

بهینه‌سازی متغیرهای فرایندی در واحدهای پیش تصفیه پساب خروجی صنایع پتروشیمی

فرشاد فرهد^۱، داریوش مولا^۲، محمدرضا جعفری نصر^{۳*} و محمد سلطانیه^۴

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، واحد فیروزآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، فارس، ایران

۲- استاد مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۳- دانشیار مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۴- استاد مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

دریافت: اسفند ۱۳۹۱، بازنگری: اردیبهشت ۱۳۹۲، پذیرش: خرداد ۱۳۹۲

چکیده: تصفیه پساب‌های خروجی از واحد آب شیرین کن که دارای نمک بالا هستند، افزون بر آن که از آسیب‌های محیط زیستی چون شوک نمکی و گرمایی آبریان جلوگیری می‌کند، قابلیت تولید نمک و آب را به‌عنوان دو فراورده مفید ایجاد می‌کند. در این مقاله، متغیرهای فرایندی یک واحد پیش تصفیه پساب خروجی از واحد آب شیرین یک پتروشیمی، به صورت نظری و عملی در مقیاس پایلوت مورد بررسی قرار گرفته و مقدارهای بهینه آن‌ها ارایه شده است. طی فرایند پیش تصفیه پیشنهادی، عناصر سختی را حذف می‌شوند و پساب برای جداسازی نمک و آب، قابل بهره برداری است. نوع و مقدار بهینه ترکیب‌های لخته‌ساز، سرعت اختلاط بهینه در واکنش‌گاه پیش تصفیه و نسبت بهینه مواد سختی را به مواد لخته کننده در این پژوهش بررسی شده است. همچنین مقدار سختی کل و رسانایی الکتریکی پساب به‌عنوان معیاری از چگونگی عملکرد لخته سازها گزارش شده‌اند. سه ترکیب تجاری ارزان قیمت با خاصیت انعقادی و لخته سازی بررسی شده است. نتیجه‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که آهن سولفات به‌عنوان لخته کننده جهت حذف سختی کل، در مقایسه با آهن کلرید و آلومینیم سولفات (آلوم) مناسب‌تر است که در این حال میزان حذف سختی کل به تقریب برابر ۹۹٪ خواهد شد و سرعت اختلاط در واکنش‌گاه پیش تصفیه اول با توجه به نتیجه‌های به‌دست آمده برابر ۷۰ دور بر دقیقه است. همچنین نسبت حجمی ۴ برای میزان سود به لخته کننده و نسبت حجمی ۳ برای میزان سودا به لخته کننده بهترین نتیجه را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پساب، نمک‌زدایی، منعقد کننده، بهینه سازی فرایند

مقدمه

تغییری به‌طور معمول به محیط زیست تخلیه می‌شوند. تداوم این موضوع به دلیل وجود یون‌های معدنی از جمله نمک بالا در این شورآب موجب شوک نمکی در آبریان می‌شود. در دو دهه اخیر، مطالعاتی در زمینه تصفیه این شورآب صورت گرفته است که در ادامه خلاصه ای از آن‌ها آورده شده است. احمد و همکارانش^۱ [۲۰۰۱] به صورت نظری به بررسی

فرایندهای تأمین منابع آب از طریق روش‌های نمک‌زدایی آب دریا، همواره تولید پسابی با غلظت نمک بالا می‌کند. این شورآب غلیظ از طریق روش‌های غشایی قابل تصفیه مجدد نبوده و همچنین استفاده از روش‌های وابسته به انرژی گرمایی سوخت نیز مقرون به صرفه نیست. به همین دلیل این شورآب بدون هیچ

1. Ahmed et al.

پساب انجام دادند. آن‌ها در این پژوهش از یک مخزن غیر هوازی، واکنش‌گاه زیستی هوازی، فیلتر خاک و مخزن جمع‌آوری کننده آب استفاده کردند. از آنجا که اغلب واکنش‌های شیمیایی در آب انجام می‌شوند، می‌توان گفت که این ماده حیاتی می‌تواند نقش مهمی در تنظیم فرایندهای طبیعی و حفاظت از محیط زیست در برابر هرگونه تغییرات ناگهانی داشته باشد. بنابراین، جلوگیری از آلودگی منابع آب و محیط زیست با استفاده از راه‌کارهای مناسب تصفیه فاضلاب و استفاده مجدد از آن می‌تواند نقش مهمی در کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ایفا کند [۶].

جیوو و همکارانش^۱ [۲۰۱۱] بررسی‌هایی را بر روی فرایندهای غشایی با اندازه میکرو آغاز کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از میکرو فیلترها در شرایط

الف: شار انتقال جرم بالا

ب: شار انتقال جرم پایین

ج: شار پایین انتقال جرم همراه با فرایند لخته‌سازی

د: شار بالای انتقال جرم همراه با فرایند لخته‌سازی

می‌تواند مناسب باشند. هم‌چنین با استفاده از میکرو فیلترها میانگین درجه کدریت به 0.7×10^7 NTU کاهش پیدا خواهد کرد. این درحالی‌ست که اگر از روش‌های سنتی جهت تصفیه آب استفاده شود، درجه کدری حدود 0.23×10^7 NTU خواهد شد. میزان املاح موجود در آب شیرین خروجی از میکروفیلترها به شدت کاهش پیدا کرده و کیفیت آن به طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت. به گونه‌ای که میزان مواد محلول موجود در آب شیرین تولیدی نظیر برم، ید، آهن به شدت کاهش پیدا خواهد کرد. جیوو بیان کرد که درجه شوری نیز در صورت استفاده از میکرو فیلترها به شدت کاهش پیدا خواهد کرد [۷].

نول^۲ [۲۰۱۱] مطالعه‌ای را روی پساب خروجی از واحدهای تصفیه و ورودی به دریای بارنتس انجام داد. وی در این پژوهش، فناوری مورد استفاده جهت تصفیه پساب و سود به‌دست آمده از این تصفیه را با ضررهای ناشی از تخلیه پساب به دریا مقایسه کرد و به این نتیجه رسید که نباید تنها به راه‌حل‌های با توجه اقتصادی بسنده کرد [۸].

کارخانه‌های نمک‌زدایی پرداختند. هدف آن‌ها شناسایی کارخانه‌هایی بود که از شورآب خروجی آن‌ها بتوان نمک و انرژی الکتریکی را هم‌زمان استحصال کرد [۱].

محمد و همکارانش^۱ [۲۰۰۵] به بررسی آثار تخلیه شورآب به خاک‌های نفوذپذیر بر کیفیت آب‌های زیر زمینی پرداختند. ایشان کارخانه‌هایی را شناسایی کردند که حدود ۳۰ درصد آب ورودی آن‌ها به‌عنوان شورآب به خاک‌های نفوذپذیر تخلیه می‌شد و با تجزیه ترکیب آب خوراک، آب آشامیدنی تولیدی و آب چاه نزدیک به کارخانه نمک‌زدایی به این نتیجه رسیدند که آلودگی‌های شورآب، آب چاه را آلوده می‌کند [۲].

لوپز و همکارانش^۲ [۲۰۰۹] پژوهشی را روی واحدهای نمک‌زدایی متشکل از تقطیر چند منظوره و تراکم مکانیکی بخار انجام دادند. این پژوهش که جهت تولید 100 مترمکعب بر روز آب شیرین و نمک خشک انجام شده بود از دو مرحله الف) تقطیر چند منظوره و ب) تراکم مکانیکی بخار تشکیل شده است [۳].

فرایند ترکیبی نمک‌زدایی توسط زیاشنگ و همکارانش^۳ [۲۰۱۰] ارایه شد. در این فرایند با استفاده از یک فرایند غشایی و یک فرایند تقطیر، غلظت نمک در شورآب افزایش یافته و برای مرحله تولید بلور آماده می‌شود. با استفاده از این فرایند ترکیبی، غشاهای فیبر تو خالی سطح تماس مناسبی را برای تقطیر فراهم می‌سازند بنابراین، در دمای 40 تا 50 درجه سانتی‌گراد نیز این عملیات انجام پذیر است، انرژی مصرفی در این فرایند در حدود $20-15$ کیلو وات ساعت بر متر مکعب گزارش شده است [۴].

ربرتز و همکارانش^۴ [۲۰۱۰] بیان داشتند که با توجه به پدیده گازهای گلخانه‌ای در سال‌های اخیر، اهمیت آب و لزوم توجه به این مایع حیاتی بیش از هر زمانی باید مورد توجه قرار گیرد. از راهکارهای مقابله با کمبود منابع آبی می‌توان به استفاده مجدد از شورآب و پساب‌های صنعتی در بسیاری از موارد اشاره کرد. بدین منظور باید تصفیه لازم بر روی این شورآب‌ها صورت بگیرد تا بتوان از آن به‌عنوان یک منبع آب پایدار استفاده کرد [۵].

وو و همکارانش^۵ [۲۰۱۱] مطالعه‌ای را بر روی فرایندهای تصفیه

1. Mohamed et al.

2. Lopez et al.

3. Xiaosheng et al.

4. Roberts et al.

5. Wu et al.

6. Jeawoo et al.

7. Nephelometric Turbidity Units

8. Knol

یوتیلیتی خاورمیانه است که تغذیه کننده سایر کارخانه‌های پتروشیمی در منطقه ویژه اقتصادی پارس جنوبی است. واحد نمک‌زدایی این مجتمع، از ۵ دستگاه تقطیر کننده چند مرحله‌ای جهت انجام فرایند شیرین‌سازی آب بهره می‌گیرد.

ظرفیت اسمی هر کدام از این واحدها ۱۱۰۰ تن بر ساعت آب دریا به‌عنوان ورودی است ولی ظرفیت عملی آن‌ها حدود ۱۰۳۰ تن آب دریا بر ساعت است. ۲۸ درصد از جریان ورودی به‌عنوان آب شیرین تبدیل شده و ۷۲ درصد آن به صورت پساب شور غلیظ شده به دریا بازگردانده می‌شود. بنابراین، دبی حجمی پساب شور ریخته شده به دریا برای ۵ واحد تقطیر کننده چند منظوره، حدود ۳۷۰۰ تن بر ساعت گزارش می‌شود که غلظت نمک در این پساب حدود ۵۴۵۰۰ ppm و سختی کل آن حدود ۵۰۶۹۶/۳ ppm (معادل کربناتی) است. برخی از ویژگی‌های پساب شور تخلیه شده به دریا در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ تجزیه شیمیایی پساب ورودی به دریا

ترکیب	واحد	جریان خروجی آب نمک
Ca ²⁺	ppm as CaCO ₃	۱۴۶۱۶۳
Mg ²⁺	ppm as CaCO ₃	۳۶۰۸۰
Fe ²⁺	ppm	ناچیز
Ba ²⁺	ppm	ناچیز
SO ₄ ²⁻	kg/m ³	۵،۲۵
HCO ₃ ²⁻	kg/m ³	۰،۱۸۵
سختی کل	ppm as CaCO ₃	۵۰۶۹۶/۳
میزان نمک	percent	۵/۴۵
رسانش	s/m	۷۷۱۰۰
سیلیکا	ppm	۰،۱
چگالی ویژه در ۱۵ درجه سانتی‌گراد	----	۱،۰۶
اسیدیته (pH)	----	۸،۲
گرانروی سینماتیک	m ² /sec	۰،۷۵×۱۰ ^{-۶}
ذرات جامد معلق	kg/m ³	۶۳،۸

ورگیلی و همکارانش^۱ [۲۰۱۲] مطالعه‌ای بر روی پساب خروجی از کارخانه‌های تولید مواد معدنی و به صفر رساندن این پساب انجام دادند. آن‌ها در این بررسی از دو نوع غشای نانویی، فرایند اسمز معکوس و یک نوع غشای ساده استفاده کردند. آن‌ها در این مطالعه میزان آب تصفیه شده و هزینه انرژی مصرفی را ارزشیابی و به این نتیجه رسیدند که فرایندی با ترکیب گفته شده از نظر فنی و اقتصادی مقرون به صرفه است [۹].

سبحانی و همکارانش^۲ [۲۰۱۲] پژوهشی را روی تحلیل انرژی مصرفی در فرایندهای نمک‌زدایی از آب دریا در نواحی خشک شبه جزیره‌های عربی انجام دادند. آن‌ها در این پژوهش از یک واکنش‌گاه استوانه‌ای جهت کاهش سختی، از یک فرایند اسمز معکوس جهت تغلیظ شورآب و یک دستگاه بلورساز جهت تولید بلور از شورآب دریا برای رسیدن به اهداف فرایند نمک‌زدایی با خروجی صفر بهره جستند. آزمایش‌های انجام شده توسط آن‌ها قابلیت زیست فناوری فرایند انتخاب شده برای رسیدن به ۹۵ درصد کاهش شوری و نیل به فرایند نمک‌زدایی با خروجی صفر را مشخص می‌کند [۱۰].

پژوهش‌ها مبنی بر تعیین ترکیب درصد شورآب خروجی از فرایند نمک‌زدایی آب دریای خلیج فارس اندک است. در این پژوهش، یک واحد پیشنهادی پیش تصفیه شورآب با هدف کاهش یون‌های سختی‌زا از طریق یک روش باصرفه اقتصادی، بررسی شده است. شورآب خروجی از واحدهای نمک‌زدایی یک کارخانه پتروشیمی در پارس جنوبی که به دریا تخلیه می‌شود در مقیاس پایلوت و در دو واکنش‌گاه، سختی‌زدایی می‌شود. روش سختی‌زدایی و کاهش رسانایی الکتریکی شورآب از طریق انعقاد و لخته‌زدایی انتخاب شده است. آب نمک خروجی از این واحد تصفیه، قابل استفاده در حوضچه‌های خورشیدی جهت استحصال نمک و آب آشامیدنی است. مقدار بهینه عامل‌های عملیاتی مؤثر در انتها گزارش شده است.

شرح فرایند اصلی

واحد نمک‌زدایی در مجتمع پتروشیمی

مجتمع پتروشیمی انتخابی، یکی از بزرگترین مجتمع‌های

1. Vergili et al.

2. Sobhani et al.

3. Coagulation

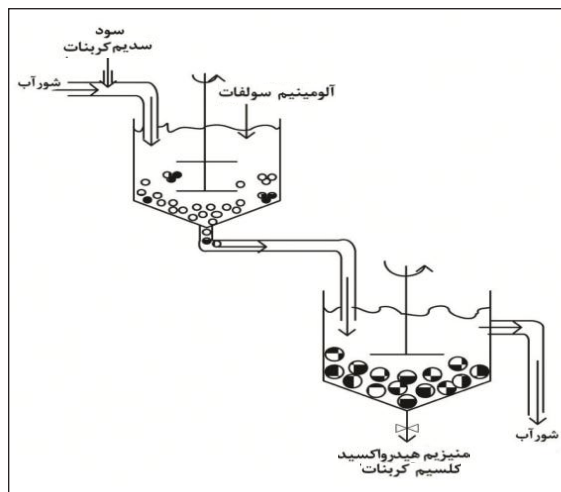
واحد تصفیه شیمیایی صنعتی

از آن‌جا که برای تولید نمک طعام (NaCl) خالص باید یون‌های کلسیم Ca^{2+} ، منیزیم Mg^{2+} ، و سایر یون‌های ناخالصی از شورآب را حذف کرد، نخستین فرایند اعمال شده بر شورآب، تصفیه شیمیایی است که در آن با افزودن سدیم هیدروکسید و سدیم کربنات به شورآب طی دو واکنش گاه پیش تصفیه، یون‌های کلسیم و منیزیم رسوب می‌کنند و پساب خروجی با حدود ۷ درصد نمک و عاری از یون‌های تشکیل دهنده سختی تولید می‌شود. در واکنش گاه پیش تصفیه اول با تزریق مواد شیمیایی نظیر سود و اختلاط به‌وسیله همزن، انعقاد^۱ و چسبندگی مولکولی ذرات اتفاق می‌افتد. در واکنش گاه همزن دار دوم، فرایند لخته‌سازی رخ می‌دهد. پس از فرایند ته نشینی، مواد زاید از پساب نرم شده جدا می‌شوند. در ادامه پساب نرم شده جهت افزایش درجه شوری به واحد تغلیظ خورشیدی وارد می‌شود تا تولید نمک و آب از پساب انجام گیرد. مواد شیمیایی مهم مورد استفاده در واحد پیش تصفیه عبارت‌اند از سدیم کربنات و سدیم هیدروکسید و منعقد کننده‌های معدنی که جهت انجام فرایندهای انعقاد، توده‌سازی و رسوب‌گذاری به سامانه تزریق می‌شوند. شکل ۱ نمای ساده‌ای از این واحد را نشان می‌دهد.

بخش تجربی

حذف سختی کل آب تابعی از چند عامل مانند سرعت اختلاط در واکنش گاه، میزان سدیم کربنات (سودا)، میزان سدیم هیدروکسید (سود) و هم‌چنین میزان ماده لخته‌ساز افزوده شده به فرایند است. در این مطالعه از ۳ ماده تجاری لخته کننده (با غلظت ۱۰ گرم بر لیتر) آهن سولفات ۹۸٪ وزنی، آهن کلرید ۹۷٪ وزنی و آلومینیم سولفات (آلوم) ۹۸٪، به صورت جداگانه و ترکیبی، جهت لخته‌سازی استفاده شده است که در مقایسه با ترکیب‌های دیگر هزینه مناسب‌تری دارند [۱۱]. بنابراین، آزمایش‌ها با هدف پیدا کردن مقادیرهای بهینه عامل‌های فوق صورت گرفته است. سرعت اختلاط در واکنش گاه اول در شکسته شدن پیوند کمپلکس‌های لخته ساز و انعقاد آن‌ها با عناصر سختی آب مؤثرتر از سرعت در واکنش گاه دوم است. بنابراین، شرایط عملیاتی در واکنش گاه اول بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به این‌که در واکنش گاه دوم به‌دلیل ایجاد لخته‌های درشت‌تر باید اختلاط با سرعت کمتر نسبت به واکنش گاه اول صورت گیرد. در عین حال، زمان اختلاط بیشتر از واکنش گاه اول در نظر گرفته شده است. بر اساس منابع، یافتن زمان و سرعت در انعقاد و لخته سازی در هر مطالعه با توجه به نمونه آب متفاوت است. زمان و دور همزن در واکنش گاه دوم به‌صورت حدس و خطا یافت شده که از طریق آزمون جار تنظیم شده است. زمان تماس در واکنش گاه اول نیز بر اساس برخی منابع در نظر گرفته شده است.

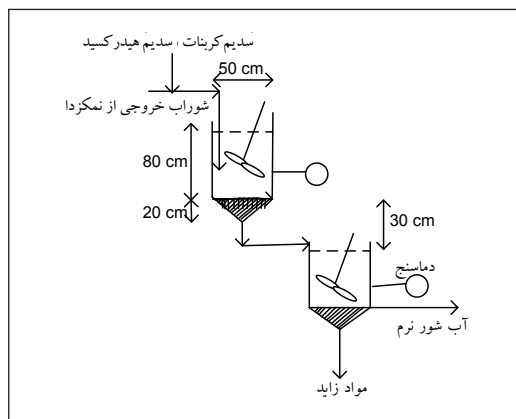
نخست دما، اسیدیته، مقدار کل جامدهای حل شده در آب، سختی کل و بازی بودن یک نمونه ۴ لیتری از پساب شور خروجی از واحد تقطیر کننده چند مرحله‌ای مجتمع پتروشیمی اندازه‌گیری و سپس این نمونه به داخل واکنش گاه پیش تصفیه اول ریخته می‌شود. پس از آن، دما و اسیدیته پیش و پس از تزریق ماده منعقد کننده اندازه‌گیری می‌شود. سپس مقادیرهای محاسبه شده‌ای از سدیم هیدروکسید با درصد خلوص ۹۹٫۴٪ وزنی و سدیم کربنات با درصد خلوص ۹۹٫۲٪ وزنی را به فرایند افزوده و به مدت ۲ دقیقه در سرعت‌های متفاوت (۷۰، ۹۰، ۱۱۰ و ۱۲۰ دور بر دقیقه)



شکل ۱ نمای ساده واحد تصفیه شیمیایی

1. Coagulation

که دما را نشان می‌دهد. ابعاد و شرح ساده‌ای از این فرایند، در شکل ۲ ارایه شده است.



شکل ۲ تصویر واکنش‌گاه‌های ساخته شده برای واحد پیش تصفیه

با مقایسه نتیجه‌های به‌دست آمده از آزمایش‌ها می‌توان به مقدارهای بهینه عامل‌های سرعت اختلاط در واکنش‌گاه پیش تصفیه اول، میزان سدیم هیدروکسید و سدیم کربنات، میزان و نوع لخته‌کننده مورد استفاده در واحد پیش تصفیه پی برد.

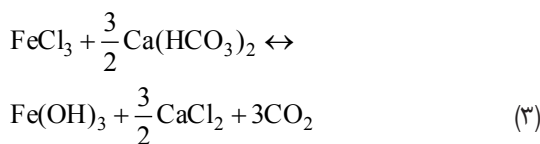
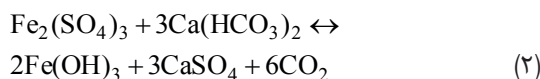
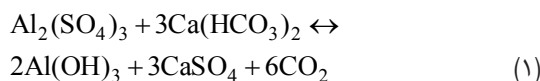
نتیجه‌ها و بحث

سرعت اختلاط در واکنش‌گاه اول

شرایط عملیاتی دو واکنش‌گاه بر عملکرد فرایند پیش تصفیه تأثیرگذار بوده و سرعت اختلاط در مرحله لخته‌سازی در واکنش‌گاه اول، یکی از مهم‌ترین این شرایط است.

در این مرحله ماده لخته‌کننده با یون‌هایی که قرار است از آب حذف شوند ترکیب می‌شود. بنابراین، بدیهی است که سرعت اختلاط بهینه یک عامل بسیار مهم برای ایجاد برخورد مناسب بین مواد به‌شمار می‌آید. در این مطالعه، سرعت اختلاط در واکنش‌گاه پیش تصفیه اول که دربرگیرنده ۴ لیتر پساب است، برای هر کدام از لخته‌کننده‌ها با مقدارهای متفاوتی از سود و سودا بررسی شده است. داده‌های آزمایشگاهی برای سختی کل بر حسب سرعت اختلاط در واکنش‌گاه پیش تصفیه اول برای هر سه نوع منعقد کننده در

محلول هم زده می‌شود. (لازم به ذکر است که غلظت هر کدام از محلول‌های تهیه و تزریق شده به پساب ۱۰ گرم بر لیتر است که در این مرحله ساختمان منعقد کننده‌ها شکسته شده و یون‌های منیزیم و کلسیم با منعقد کننده، یک کمپلکس جدید ایجاد می‌کنند) بعد از ۲ دقیقه شیر رابط بین واکنش‌گاه اول و دوم را باز کرده تا محلول به واکنش‌گاه پیش تصفیه دوم منتقل شود. در آن‌جا محلول به مدت ۸ دقیقه و با سرعت اختلاط ۵۰ دور بر دقیقه همزده می‌شود. واکنش‌های شیمیایی زیر در مرحله لخته‌سازی برای هر کدام از لخته‌کننده‌ها به‌صورت زیر است.



طی این واکنش‌ها، سختی کربناتی حذف شده و فراورده‌هایی به شکل رسوب و گاز تولید می‌کند که از فاز پساب خارج می‌شوند. میزان جرم مناسب منعقد کننده‌ها بر اساس ضریب‌های استوکیومتری و مقدار سختی کل اندازه‌گیری شده در نمونه پساب انتخاب شده است.

بعد از تخلیه واکنش‌گاه دوم، به محلول به‌دست آمده به مدت ۴۵ دقیقه برای تشکیل رسوب زمان می‌دهیم. پس از سپری شدن زمان مذکور، عامل‌های درجه بازی، سختی کلسیمی، میزان کل جامدات حل شده، ضریب رسانایی الکتریکی، میزان اسیدیته، دما و سختی کل برای محلول صاف شده (بالای رسوب) اندازه‌گیری می‌شوند.

واکنش‌گاه‌های اول و دوم دستگاه استفاده شده در این پژوهش، از جنس فولاد ضد زنگ و با ظرفیت مشابه، انتخاب شده‌اند. درضمن در کنار جداره خارجی هر راکتور، حسگری قرار داده شده

معادل کربناتی می‌رسد. اگر چه تفاوت بین میزان حداقل و حداکثر سختی کلسیمی حدود ۸۱ ppm معادل کربناتی است ولی چون هدف این مطالعه پیدا کردن سرعت بهینه اختلاط در واکنش‌گاه است، دور ۷۰ rpm (۰٫۰۱ وات بر متر مکعب) به‌عنوان بهینه‌ترین سرعت اختلاط گزارش می‌شود. براساس شکل ۴ هنگامی که از آهن سولفات به‌عنوان لخته کننده استفاده می‌شود، حداقل میزان سختی کلسیمی به حدود ۱۳۰ ppm خواهد رسید. در سرعت‌های اختلاط بیش از ۷۰ rpm تغییرات مثبت بوده و شکل‌های ۳ و ۴ این موضوع را تأیید می‌کنند. از آن‌جا که برخورد و ایجاد کمپلکس بین ذرات دو عامل اساسی و مؤثر بر کیفیت مراحل انعقاد و لخته‌سازی خواهد بود. بنابراین، این سرعت به‌عنوان بهترین سرعت اختلاط به علت بالاترین برخورد مؤثر بین مولکول‌ها و در نتیجه ایجاد کمپلکس گزارش می‌شود.

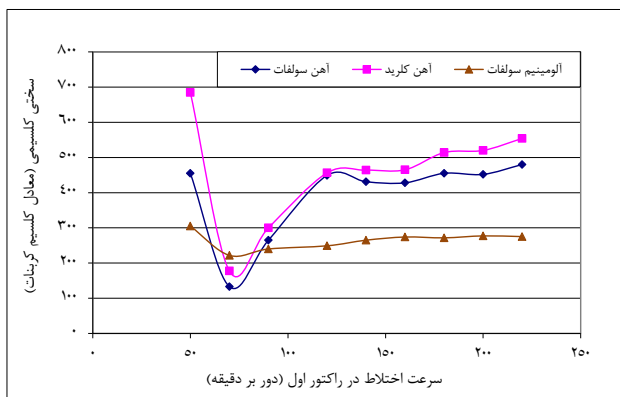
مقدارهای متفاوت سدیم کربنات

از آن‌جا که سختی دائمی آب تصفیه نشده بیشتر از سختی موقت آن خواهد بود لذا از سدیم کربنات برای حذف سختی کلسیمی دائمی استفاده می‌شود. بنابراین، مقدار بهینه سدیم کربنات مصرفی یکی از عامل‌های اصلی در بازدهی فرایند نرم‌سازی است. به این منظور، مقدارهای متفاوت سدیم کربنات در این پژوهش آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است.

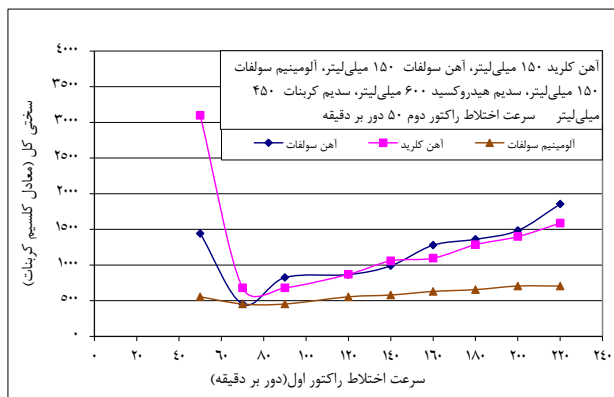
شکل ۳ نمایش داده شده است. به‌نظر می‌رسد که در سرعت‌های پایین، قدرت اختلاط به گونه‌ای نیست که بتواند برخوردهای لازم را جهت ایجاد کمپلکس مناسب بین یون‌ها در محلول ایجاد کند چرا که مقدار سختی کل بر حسب معادل کربناتی در سرعت‌های پایین حدود ۵۵۰ ppm است. با افزایش سرعت هم‌زن تا ۷۰ rpm معادل کربناتی کل به حدود ۴۶۰ ppm معادل کربناتی خواهد رسید. اما در سرعت‌های بیشتر، اغتشاش موجود در میان محلول مانع تشکیل کمپلکس جدید بین منعقد کننده و یون‌های موجود در پساب می‌شود و دوباره سختی کل افزایش چشمگیری می‌یابد. براساس آزمایش‌های انجام شده میزان حذف سختی کل زمانی که سرعت اختلاط در واکنش‌گاه پیش تصفیه اول ۷۰ rpm بر متر مکعب باشد به حداکثر مقدار خود ۹۹٫۱۱٪ می‌رسد.

هم‌چنین سختی کلسیمی در این بررسی اندازه‌گیری و نتیجه‌ها در شکل ۴ آمده است.

با توجه به تغییرات سختی کلسیمی بر حسب سرعت اختلاط در واکنش‌گاه پیش تصفیه اول برای ماده لخته کننده آلوم، سرعت اختلاط ۷۰ دور بر دقیقه، بهترین بر هم کنش و برخورد را بین یون‌های رسوب شونده ایجاد می‌کند. در سرعت ۷۰ دور در دقیقه سختی کلسیمی از ۳۰۶ ppm به ۲۲۵ ppm معادل کربناتی خواهد رسید، درحالی‌که در سرعت‌های اختلاط بیشتر از ۷۰ دور در دقیقه مقدار سختی کلسیمی به ۳۷۰ ppm

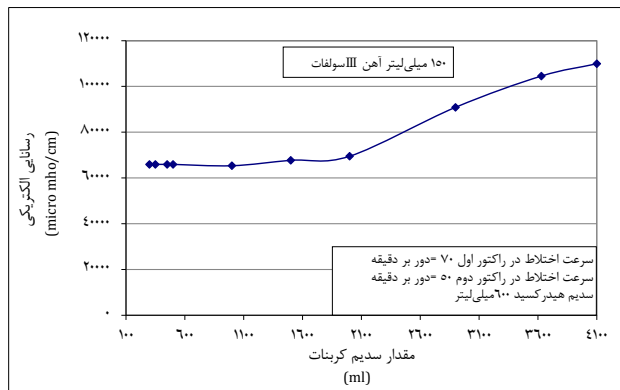


شکل ۴ سختی کلسیمی بر حسب سرعت اختلاط در واکنش‌گاه پیش تصفیه اول

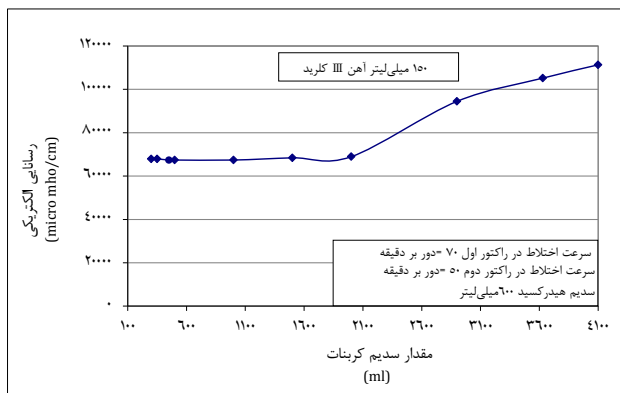


شکل ۳ سختی کل بر حسب سرعت اختلاط در واکنش‌گاه پیش تصفیه اول

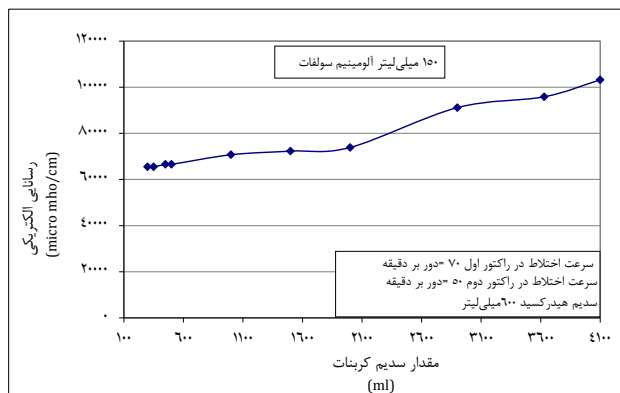
رسانایی الکتریکی



شکل ۵ تغییرهای ضریب رسانایی الکتریکی بر حسب مقدار سدیم کربنات به کار رفته برای آلوم



شکل ۶ تغییرهای ضریب رسانایی الکتریکی بر حسب مقدار سدیم کربنات به کار رفته برای آهن کلرید

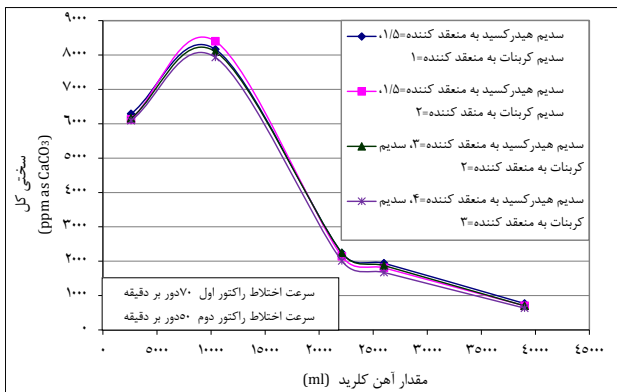


شکل ۷ تغییرهای ضریب رسانایی الکتریکی بر حسب مقدار سدیم کربنات به کار رفته برای آلومینیم سولفات

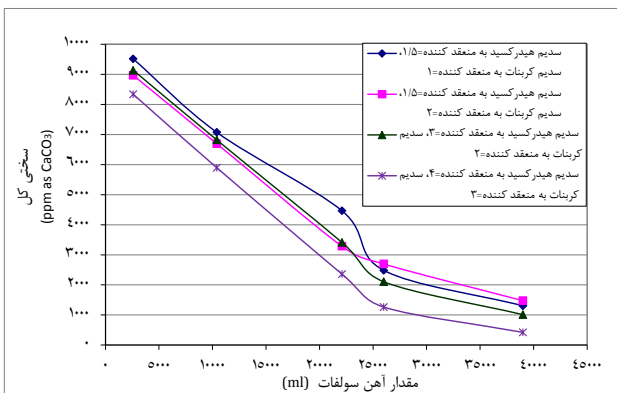
به دلیل آن که یون‌ها عامل انتقال جریان برق در محلول‌ها هستند و میزان رسانایی الکتریکی را مشخص می‌کنند، رابطه نزدیکی بین رسانایی الکتریکی و کل مواد وجود دارد. یکی دیگر از عامل‌های مهم اندازه‌گیری شده در این مطالعه، مقدار ضریب رسانایی الکتریکی پساب نرم شده خروجی از واحد پیش تصفیه است. این ضریب می‌تواند نشان دهنده میزان عملکرد هر کدام از لخته کننده‌ها در حذف سختی کل باشد. در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ عملکرد هر سه نوع لخته کننده هنگام استفاده از مقدارهای متفاوت سدیم کربنات به صورت ضریب رسانایی الکتریکی نشان داده شده‌اند. آنچه از آزمایش‌های انجام شده در شکل‌ها ۵، ۶ و ۷ برداشت می‌شود، این است که حداقل ضریب رسانایی الکتریکی برای پساب تصفیه شده زمانی وجود خواهد داشت که نسبت حجمی سدیم کربنات به لخته کننده برابر ۳ خواهد بود. با مقایسه و تفسیر نتیجه‌ها در شکل‌های ارایه شده می‌توان نتیجه گرفت که ضریب رسانایی الکتریکی و سختی کل هنگام استفاده از ۷۳٫۸ گرم بر لیتر سدیم کربنات و ۳۹ گرم بر لیتر از لخته کننده به حداقل مقدار خود خواهند رسید.

نسبت‌های بهینه سدیم کربنات و سدیم هیدروکسید به ترکیب‌های لخته کننده

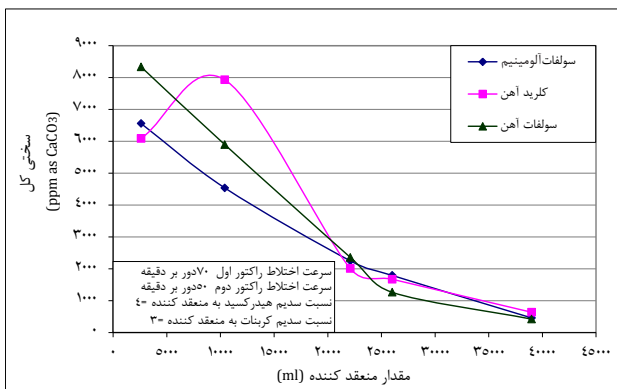
نسبت‌های متفاوت سدیم کربنات و سدیم هیدروکسید به حداقل میزان لخته کننده به کار رفته در فرایند لخته‌سازی یکی از عامل‌های اصلی در این فرایند است. این عامل هنگامی که بازدهی فرایند نرم‌سازی تابعی از مقدارهای سدیم کربنات و سدیم هیدروکسید است بسیار مهم به نظر می‌رسد. بنابراین آزمایش‌های لازم انجام شده و سپس میزان بهینه سدیم کربنات و سدیم هیدروکسید برحسب میزان ماده لخته‌کننده مصرفی، قابل محاسبه است. با این استدلال چهار نسبت برای هر سه نوع لخته کننده آهن سولفات، آهن کلرید و آلومینیم سولفات مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتیجه‌های شکل ۱۱ نسبت بهینه حجمی سود به آلوم و سودا به آلوم را به ترتیب برابر ۴ و ۳ نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد که تأثیر



شکل ۹ تغییرهای سختی کل برحسب مقادیرهای متفاوت آهن کلرید



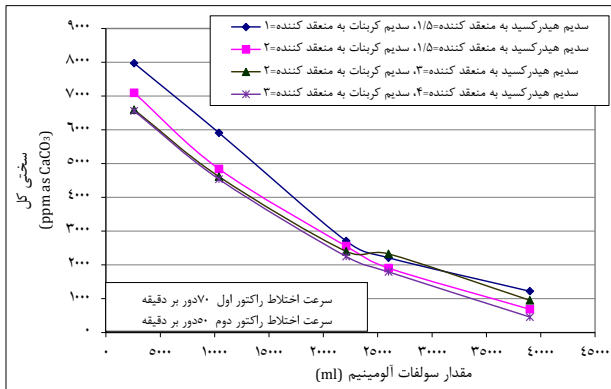
شکل ۱۰ تغییرهای سختی کل برحسب مقادیرهای متفاوت آهن سولفات



شکل ۱۱ تغییرهای سختی کل برحسب مقادیرهای متفاوت از لخته‌کننده‌ها

سود، سودا و لخته‌کننده در حذف سختی پساب به نسبت سود به لخته‌کننده و سودا به لخته‌کننده بستگی دارد. این مطالعه با هدف یافتن مقدار بهینه لخته‌کننده انجام شده که با توجه به آزمایش‌ها حداقل میزان بهینه لخته‌کننده ۱۵۰ میلی‌لیتر در نظر گرفته شده است. آزمایش‌ها جهت یافتن نسبت مناسب سود به لخته‌کننده و سودا به لخته‌کننده انجام شده، به گونه‌ای که نتیجه‌ها در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ نشان داده شده‌اند.

نتیجه‌های آزمایش‌ها در شکل ۸ بیانگر آن است که مقدار سختی کل زمانی که میزان منعقد کننده سولفات آلومینیم ۱۵۰ میلی‌لیتر باشد در نسبت‌های متفاوت سود و سودا به منعقد کننده در حدود ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر معادل کربناتی بوده، هم‌چنین در شکل ۹ زمانی که مقدار آهن کلرید برابر ۱۵۰ میلی‌لیتر باشد، سختی کل در نسبت‌های متفاوت سود و سودا به منعقد کننده در حدود ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر معادل کربناتی است. شکل ۱۰ حاکی از آن است که مقدار سختی کل در ۱۵۰ میلی‌لیتر از منعقد کننده آهن سولفات تا مرز ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نیز می‌رسد. نتیجه‌های بررسی‌ها در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ نشان می‌دهند که همگرایی مقدار سختی کل، هنگام استفاده از ۱۵۰ میلی‌لیتر از آهن کلرید نسبت به دو منعقد کننده دیگر بیشتر است. که این امر می‌تواند بیان کننده پیوند قوی‌تر آهن کلرید با یون‌های کلسیم و منیزیم در گستره نسبت‌های آزمایش شده برای سود و سودا به منعقد کننده باشد.



شکل ۸ تغییرهای سختی کل برحسب مقادیرهای متفاوت آلوم

صرفه اقتصادی جهت سختی زدایی شورآب است. برای افزایش بازده فرایند، برخی عامل‌های مؤثر بر عملکرد این واحد در نظر گرفته شده و سپس از بین نتیجه‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده بهینه‌ترین مقادارها تعیین و انتخاب شده‌اند. اثر تغییرهای سرعت اختلاط در راکتور پیش تصفیه اول، مقدارهای سدیم هیدروکسید (سود)، سدیم کربنات (سودا) و ۳ نوع منعقد کننده رایج در فرایند تصفیه شیمیایی آب، یعنی (آهن سولفات، آهن کلرید و آلومینیم سولفات) بر روی سختی کل و رسانایی الکتریکی بررسی شده است. در نهایت، با مقایسه نتیجه‌های به‌دست آمده، مقدارهای بهینه جهت عامل‌های فوق تعیین شده‌اند.

نتیجه‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که بهینه‌ترین سرعت اختلاط در واکنش گاه اول ۷۰ دور بر دقیقه است. همچنین استفاده از نسبت حجمی ۴ برای میزان سود به منعقد کننده (۶۰۰ میلی‌لیتر) و نسبت حجمی ۳ برای سودا به منعقد کننده (۴۵۰ میلی‌لیتر) بهترین اثر را در کاهش سختی پساب نشان می‌دهند.

در این شرایط عملیاتی، به ازای ۱۵۰ میلی‌لیتر آهن سولفات با غلظت ۱۰ گرم بر لیتر به‌عنوان لخته کننده، سختی کل پساب از مقدار اولیه ۵۰۶۹۶/۳ به ۴۵۳ کربنات کلسیمی می‌رسد و در مقایسه با زمانی که از همین مقدار منعقد کننده‌های آهن کلرید

شکل ۱۱ نشان می‌دهد که پایین‌ترین مقدار سختی کل با آهن سولفات هنگامی مشاهده شده است که مقدار بهینه سدیم کربنات به کار رفته در این فرایند در حدود ۳۹ گرم بر لیتر باشد. در صورت استفاده از سولفات آلومینیم به‌عنوان لخته کننده، مقدار سختی کل موجود در پساب تصفیه شده در مقدارهای بیشتر از ۳۹ گرم بر لیتر سدیم کربنات بهینه خواهد شد. بنابراین، حداکثر نرم‌سازی زمانی میسر می‌شود که ۳۹ گرم بر لیتر از سدیم کربنات به‌عنوان کمک لخته کننده و از آهن سولفات به‌عنوان لخته کننده استفاده شوند. در حالی که در شرایط یکسان، میزان سختی کل پساب تصفیه شده به هنگام استفاده از آلوم، بیشتر از آهن سولفات خواهد بود. درحالی که میزان سختی کل پساب تصفیه شده خروجی از واحد تصفیه شیمیایی، هنگام استفاده از آهن کلرید، بیشتر از دو لخته کننده قبلی است.

اگر چه چگالی بار الکتریکی آلوم و آهن سولفات برابر هم هستند اما چون جرم مولکولی آهن سولفات بیشتر از آلوم است در نتیجه تمایل آهن سولفات به حذف سختی کل بیشتر از لخته کننده‌های دیگر است. درحالی که جرم مولکولی و چگالی بار الکتریکی آهن کلرید نسبت به دو لخته کننده قبلی، کمتر است.

مقدارهای دما و اسیدیته

حین انجام فرایند انعقاد و لخته‌سازی در هر آزمایش، مقدارهای دمای محیط و اسیدیته پیش از افزودن منعقد کننده، پس از افزودن آن و پس از فرایند رسوب گذاری اندازه‌گیری شده است. در جدول ۲ این مقادارها برای ترکیب سه منعقد کننده که کمترین مقدار سختی را نشان داده، آورده شده است. در هر ستون نام منعقد کننده‌های که میزان بهینه آن مد نظر بوده، ارائه شده است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک واحد پیشنهادی تصفیه پساب خروجی از واحدهای نمک‌زدایی آب دریا در یک پتروشیمی در مقیاس پایلوت بررسی شده است. هدف یافتن مقدارهای بهینه مؤثر و مقرون به

جدول ۲ مقدارهای دما و اسیدیته حین سه آزمایش انتخابی

منعقد کننده	آهن III سولفات	آلومینیم سولفات	آهن III کلرید
اسیدیته اولیه	۸،۴۴	۸،۸۲	۸،۳۴
دما (درجه سانتی‌گراد)	۱۸	۱۹،۷	۱۷،۴
اسیدیته نهایی	۶،۷	۴،۵۲	۲،۵
دما (درجه سانتی‌گراد)	۱۸،۳	۱۹،۷	۱۷،۴
اسیدیته محلول صاف شده	۱۱،۰۹	۱۱،۴۴	۱۰،۸۸
دما (درجه سانتی‌گراد)	۱۷	۱۹،۲	۱۷،۲

آورنده سختی از پساب شور جدا و رسوب می‌کنند. در سرعت‌های پایینتر و یا بیشتر از ۷۰، حذف سختی پساب کمتر است. در نهایت در صورت استفاده از لخته کننده آهن (III) سولفات در شرایط بهینه ذکر شده، میزان حذف سختی کل به تقریب برابر ۹۹٫۱۱ درصد، خواهد شد.

اطلاعات این پژوهش، برای استفاده شورآب تصفیه شده در یک حوضچه خورشیدی و تولید نمک و آب، قابل استفاده خواهد بود.

و آلومینیم سولفات (آلوم) استفاده شود، سختی کاهش بیشتری را نشان می‌دهد. همچنین، مقدار رسانایی الکتریکی از ۷۷۱۰ به ۷/۴ زیمنس بر متر و در دمای ۱۷ الی ۱۸ درجه سانتیگراد اسیدیته از ۸٫۲ به ۱۱٫۰۹ می‌رسد.

می‌توان گفت، سرعت اختلاط در راکتور پیش تصفیه اول ۷۰ دور بر دقیقه میزان برخورد مؤثر بین مولکول‌های لخته کننده و پساب بیشتر شده و در نتیجه، مقدار بیشتری از یون‌های پدید

مراجع

- [1] Ahmed, M.; Arakel, A.; Hoey, D.; Coleman, M.; Elsevier, Desalination, 135, 37-45, 2001.
- [2] Mohamed, A.M.O.; Maraqa, M.; Al Handhaly, J.; Presented at the Conference on Desalination and the Environment, Santa Margherita, Italy, European Desalination Society, 22-26, 2005.
- [3] López, C.F.; Viedma, A.; Herrero, R.; Kaiser, A.S.; Elsevier, Desalination, 235, 179-198, 2009.
- [4] Xiaosheng, J.; Gianluca, D.; Elsevier, Membrane Science, 346, 263-269, 2010.
- [5] Roberts, D.A.; Johnston, E.L.; Elsevier, Water Research, 44, 5117-5128, 2010.
- [6] Wu, Y.; Xia, L.; Hu, Zh.; Liu, Sh.; Liu, H.; Nath, B.; Zhang, N.; Yang, L.; Elsevier, Environmental Pollution, 159, 2968-2973, 2011.
- [7] Jeawoo, L.; Hyo-Taek, C.; Elsevier, Desalination, 279, 86-96, 2011.
- [8] Knol, M.; Elsevier, Marine Policy, 35, 399-404, 2011.
- [9] Vergili, I.; Kaya, Y.; Sen, U.; Gönder, Z.B.; Aydiner, C.; Elsevier, Resources, Conservation and Recycling, 58, 25-35, 2012.
- [10] Sobhani, R.; Abahusayn, M.; Gabelich, Ch.J.; Rosso, D.; Elsevier, Desalination, 291, 106-116, 2012.
- [11] Johir, A.H.; Khorshed, C.; Vigneswaran, S.; Shon, H.K.; Elsevier, Desalination, 247, 85-93, 2009.