰/۹۵۶۸	۰/۰۰۲۹	۰/۲۳۷۰	۱	۰/۲۳۷۰	EF
۰/۰۱۵۹	۵/۸۹	۴۷۴/۲۱	۱	۴۷۴/۲۱	A ²
۰/۷۴۱۳	۰/۱۰۹۲	۸/۷۹	۱	۸/۷۹	F ²
		۸۰/۵۰	۲۵۷	۲۰۶۸۹/۰۲	باقیمانده

نتیجه گیری

در مطالعه حاضر به ارزیابی کارایی ماده پلی آلومینیوم کلراید در حذف کدورت پساب شبیه سازی شده نورد گرم کارخانه فولاد پرداخته شد. متغیرهای مورد بررسی در این مطالعه pH، زمان همزدن، دما، روغن، مواد جامد معلق و غلظت پلی آلومینیوم کلراید بوده که آزمایش های مربوط به آن توسط روش رویه پاسخ توسط نرم افزار Design expert 8 انجام شد. نتایج نشان داد در حضور دمای متغیر، افزایش دوز پلی آلومینیوم کلراید تا حدود ۵ میلی گرم در لیتر، باعث افزایش راندمان حذف کدورت (تا

۳۴ درصد) و در نتیجه کاهش کدورت به مقادیر کمتر از ۲۰ NTU که استاندارد کدورت آب مورد استفاده در فرآیند نورد می باشد، می شود. پس از آن، راندمان حذف کدورت با شیب تندی کاهش پیدا می کند. افزایش دما نیز از دمای ۲۷ تا ۵۵ درجه تغییر اندکی در بهبود راندمان حذف کدورت داشته است. با افزایش مدت زمان اختلاط پساب، راندمان حذف کدورت افزایش می یابد اما با افزایش دوز پلی آلومینیوم کلراید به بیش از ۵ میلی گرم در لیتر، راندمان حذف کدورت کاهشی چشم گیر داشته و به زیر ۲۰ درصد می رسد. تأثیر متقابل مدت زمان همزدن و دوز

۳. رحیمی س.، علیزاده م.، مصطفی پور ف. بذرافشان ا. و حسینزاده ا. ۱۳۹۵. شرایط بهینه فرآیند انعقاد و لخته سازی با پلی آلومینیوم کلراید در تصفیه فاضلاب صنایع لبنی. مجله علمی-پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی سبزوار. ۲۳(۱): ۴۸-۵۷.

۴. طاهریون م. و معماری پور ع. ۱۳۹۸. ارزیابی فرآیند انعقاد و لخته سازی در حذف فلزات سنگین از پساب شیمیایی مجتمع فولاد مبارکه. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست. ۲۱(۶): ۴۶-۶۰.

۵. مدنی س.، ملماسی س. و نزاکتی اسماعیلزاده ر. ۱۳۹۶. ارزیابی اثرات زیست محیطی کارخانجات فولاد با استفاده از روش RIAM اصلاح شده، مطالعه موردی: فولاد تيام در استان گیلان. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست. ۱۹(۴): ۴۰۹-۴۲۱.

۶. مصطفی پور ف.، احمدی ش.، بلارک د. و رهدار س. ۱۳۹۵. مقایسه عملکرد فرایند شناورسازی با هوای محلول در حذف آنیلین و پنی سیلین G از محیط های آبی. مجله پزشکی بالینی ابن سینا. ۲۳(۴): ۳۶۰-۳۶۹.

۷. مصطفی پور ف. بذرافشان ا. و کمائی ح. ۱۳۸۷. بررسی مقایسه ای کارایی منعقدکننده های سولفات آلومینیوم، کلراید فریک و پلی آلومینیوم کلراید در حذف کدورت از آب آشامیدنی. مجله تحقیقات علوم پزشکی زاهدان (طیب شرق). ۱۰(۱): ۱۷-۲۵.

8. Aygun A. and Yilmaz T. 2010. Improvement of coagulation-flocculation process for treatment of detergent wastewaters using coagulant aids. International Journal. 1(2): 97-101.
9. Chu W. 2001. Dye removal from textile dye wastewater using recycled alum sludge. Water Research. 35(13): 3147-52.
10. Daud Z. Awang H. Nasir N. Ridzuan M.B. and Ahmad Z. 2015. Suspended solid, color, COD and oil and grease removal from biodiesel wastewater by coagulation and flocculation processes. Procedia-Social and Behavioral Sciences. 195: 2407-2411.
11. Dominguez J. R. Beltran de Heredia J. Gonzalez T. and Sanchez-Lavado F. 2005. Evaluation of ferric chloride as a coagulant for cork processing wastewaters. Influence

پلی آلومینیوم کلراید نشان می دهد در مقادیر بالای پلی آلومینیوم کلراید و افزایش مدت زمان هم زدن، بازده حذف کدورت به بیشترین مقدار خود می رسد. راندمان حذف کدورت در غلظت های مختلف پلی آلومینیوم کلراید و سطوح مختلف pH نیز روند مشابهی با تغییرات دما و زمان هم زدن پساب از خود نشان داد. همچنین نتایج نشان داد که افزایش pH اثر مثبت و محسوسی بر کاهش کدورت داشته است. با توجه به نتایج طراحی آزمایش، مقادیر بهینه برای بدست آوردن بهترین راندمان حذف کدورت از پساب مورد مطالعه در صورتی است که دوز پلی آلومینیوم کلراید ۱ میلی گرم بر لیتر، مقدار مواد جامد معلق ۱۵۰۰ میلی گرم بر لیتر و زمان هم زدن ۳۰ ثانیه باشد که در این صورت دامنه راندمان حذف کدورت ۵۱ تا ۶۲ درصد می باشد. این نتایج نشان داد pH، دما و مقدار روغن پارامترهای با اثرگذاری پایین تری می باشند. در مجموع نتایج مطالعه حاضر نشان داد پلی آلومینیوم کلراید اگر در یک غلظت بهینه به پساب اضافه گردد توانایی خوبی در حذف کدورت پساب دارد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان در پایان بر خود لازم می دانند از همکاری ها و زحمات کارشناسان بخش ایمنی، بهداشت و محیط زیست کارخانه صبا فولاد، اساتید گروه محیط زیست دانشگاه شهرکرد و کارشناسان آزمایشگاه اداره کل حفاظت محیط زیست استان چهارمحال و بختیاری تقدیر و تشکر به عمل آورند. این مقاله مستخرج از رساله دکتری دانشگاه آزاد واحد اصفهان (خوراسگان) می باشد.

منابع

۱. افخمی ر. فروتن ف. سعادت ا. و میرمحمد صادقی ح. ۱۳۹۴. بررسی فاضلاب های صنعتی در صنایع فولاد. همایش ملی مصرف بهینه آب در صنعت چالش ها و راهکارها. آبان ۱۳۹۴. دانشگاه اصفهان. ۱۰ ص.
۲. بنی هاشمی آ. علوی مقدم م. مکنون ر. و نیک آذر م. ۱۳۸۷. مطالعه آزمایشگاهی کاربرد پلیمر معدنی آلومینیوم در حذف کدورت از آب. مجله آب و فاضلاب. ۱۹(۲): ۸۲-۸۶.

- Environmental Chemical Engineering. 1(4): 684-689.
24. Verma S. Prasad B. and Mishra I. M. 2010. Pretreatment of petrochemical wastewater by coagulation and flocculation and the sludge characteristics. *Journal of Hazardous materials*. 178(1-3): 1055-1064.
 25. Yang Z. L. Gao B. Y. Yue Q. Y. and Wang Y. 2010. Effect of pH on the coagulation performance of Al-based coagulants and residual aluminum speciation during the treatment of humic acid-kaolin synthetic water. *Journal of Hazardous Materials*. 178(1-3): 596-603.
 26. Zhu X. Reed B. E. Lin W. Carriere P. E. and Roark G.A.R.Y. 1997. Investigation of emulsified oil wastewater treatment with polymers. *Separation science and technology*. 32(13): 2173-2187.
 - of the operating conditions on the removal of organic matter and settle ability parameters. *Industrial & engineering chemistry research*. 44(17): 6539-6548.
 12. El-Naas M. H. Al-Zuhair S. and Alhaija M. A. 2010. Reduction of COD in refinery wastewater through adsorption on date-pit activated carbon. *Journal of hazardous materials*. 173(1):750-757.
 13. Ghorbanian M. Mosavi S. G. and Hosseini Z. 2015. Investigating the removal of high turbidity from water by electrocoagulation. *Journal of Sabzevar University of Medical Sciences*. 22(1): 7-16.
 14. Hannouche A. Chebbo G. Ruban G. Tassin B. Lemaire B. J. and Joannis C. 2011. Relationship between turbidity and total suspended solids concentration within a combined sewer system. *Water Science and Technology*. 64(12): 2445-2452.
 15. Hegazi. 2013. Removal of heavy metals from wastewater using agricultural and industrial wastes as adsorbents, *HBRC Journal*. 9(3): 276-282.
 16. Hussein J. Mukhtar D. A. and Mukhlis H. M. 2016. Demineralized Drinking Water in Local Reverse Osmosis Water Treatment Stations and the Potential Effect on Human Health. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 4: 104-110.
 17. Koprivanac N. and Kusic H. 2009. Hazardous organic pollutants in colored wastewaters: Nova Science Publishers Hauppauge.
 18. Martinez S. and Goicoechea I. 2008. Development of a water treatment plant for a rolling-mill train. Zaragoza.
 19. Nateghi R. Assadi A. Bonyadinejad G.R. and Safa S. 2011. Effectiveness of coagulation process in removing reactive blue 19 dye from textile industry wastewater. *Journal of Color Science and Technology*. 5: 235-242.
 20. Quist-Jensen C. A. Macedonio F. and Drioli E. 2015. Membrane technology for water production in agriculture: Desalination and wastewater reuse. *Desalination*. 364:17-32.
 21. Salmani M. Toorani A. and Khorasani M. 2010. Rural classification based on risk of reservoirs and drinking water distribution system, case study: Central part of Minoodasht city. *Journal of Rural Research*. 4: 155-177.
 22. Sarkar B. Chakrabarti P. Vijaykumar A. and Kale V. 2006. Wastewater treatment in dairy industriespossibility of reuse. *Desalination*. 195(1): 141-152
 23. Sher F. Malik A. and Liu H. 2013. Industrial polymer effluent treatment by chemical coagulation and flocculation. *Journal of*

