

جداسازی یون Cu^{2+} موجود در پسابها با استفاده از روشهای غشایی

مهدی پیوندی، علی حقیقی اصل و مسعود نصیری*

آزمایشگاه تحقیقاتی محیط های متخلخل، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان، سمنان

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۷/۱

تاریخ تصحیح: ۹۱/۰۸/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۹/۸

چکیده:

جهت دستیابی به آب قابل شرب و دارای استانداردهای زیست محیطی روشهای گوناگونی بکار می رود که در این میان، روشهای تصفیه غشایی به دلیل هزینه بهره برداری پایین و همچنین حجم کم پساب و کیفیت بالای آب تصفیه شده در سال های اخیر مورد استقبال گسترده ای قرار گرفته است. از روشهای مرسوم جداسازی غشایی، روشهای نانو فیلتراسیون به علت توانایی بالا در حذف یونهای دو ظرفیتی و مصرف کم انرژی در مقایسه با غشاء های اسمز معکوس توسعه بیشتری یافته اند. در این مطالعه به بررسی عملکرد غشاء پلیمری TFC-HR-100 در حذف یون مس، از ترکیب سولفات مس، در محلولهای آبی پرداخته شده است. غشاء TFC-HR-100 از دسته نانو فیلترها و از نوع غشاء کامپوزیتی می باشد که جهت حذف یون های دو ظرفیتی به کار می رود. در آزمایش های انجام شده عملکرد غشاء در حذف ناخالصی یون دو ظرفیتی مس از محلولهای آبی با غلظت های ۱۰۰ ppm تا ۵۰۰۰ ppm در فشارهای ۲۵-۵ bar مورد بررسی قرار گرفته است.

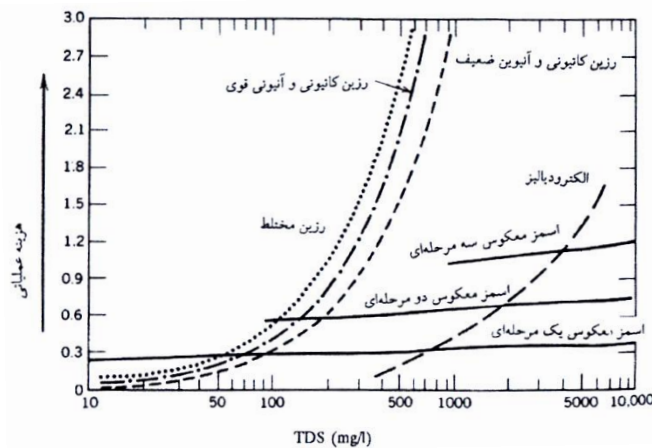
واژگان کلیدی: نانوفیلتراسیون، غشاء کامپوزیتی، سولفات مس، تصفیه پساب، محیط زیست

۱- مقدمه:

با پیشرفت تکنولوژی در طول ۳۰ سال گذشته تعداد صنایعی که پساب خود را در شبکه تصفیه پساب تخلیه می کنند، بطور فزاینده ای افزایش یافته است. این در حالیست که برخی از صنایع نیز پساب خود را به آب های سطحی جاری، همانند رودخانه ها تخلیه می کنند و زمینه آلوده شدن آبها را فراهم می نمایند. آلوده شدن آبهای سطحی با عبور از زمینهای حاوی مواد آلاینده نیز می تواند اتفاق بیافتد. در خصوص صنایع فلزی، به خصوص معادن، بخش اعظم آلودگیها مربوط به فلزات سنگین از جمله مس، روی و سرب می باشد. برای مثال میزان یون Cu^{2+} در دو نمونه سنگ نمک از معادن استان سمنان ۴۱۳۸/۵ ppm و ۲۶۵۸/۹ ppm گزارش شده است [۱]. پسابهای حاصل از شستشوی سنگ Cu^{2+} در معادن و کارخانههای تصفیه مس نیز دارای آلودگی بالای مس می باشند. میزان یون Cu^{2+} موجود در پسابهای یک کارخانه تولید برد مدارچاپی برابر ۱۲۰۰ ppm با $\text{pH}=2$ و در فرآیند شستشوی مس برابر ۱۰۲۰ ppm با $\text{pH}=1/76$ می باشد [۲]. یون Cu^{2+} نقش مهمی در متابولیسم بدن جانداران داشته، ولی میزان بالای آن مشکلات جدی همانند درد عضلات شکم، تشنج و ... را به دنبال خواهد داشت و در برخی موارد حتی ممکن است سبب مرگ جاندار نیز شود [۳].

میزان استاندارد یون Cu^{2+} در پساب جهت تخلیه به آب‌های سطحی و یا چاه جاذب برابر 1 mg/l می‌باشد [۴]. مقایسه میزان مجاز یون Cu^{2+} در محیط زیست با مقدار آن در پسابهای صنعتی، لزوم تصفیه پسابها را قبل از رهاسازی به محیط زیست دو چندان می‌کند. امروزه روش‌های متنوعی جهت حذف یون‌های فلزات سنگین از پسابها بکار می‌رود که عبارتند از: ترسیب شیمیایی، تبادل یونی، تصفیه غشایی، جذب سطحی و ...

از میان این روش‌ها جداسازی غشایی بدلیل راندمان بالا، کاربری آسان، هزینه بهره برداری پایین و حجم کم تجهیزات، بیشتر از سایر روش‌ها مورد توجه قرار گرفته است [۵].



شکل ۱. مقایسه هزینه روش‌های مختلف کاهش TDS [۶]

همانطور که در شکل ۱ مشخص است با افزایش غلظت آلودگی موجود در آب، هزینه عملیاتی حذف مواد محلول در آن توسط فرآیندهای غشایی افزایش چندانی نمی‌یابد و توجیه اقتصادی استفاده از فرآیندهای غشایی جهت تصفیه پساب و حذف مواد محلول در آن افزایش می‌یابد. از فرآیندهای غشایی مورد استفاده جهت حذف فلزات سنگین می‌توان به اولترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون، اسمز معکوس و الکترودیالیز اشاره کرد.

برای حذف فلزات دو ظرفیتی که شعاع آب پوشی آنها در محدوده نانومتری می‌باشد، غشاهای نانو ساختار مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته‌اند. این غشاها بدلیل قطر منافذ بزرگتر نسبت به غشاهای اسمز معکوس در فشار کاری پایین تری عمل جدا سازی را انجام می‌دهند و در نتیجه انرژی مصرفی جداسازی و هزینه آن را کاهش می‌دهند. در همین راستا حذف یون Cu^{2+} از پساب‌های با غلظت‌های مختلف، توسط یک غشاء از نوع TFC^1 (لایه نازک کامپوزیتی) مورد بررسی قرار گرفت. غشاء کامپوزیتی مورد استفاده در این مقاله از نوع TFC-HR-100 ساخت شرکت Koch می‌باشد.

¹Thin Film Composite membrane

۲- مواد و تجهیزات

نمک مورد استفاده، سولفات مس پنج آبه با خلوص ۹۹/۷۶۲ درصد ساخت شرکت Merck می‌باشد.

آب مقطر مورد استفاده در محلول سازی و آزمایشات بدون یون^۱ با pH بین ۷/۵-۶/۵ با رسانایی^۲ کمتر از ۱ $\mu\text{S}/\text{cm}$ می‌باشد.

برای کنترل دما در مخزن خوراک از یک دماسنج پرتابل مدل D-97877 با محدوده کاری 25.0°C ... 40.0°C و دقت $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ساخت شرکت TFA و همچنین برای کنترل دمای سیال ورودی به ماژول از یک سنسور دمایی نوع PT-100 و یک نمایشگر SAMWON استفاده می‌شود. فشار سنج های نصب شده در ورودی و خروجی ماژول از جنس استیل ۳۱۶، مارک WIKIA و از نوع روغنی می‌باشند.

برای کنترل pH در حین فرآیند تصفیه، از یک pH متر مدل Behineh SAT-2002 ساخت شرکت "سبلان آزمایش تهران" استفاده می‌شود. پمپ به کار گرفته شده در این مطالعه از نوع سانتریفیوژ ۶ مرحله ای، مدل SV-22 ساخت شرکت LOWARA ایتالیا از جنس استیل ۳۱۶ و با قابلیت افزایش فشار سیال فرآیندی تا فشار ۳۰ bar می‌باشد. پمپ برای خنک کردن سیال گردش از نوع سانتریفیوژ تک مرحله ای ساخت شرکت Technic، با هد ۵/۲ متر آب و دبی ماکزیمم ۸۰۰۰ لیتر بر ساعت می‌باشد.

از یک مبدل حرارتی صفحه‌ای از جنس استیل ۳۰۴ با ۴۱ صفحه ساخت شرکت طاهای قالب توس، برای انتقال گرما از سیال فرآیندی به مایع خنک کننده استفاده می‌شود. سنجش رسانایی آب تصفیه شده توسط یک رسانایی سنج WPA Linton Cambridge مدل CM-35 با دقت اندازه‌گیری ۰/۱ میکروزیمنس انجام می‌شود. میزان دبی جریان عبوری از روی غشاه توسط یک روتامتر ساخت شرکت MBLD با شاغولی از جنس استیل ۳۱۶ با قابلیت اندازه‌گیری جریان ۱۸-۲ لیتر بر دقیقه اندازه‌گیری می‌شود.

از یک ترازو با دقت ۰/۰۰۱، مدل GF-300 با قابلیت اندازه‌گیری حداکثر ۳۱۰ گرم، ساخت شرکت AND استفاده می‌شود.

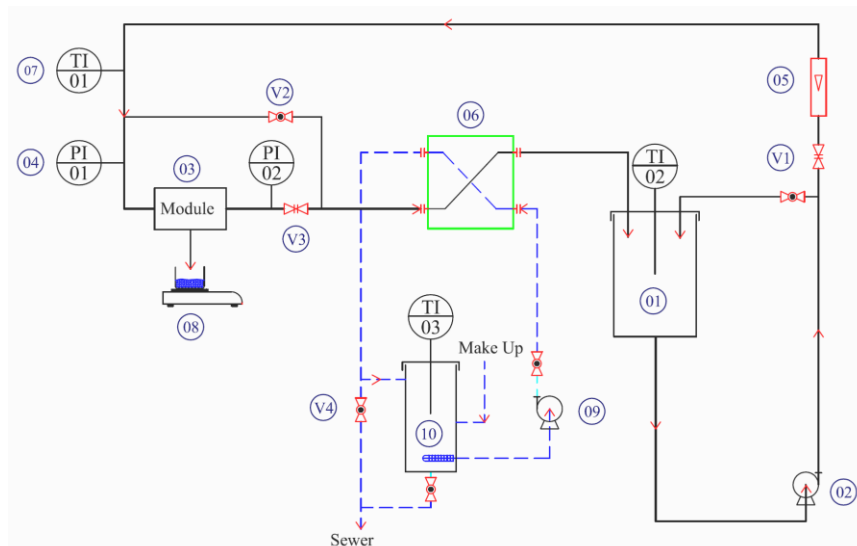
برای سنجش غلظت یون مس از دستگاه جذب اتمی شعله Shimadzu-AA680 استفاده می‌شود. ماژول از جنس استیل ۳۱۶ با سطح فعال $62/7 \text{ cm}^2$ طراحی و ساخته شده است. غشاه مورد استفاده از نوع Proprietary TFC polyamide با حداکثر فشار عملیاتی ۶۰۰ psi و حداکثر دمای عملیاتی 45°C و محدوده کاری pH=۴-۱۱، ساخت شرکت KOCH می‌باشد. برای بررسی عملکرد غشاه TFC-HR-۱۰۰ برای حذف یون های مس با الگوی جریان متقاطع لازم است دما، pH، دبی و فشار سیال عبوری از روی غشاه اندازه‌گیری شود. در این مطالعه دستگاه تصفیه غشایی آزمایشگاهی با مشخصات شکل (۲) ساخته شد.

۲-۱- روش آزمایش:

در این آزمایش ها ابتدا غشاه مورد نظر در ماژول (۳) قرار گرفته و در محل تثبیت می‌گردد. باید توجه داشت این عمل به نحوی صورت پذیرد که سطح فعال غشاه ثابت بماند. پس از محکم نمودن پیچ های ماژول و آببندی غشاه، تمام شیرها به جز شیر جریان کنار گذر ماژول (V2) بسته می‌شود. برای آزمایش اول، مخزن خوراک (۱) با آب مقطر بدون یون پر می‌شود. با روشن شدن پمپ طبقاتی

¹Deionized water²Conductivity

(۲) فشار سیال در خروجی پمپ افزایش می یابد. با باز شدن شیر کنترل جریان (V1)، سیال فرآیندی در خطوط جریان می یابد. برای کنترل دمای سیال فرآیندی، لازم است پمپ مایع خنک کننده (۹) روشن شود و دبی مایع خنک کننده توسط شیر (V4) تنظیم شود. پس از پایداری نسبی دمای سیال فرآیندی ورودی به ماژول روی ۳۰ درجه سلسیوس، به آرامی شیر جریان کنار گذر ماژول (V2) بسته می شود و هم زمان شیر تنظیم فشار ماژول (V3) تا نیمه باز می شود. با کمک شیر کنترل جریان (V1) و شیر تنظیم فشار ماژول (V3) دبی سیال فرآیندی گذرنده از روی ماژول و فشار آن تنظیم می شود.



شکل ۲. نمایی از لوله کشی و تجهیزات (P&ID) دستگاه تصفیه غشایی آزمایشگاهی

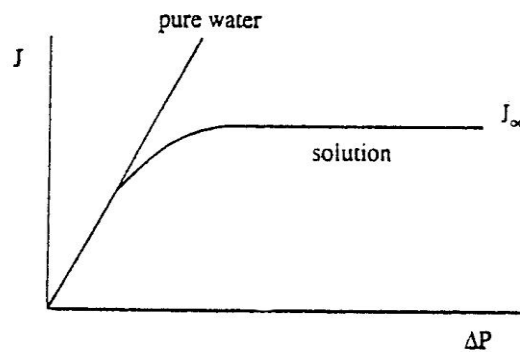
۱. مخزن خوراک ۲. پمپ طبقاتی تقویت فشار ۳. ماژول (محل قرار گیری غشاء) ۴. فشارسنج ۵. دبی سنج ۶. مبدل حرارتی ۷. سنسور دما سنج ۸. ترازو جهت اندازه گیری جریان تصفیه شده ۹. پمپ مایع خنک کننده ۱۰. مخزن مایع خنک کننده
- V1. شیر کنترل جریان V2. شیر جریان کنار گذر ماژول V3. شیر تنظیم فشار ماژول V4. شیر تنظیم دما

در مسیر حرکت سیال، دبی جریان توسط روتامتر اندازه گیری می شود. دمای سیال ورودی به ماژول نیز توسط سنسور دمای TI-02 ثبت می شود. فشارسنج های PI-01 و PI-02 نیز فشار سیال را به ترتیب در ورود به ماژول و خروج از آن نشان می دهند. دمای سیال فرآیندی بعلاوه کار وارد شده در پمپ افزایش یافته، بطوریکه برای کنترل و تنظیم دما بایستی از یک مبدل حرارتی استفاده نمود. این مبدل از نوع صفحه ای استیل بوده که بعد از ماژول نصب می گردد. سیال خنک کننده مخزن آب با دمای حدودی ۵ درجه سانتیگراد می باشد که توسط پمپ شماره ۱۰ بصورت گردشی در سیستم حرکت کرده و باعث خنک شدن سیال خروجی از ماژول می گردد. برای تعیین عملکرد غشاء، غلظت یون Cu^{2+} ، رسانایی آب^۱ یا مواد محلول در آب^۲، میزان عبور دهی (فلاکس) و pH اندازه گیری شده است. برای آزمایش اول طی مدت ۳۰ دقیقه، دبی و فشار به ترتیب تا ۱۰ lit/min و ۵ bar افزایش می یابد. پس از رسیدن به دبی و فشار مورد نظر ۳۰-۴۰ دقیقه زمان برای رسیدن به حالت دائمی در غشاء لحاظ می شود. در این حالت عبور آب از غشاء شروع می گردد. برای

¹Conductivity

²Total Dissolved Solid (TDS)

سنجش میزان آب تصفیه شده از یک ترازوی دیجیتالی (۸) در خروجی غشاء استفاده می شود و جرم آب عبوری از آن طی یک زمان مشخص اندازه گیری می گردد. با تقسیم این مقدار بر سطح فعال غشاء میزان فلاکس عبوری از غشاء بدست می آید. این شیوه برای دبی‌های ۱۰ lit/min و فشارهای ۵bar، ۱۰bar، ۱۵bar، ۲۰bar، ۲۳.۵bar تکرار می‌گردد و سپس نمودار فشار برحسب فلاکس ترسیم می‌گردد. برطبق مراجع موجود نمودار فلاکس جریان عبوری از غشاء برحسب تغییرات فشار برای آب مقطر بصورت خطی می باشد [۷]. از این روش به عنوان روش مرجع برای اطمینان از سالم بودن غشاء استفاده می‌گردد شکل (۳).



شکل ۳. فلاکس عبوری از غشاء برحسب تغییرات فشار

برای تعیین عملکرد غشاء در حذف کاتیون Cu^{2+} ، از نمک سولفات آن با غلظت های ۱۰۰ppm، ۲۵۰ppm، ۵۰۰ppm، ۱۰۰۰ppm، ۲۰۰۰ppm و ۵۰۰۰ppm محلولی به حجم ۲۵ لیتر تهیه، و آزمایش مطابق توضیحات بالا انجام گردید. برای اطمینان از تکرار پذیری نتایج، کلیه آزمایش‌ها در ۳ نوبت تکرار شدند.

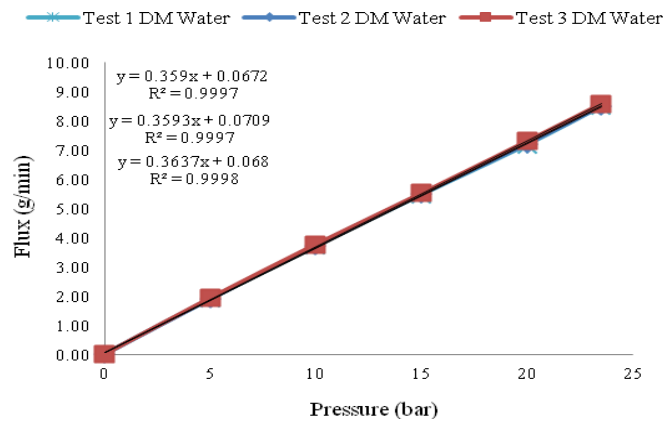
در این سیستم مطابق شکل (۲) سیال فرایندی که همان محلول حاوی یون Cu^{2+} می باشد، توسط پمپ چند مرحله ای از مخزن خوراک به سمت ماژول فرستاده می‌شود. در این فرآیند گرادیان فشار عامل عبور آب از غشاء بوده که سبب جداسازی یون های مس از آب خواهد شد و یون های مس نیز به علت پدیده کوپلینگ می توانند در مقیاس کم از این غشاء همراه آب عبور نمایند.

۳- نتایج و بحث:

۳-۱- بررسی سلامت غشاء پس از نصب در ماژول:

نتایج حاصل از اندازه گیری میزان گذر آب از غشاء با استفاده از آب بدون یون^۱ در فشارهای مختلف حاکی از سلامت غشاء و صحت عملکرد آن برای آزمایش با محلول سولفات مس می‌باشد. همانطور که در شکل (۴) ملاحظه می‌گردد، داده های بدست آمده با دقت خوبی، خطی می باشند.

^۱Deionized water



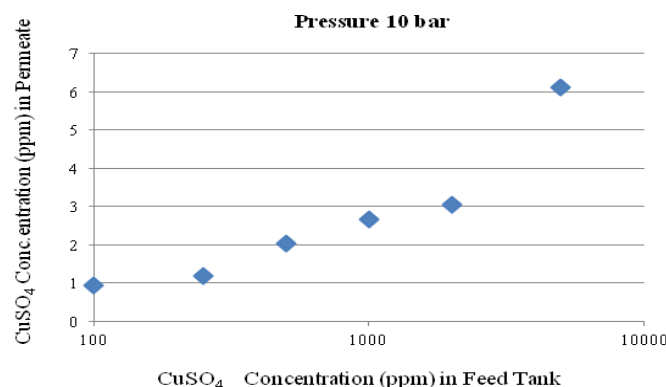
شکل ۴. فلاکس عبوری از غشاء برای آب مقطر در دمای ۳۰°C

۳-۲- اثر غلظت خوراک روی حذف سولفات مس از محلول آبی:

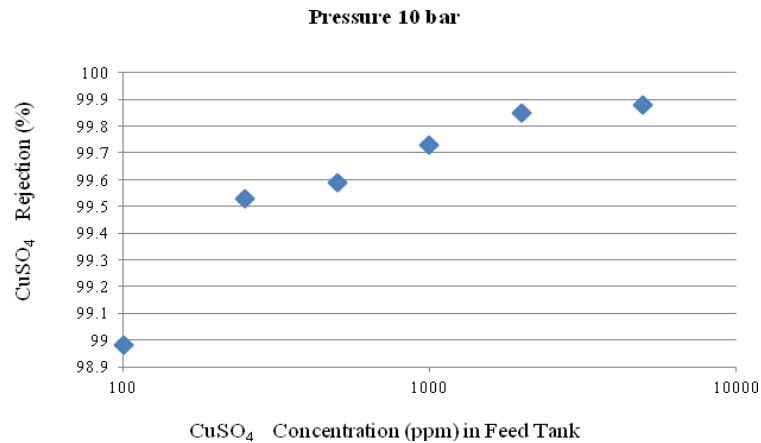
جهت بررسی تاثیر غلظت خوراک ورودی بر میزان حذف سولفات مس و سنجش میزان آب تصفیه شده توسط غشاء، عملکرد غشاء در فشار ۱۰ bar مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در شکل (۵) مشخص است با افزایش غلظت در خوراک ورودی به غشاء، کیفیت آب تصفیه خروجی کاهش می یابد. این امر نشانگر این موضوع است که علاوه بر فشار، عامل گرادیان غلظت نیز در عبور سولفات مس از غشاء و کیفیت آب تصفیه شده موثر است.

از سوی دیگر با بررسی نسبت غلظت سولفات مس در آب تصفیه شده و خوراک ورودی به ماژول شکل (۶)، مشخص می شود با افزایش غلظت خوراک این نسبت رو به کاهش است. این پیامد نشانگر افزایش درصد حذف یا پس زنی غشاء در غلظت های بالا می باشد. نتیجه بدست آمده بیانگر افزایش مقاومت غشاء در مقابل انتقال جرم با افزایش غلظت خوراک ورودی به آن می باشد.

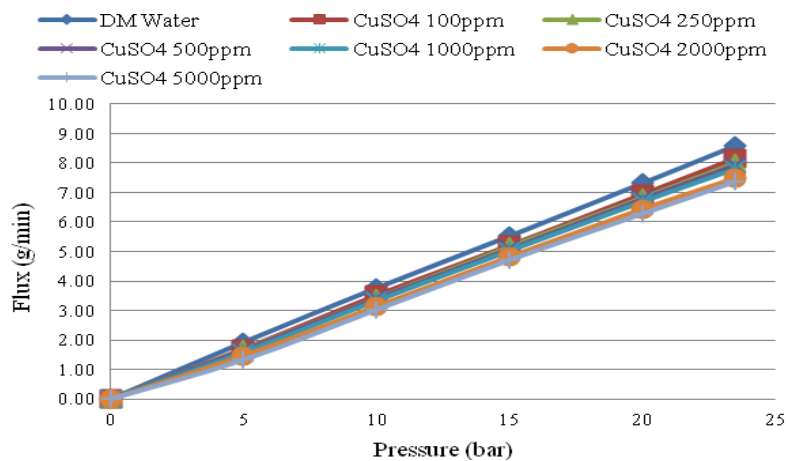
افزایش غلظت خوراک علاوه بر کاهش کیفیت آب تصفیه شده، در کلیه فشارها، میزان انتقال جرم و حجم آب عبوری از غشاء را نیز کاهش می دهد شکل (۷). این امر نشانگر افزایش مقاومت انتقال جرم در اثر افزایش ناخالصی ها (سولفات مس) در فاز مایع می باشد.



شکل ۵. تاثیر غلظت سولفات مس در تانک خوراک روی کیفیت آب تصفیه شده در فشار ۱۰ bar و دمای ۳۰°C



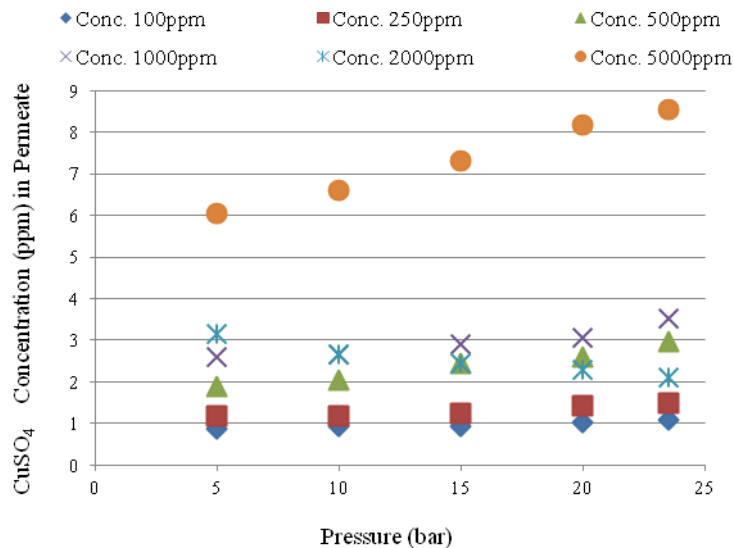
شکل ۶ اثر غلظت بر میزان پس زنی غشاء در فشار ۱۰ bar برای دمای 30°C



شکل ۷ اثر غلظت بر حجم آب گذرنده از غشاء برای دمای 30°C

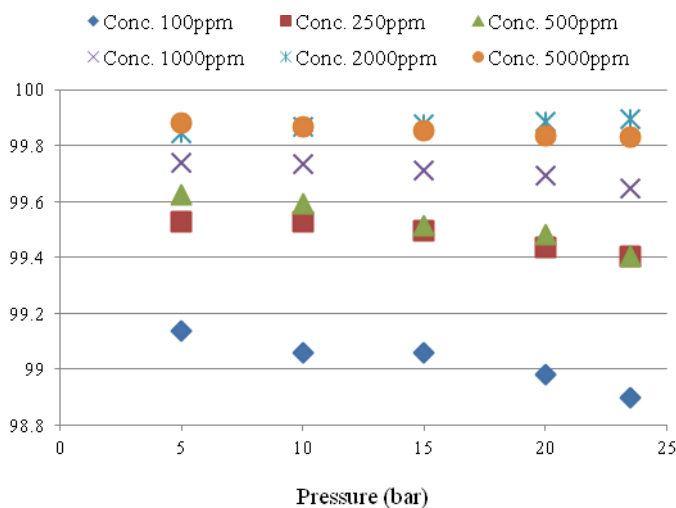
۳-۳- اثر فشار بر حذف فلز سولفات مس از محلول آبی:

نتایج بدست آمده از داده های آزمایشگاهی نشان می دهد، افزایش فشار روی غشاء، میزان حجم آب تصفیه شده را افزایش می دهد. افزایش گرادیان فشار سبب می شود تا فلاکس از بین غشاء افزایش یابد با این تفاوت که این رخداد با کاهش کیفیت آب تصفیه شده همراه خواهد بود. با افزایش فشار عملیاتی غشاء، در حقیقت نیرو محرکه انتقال جرم افزایش یافته و در نتیجه مقاومت غشاء در مقابل عبور مولکول های سولفات مس کمتر می گردد و در نتیجه، غلظت کاتیون Cu^{2+} در آب تصفیه شده افزایش می یابد. شکل (۸) به وضوح مؤید این موضوع می باشد.



شکل ۸. تاثیر فشار روی کیفیت آب تصفیه شده در غلظت های مختلف برای دمای ۳۰°C

شکل (۹) نشان می دهد در صورت ثابت بودن غلظت خوراک با افزایش فشار (به عکس افزایش غلظت خوراک) میزان حذف یون Cu^{2+} توسط غشاء کاهش می یابد. این موضوع تا زمانی که افزایش فشار از فشار کاری غشاء کمتر است، با شیب ملایمی ادامه دارد. در صورت افزایش بیش از حد فشار این شیب افزایش می یابد، تا جایی که غشاء تخریب شده و مقدار غلظت یون Cu^{2+} در آب تصفیه شده با غلظت آن در خوراک برابر می گردد.



شکل ۹. اثر فشار بر میزان پس زنی غشاء در غلظت های مختلف برای دمای ۳۰°C

۴- نتیجه گیری:

تاثیر فشار و غلظت روی فلاکس آب تصفیه شده در غشاء ها به ترتیب مطابق قانون دارسی و فیک قابل بیان است به نحوی که با افزایش فشار، میزان آب تصفیه خروجی از غشاء نیز افزایش می یابد. در طی این فرایند کیفیت آب تصفیه شده کاهش یافته که این به

معنای کاهش توانایی غشاء در حذف یون Cu^{2+} می باشد. از طرف دیگر با افزایش غلظت سولفات مس در خوراک، کیفیت آب تصفیه شده کاهش یافته و همچنین فلاکس خروجی از غشاء (حجم آب تصفیه شده) نیز کم خواهد شد.

جدول (۱) نتایج حاصله از این مطالعه را با استفاده از غشاء TFC-HR-100 در مقایسه با سایر روش‌ها نشان می دهد. عملکرد بالای این غشاء در حذف یون Cu^{2+} از پساب‌ها در مقایسه با سایر روش‌ها در این جدول مشخص است. درصد حذف این غشاء برای کاتیون Cu^{2+} در اغلب موارد بالاتر از ۹۹٪ می باشد که در مقایسه با سایر روشهای موجود قابل قبول می باشد.

جدول ۱. مقایسه درصد حذف یون Cu^{2+} با روش‌های مختلف

روش	افزودنی	غلظت اولیه (ppm)	pH	راندمان حذف
*نانو فیلتراسیون HR-100 membrane	-	۱۰۰-۵۰۰۰	۶-۷	۹۸/۹-۹۹/۸۸
ترسیب شیمیایی [۸]	CaO	۱۰۰	۷-۱۱	۹۹/۳۷-۹۹/۶
اولترا فیلتراسیون [۹ و ۱۰]	polyethyleneimine	۵۰	>۶	۹۴
	Carboxy methyl cellulose	۱۰	۷	۹۷/۶
اولترا فیلتراسیون [۹]	Poly(acrylic acid) sodium	۱۶۰	۵/۵	۹۹/۵
اسمز معکوس [۱۰]	Na ₂ EDTA	۵۰۰		۹۹/۵
شناور سازی الکتروشیمیایی [۱۱]	جریان ۰/۳A	۱۰۰	۶	۹۹

* روش بکارگرفته شده در این مقاله می باشد.

Removal of Copper Ions from Wastewater through Membrane Filtration Methods

Mahdi Peyvandi, Ali Haghghi Asl and Masoud Nasiri*

Porous Media Research Laboratory, School of Chemical, Gas and Petroleum Engineering, Semnan University, Semnan
35131-19111, Iran

Received: 22 September 2012 Received in revised form: 12 November 2012 Accepted: 28 November 2012

Abstract

Various methods are used to prepare potable water with environmental standards. Among them, membrane filtration has received particular attention in recent years for low operating costs, low volume wastewater and high quality water. Among the conventional membrane filtration methods, nanofiltration ones have been further developed due to high capability to remove divalent ions and low energy consumption compared to reverse osmosis membranes. In this study, performance of polymer membrane TFC-HR-100 in removal of copper ions from the copper sulfate in aqueous solutions has been investigated. Polymer membrane TFC-HR-100 from the nanofilter and composite category is used to remove divalent ions. In the experiments performed, elimination of the impurities of the divalent copper ions from aqueous solutions with concentrations ranging from 100 ppm to 5000 ppm at 5-25 bar pressures has been studied.

Key words: Nanofiltration, Composite membrane, Sulfate copper, Wastewater treating, Environment

*Corresponding Author: Porous Media Research Laboratory, School of Chemical, Gas and Petroleum Engineering, Semnan University, Semnan 35131-19111, Iran.

- [۱] اولین همایش ملی نمک، سال ۱۳۸۷، بررسی فلزات سنگین سنگ نمک استان سمنان، فرامرز هرمزی، سمیه اتوکش، سیدحسن زوارموسوی.
- [2] Abdul Latif Ahmad and Boon Seng Ooi, *Chemical Engineering Journal*, **156** (2010) 257.
- [3] A. T. Paulino, F. A. S. Minasse, M. R. Guilherme, A. V. Reis, E.C. Muniz and Nozaki, *J. Colloid Interface Sci.* **301** (2006) 479.
- [۴] استاندارد ملی ایران جهت دفع فاضلاب های صنعتی به سیستم تصفیه پساب شهرک های صنعتی.
- [5] Fua Fenglian and Qi Wang, *A review, Journal of Environmental Management*, 92 (2011) 407.
- [۶] چالکش امیری محمد، اصول تصفیه آب، ۱۳۸۸، صفحه ۴۰۷.
- [7] Marcel Mulder, 1996, *Basic Principles of Membrane Technology*, Second Edition, Page 297.
- [8] Q. Y. Chen, Z. Luo, C. Hills, G. Xue and M. Tyrer, *Water. Res.* **43** (2009) 2605.
- [9] R. Camarilloa, J. Llanos, L. García-Fernández, A. Pérez and P. Cañizares, *Sep. Purif. Technol.* **70** (2010) 320.
- [10] M. Mohsen-Nia, P. Montazeri and H. Modarress, *Desalination*, **217** (2007) 276.
- [11] A. Khelifa, S. Moulay and A. W. Naceur, *Desalination*, **181** (2005) 27.