مجله سلامت و محیط زیست، فصلنامه‌ی علمی پژوهشی
انجمن علمی بهداشت محیط ایران
دوره هجدهم ، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۴، صفحات ۳۳۵ تا ۳۴۸

Available online: https://ijhe.tums.ac.ir

مقاله پژوهشی

تصفیه پساب صنعت کاغذسازی با فرایند ترکیبی انعقاد و لخته سازی- ازن زنی- فیلتراسیون غشایی بمنظور بازچرخانی و استفاده مجدد از آن

مهدی الیاسی کجاباد[۱،*]، علی اقدمی[۲]

۱-گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان، ایران
۲- دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۱
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵

واژگان کلیدی: پساب کاغذسازی، انعقاد و لخته سازی، ازن زنی، فیلتراسیون غشایی، نیاز شیمیایی اکسیژن

چکیده

زمینه و هدف: صنعت کاغذسازی یکی از صنایع پرمصرف آب است که روزانه حجم زیادی پساب توسط شرکت‌های فعال در این حوزه تولید می‌شود. مدیریت درست پساب تولید شده در این صنعت، تصفیه، بازچرخانی و استفاده مجدد باعث جلوگیری از آلودگی محیط زیست توسط این پساب شده و حفظ منابع آبی کشور را به دنبال خواهد شد. در این مطالعه از فرایند سه مرحله‌ای انعقاد و لخته سازی- ازن زنی- فیلتراسیون غشایی برای تصفیه پساب کاغذسازی استفاده شد.

روش بررسی: در مطالعه حاضر ابتدا از PAC برای حذف ذرات درشت و در ادامه از ازن زنی به منظور تخریب ترکیبات پیچیده استفاده گردید. برای تصفیه نهایی از فیلتراسیون غشایی استفاده شد. در هرکدام از مراحل، COD پساب اندازه گیری شده و مقایسه شد.

یافته‌ها: هرکدام از مراحل استفاده شده نقش کلیدی در تصفیه پساب داشتند بطوری که مرحله انعقاد و لخته سازی در حذف حجم زیادی از ذرات معلق و مرحله ازن زنی در حذف رنگ و تخریب ترکیبات پیچیده و مرحله فیلتراسیون غشایی بعنوان مرحله نهایی در حذف ذرات معلق بسیار ریز، نقش منحصربفردی ایفا کردند، به طوری که COD پساب تصفیه شده نسبت به پساب خام ۶۶ درصد کاهش داشت.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از بررسی شار عبوری غشا نشان داد در pH برابر با ۱۱ و ۱۴، شارعبوری غشا برای پساب نزدیک شار عبوری آب خالص بود که نشانی بر قابلیت عملیاتی شدن این روش تصفیه در راستای تصفیه و بازچرخانی پساب کاغذسازی بود.

پست الکترونیکی نویسنده مسئول:
m.elyasi@bktu.ac.ir

Please cite this article as: Elyasi Kojabad M, Aghdami A. The treatment of papermaking effluent with the hybrid process of coagulation-ozonation-membrane filtration in order to recycle and reuse. Iranian Journal of Health and Environment. 2025;18(2):335-48.

Copyright © 2025 Iranian Association of Environmental Health، and Tehran University of Medical Sciences. Published by Tehran University of Medical Sciences. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Noncommercial uses of the work are permitted، provided the original work is properly cited.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-11]

مقدمه

تصفیه پساب کاغذسازی یکی از جنبه‌های حیاتی در مدیریت محیط زیست و پایداری صنعتی به شمار می‌آید. صنعت کاغذسازی به عنوان یکی از صنایع بزرگ و پرمصرف آب، مقادیر قابل توجهی پساب تولید می‌کند که حاوی مواد آلی، شیمیایی و رنگ‌های مختلف است (۱). این پساب‌ها در صورت عدم تصفیه مناسب، می‌توانند به شدت به منابع آب، خاک و اکوسیستم‌های محلی آسیب برسانند و سلامت عمومی را تهدید کنند (۲). با توجه به افزایش تقاضا برای کاغذ و محصولات کاغذی، ضرورت تصفیه پساب‌های تولید شده در این صنعت بیش از پیش احساس می‌شود. تصفیه این پساب‌ها نه تنها به کاهش آلودگی‌های محیط زیستی کمک می‌کند، بلکه امکان استفاده مجدد از آب و مواد اولیه را نیز فراهم می‌آورد (۳). به همین دلیل، فرآیندهای تصفیه پساب کاغذسازی باید به گونه‌ای طراحی شوند که کارایی بالا و تأثیرات محیط زیستی کمتری داشته باشند. در این راستا، استفاده از فناوری‌های نوین و روش‌های مؤثر تصفیه، می‌تواند به بهبود کیفیت پساب‌های تولیدی و کاهش اثرات منفی آنها بر محیط زیست کمک کند (۴). بر اساس روش‌های استفاده شده برای تصفیه پساب کاغذسازی، این روش‌ها را می‌توان در سه گروه روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی دسته بندی کرد که انتخاب روش مناسب بستگی به نوع و غلظت آلودگی‌ها، هزینه‌ها و الزامات محیط زیستی دارد (۵). در این میان، روش‌های بیولوژیکی با چالش‌هایی نظیر حساسیت به شرایط محیطی، زمان طولانی تصفیه، محدودیت در حذف برخی آلودگی‌ها و بویژه حساسیت میکروارگانیسم‌ها به مواد سمی و شیمیایی مواجه هستند که می‌تواند کارایی و اثربخشی این روش‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. روش‌های شیمیایی تصفیه پساب به دلیل توانایی در حذف آلودگی‌ها و مواد شیمیایی مختلف، به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، این روش‌ها معایب و چالش‌هایی نظیر محدودیت در حذف برخی آلودگی‌ها و نیاز به کنترل دقیق نیز دارند که می‌تواند بر کارایی و اثرات محیط زیستی آنها تأثیر بگذارد (۶). روش‌های فیزیکی نیز به دلیل سادگی و کارایی در حذف ذرات معلق و ناخالصی‌های بزرگ، به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند اما محدودیت در حذف آلودگی‌های شیمیایی و کاهش کارایی با افزایش غلظت آلودگی از جمله معایبی است که این روش‌ها دارند (۷). در سال‌های اخیر محققان از روش‌های فیزیکی و شیمیایی مختلفی برای تصفیه پساب کاغذسازی استفاده کرده‌اند. Partovinia و همکاران (۱) از پرلیت بعنوان جاذب بمنظور تصفیه فیزیکی پساب کاغذسازی استفاده کردند و توانستند اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (Chemical Oxygen Demand: COD) مربوط به پساب را تا ۴۸ درصد کاهش دهند. Abdolkarimi-Mahabadi و همکار (۸) از روش ازن زنی بعنوان یک روش شیمیایی بمنظور تصفیه پساب کاغذسازی استفاده کردند که در نهایت توانستند COD پساب را تا ۸۰ درصد کاهش دهند. Hemmatabadi و همکار (۹) از روش الکتروکواگولاسیون برای کاهش COD پساب کاغذسازی استفاده کردند که در این روش COD تا ۶۰ درصد کاهش داشت. Birjandi و همکاران (۱۰) از روش انعقاد و لخته سازی برای تصفیه پساب کاغذسازی استفاده کردند. با استفاده از روش مذکور COD پساب کاهش ۸۸ درصدی داشت. علیرغم اینکه استفاده از روش‌های مذکور به صورت مستقل نقاط قوت قابل توجهی داشته اما هرکدام از این روش‌ها معایبی دارند که به نحوی کاربرد گسترده آنها را در صنعت کاغذسازی تحت تاثیر قرار می‌دهد. ترکیب روش‌های مختلف در فرایند تصفیه پساب کاغذسازی علاوه بر غلبه بر نقص هر یک از روش‌ها می‌تواند اثر هم افزایی روی فرایند تصفیه داشته و کارایی آن را تا میزان قابل توجهی افزایش دهد (۱۱، ۱۲). ترکیب روش‌های مختلف در تصفیه پساب‌ها، توسط محققان به انواع مختلف صورت گرفته است. Chen و همکاران (۱۳) از روش تلفیقی ازن زنی و فیلتراسیون غشایی برای تصفیه آب استفاده کردند و با بهینه کردن زمان ازن زنی، نتایج مناسبی

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-11]

در این زمینه بدست آوردند. Wei و همکاران (۱۴) از ازن زنی آنلاین بمنظور غلبه بر گرفتگی غشایی در تصفیه آب غنی از جلبک استفاده کردند. نتایج نشان داد استفاده از ازن زنی آنلاین به خوبی لایه کیک تشکیل شده روی حفرات غشایی را تخریب کرده و مانع از گرفتگی غشایی می‌شود. Karahan و همکاران (۱۵) درکنار ازن زنی از هیدروژن پروکساید بمنظور تصفیه آب خاکستری استفاده کردند که توانستند COD را تا ۳۷ درصد کاهش دهند. علاوه بر این آن‌ها از روش ترکیبی ته نشینی با $FeCL_3$ و ازن زنی نیز استفاده کردند و توانستند COD را تا ۷۱ درصد کاهش دهند. Aghdami و همکار (۱۶) از روش ترکیبی انعقاد و لخته سازی و فیلتراسیون غشایی بمنظور تصفیه فاضلاب شهری استفاده کردند. روش تصفیه طراحی شده توانست کدورت پساب را تا زیر NTU ۱ کاهش داده و پساب تصفیه شده قابلیت استفاده مجدد در صنایع را داشت. از آنجایی که ترکیب روش‌های مختلف اثر هم افزایی روی فرایند تصفیه داشته و کارایی آن را تا میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد و با توجه به این مساله که صنعت کاغذسازی در ردیف بزرگترین مصرف کننده‌های آب در کشور است، نیاز است روشی ترکیبی برای تصفیه این نوع پساب معرفی شود تا از اتلاف حجم زیادی آب توسط این صنعت جلوگیری شود. روش ترکیبی معرفی شده باید به گونه‌ای باشد که پساب تصفیه شده بدون ذرات معلق و الیاف ریز باشد تا بتواند بازچرخانی شده و مورد استفاده مجدد قرار گیرد. روش‌های استفاده شده در کنار هم باید مکمل هم باشند تا بتوانند ضعف یکدیگر را پوشش داده و اثر هم افزایی داشته باشند.

در این مطالعه از روش ترکیبی انعقاد و لخته سازی- ازن زنی- فیلتراسیون غشایی بمنظور تصفیه پساب مربوط به شرکت صنایع کاغذسازی شهر تبریز استفاده شد. مراحل تصفیه به شکلی طراحی شد که مرحله اول بعنوان مرحله انعقاد و لخته سازی، بمنظور حذف ذرات درشت پساب تعبیه شده و در مرحله دوم از ازن زنی بمنظور تخریب و شکستن ترکیبات بزرگ استفاده شد. در ادامه فیلتراسیون غشایی بعنوان مرحله نهایی و بمنظور حذف ذرات معلق ریز به کار گرفته شد. لازم به ذکر است که کاهش نسبی COD توسط هرکدام از مراحل تعبیه شده نیز یکی از اهداف طراحی این نوع فرایند بود تا در مجموع بتوان به COD های پایین دست یافت. هدف نهایی در این پژوهش، تصفیه پساب مورد نظر و رساندن آن به کیفیتی بود که بتواند بصورت مجدد بازچرخانی شده و در فرایند تولید خمیر کاغذ استفاده شود. با پیاده سازی چنین فرایندی آب مصرفی کاغذسازی به دلیل استفاده مجدد به حداقل میزان خود رسیده و تنها مقداری از پساب که در فرایند تولید تبخیر شده نیاز به تامین مجدد خواهد داشت.

مواد و روش‌ها

ـ مواد شیمیایی مورد استفاده

سود با خلوص ۹۸ درصد و پودر آلومینا با خلوص ۹۶ درصد و پلی آلومینیوم کلراید (PAC) با خلوص ۹۹ درصد تهیه شدند. دی آمونیوم فسفات، پتاسیم متا بی سولفیت، آکریل امید با خلوص ۹۹ درصد نیز از شرکت مرک خریداری شدند. پساب خام مورد نظر با mg/L COD ۶۲۰۰۰، مربوط به پسابی است که از شرکت صنایع کاغذسازی شهر تبریز در تابستان ۱۴۰۳ تهیه شده است.

ـ ساخت غشای سرامیکی

آب مقطر در ظرفی ریخته شده و آکریل امید به آب مقطر اضافه شد. بعد از حل شدن کامل آکریل امید، pH محلول توسط سود روی ۹ تنظیم شد. در ادامه، پتاسیم متا بی سولفیت و در نهایت پودر آلومینا به تدریج به محلول اضافه شدند. بمنظور دستیابی به محلول یکنواخت، محلول مورد نظر h ۴۸ همزده شد. بعد از یکنواخت شدن محلول تهیه شده، دمای محلول به ۵۰°C افزایش داده شد و دی آمونیوم فسفات که به عنوان ماده آغازگر واکنش است به محلول اضافه شده و بعد از گذشت min ۲ شکل دهی غشا انجام گردید. غشای قالب ریزی شده تحت عملیات حرارتی ۱۰۰۰°C قرار گرفت تا فرایند تف جوشی صورت گیرد (۱۷، ۱۸).

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-11]

_ *فرایند تصفیه*

شماتیک فرایند سه مرحله‌ای ته نشینی، ازن زنی و فیلتراسیون غشایی استفاده شده در شکل ۱ آورده شده است. در حالت کلی، ۶ نمونه پساب با حجم ۲۰ L بصورت جداگانه مورد آزمایش قرار گرفت. مراحل اصلی فرایند به این صورت است که ابتدا پساب خروجی از کاغذسازی در دمای محیط جمع‌آوری شده و ابتدا تاثیر pH بر روی ته نشینی پساب‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در این مرحله pH مربوط به ۲ نمونه به ۸، ۲ نمونه دیگر به ۱۱ و دو نمونه آخری به ۱۴ رسانده شد. در ادامه به یک نمونه از هر pH، منعقدکننده PAC به اندازه ۳۰۰ mg/L اضافه شده و اثر آن نیز بر ته نشینی مواد معلق در پساب مورد بررسی قرار گرفت. بعد از انعقاد و لخته سازی ذرات سنگین (۱۵ min) در هر ۶ نمونه، پساب پیش‌تصفیه شده با استفاده از پمپ به مخزن دیگر انتقال داده شد. ۶ نمونه پساب پیش تصفیه شده با مقدار ۱/۲ g/L ازن زنی شده و اثر مقدار ازن ازنی بر روی کیفیت پساب و COD آن مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله سوم، تصفیه نهایی با استفاده از غشای سرامیکی رو پساب‌ها صورت گرفت. شش نمونه تهیه شده که در جدول ۱ به اختصار آورده شده است. شار جریان خروجی از غشا برحسب $L/m^2.h$ با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد (۱۹).

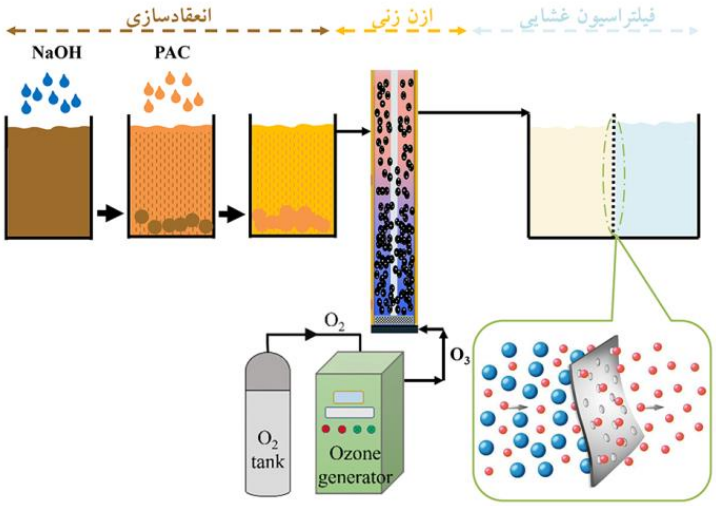
جدول ۱- مشخصات نمونه‌های تهیه شده برای بررسی اثر pH و PAC

نام نمونه	شرایط نمونه
pH8PAC	pH= ۸, PAC (۳۰۰ PPM)
pH8	pH= ۸
pH11PAC	pH=۱۱, PAC (۳۰۰ PPM)
pH11	pH=۱۱
pH14PAC	pH=۱٤, PAC (۳۰۰ PPM)
pH14	pH=۱٤

$$J = \frac{V}{A.\Delta t} \quad (1)$$

که در آن A سطح موثر غشا برحسب m^2، V حجم جریان عبور کرده برحسب L و Δt نشان‌دهنده بازه زمانی برحسب h است.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-11]



شکل ۱- شماتیک تصفیه پساب کاغذسازی بمنظور بازچرخانی و استفاده مجدد

_ اندازه گیری COD

اندازه‌گیری COD به روش کالری‌متری مطابق روش‌های استاندارد آزمایش آب و پساب صورت گرفت. طبق این روش، واکنشگرهای COD به ۲/۲ mL از نمونه در یک ظرف مخصوص اضافه شده و به مدت ۲ h در دمای ۱۲۱ °C در دستگاه ترموراکتور قرار گرفت. بعد از خنک شدن ظرف، جذب محلول در طول موج ۶۱۱ nm توسط فتومتر خوانده‌شده و از روی منحنی کالیبراسیون، میزان COD تعیین گردید.

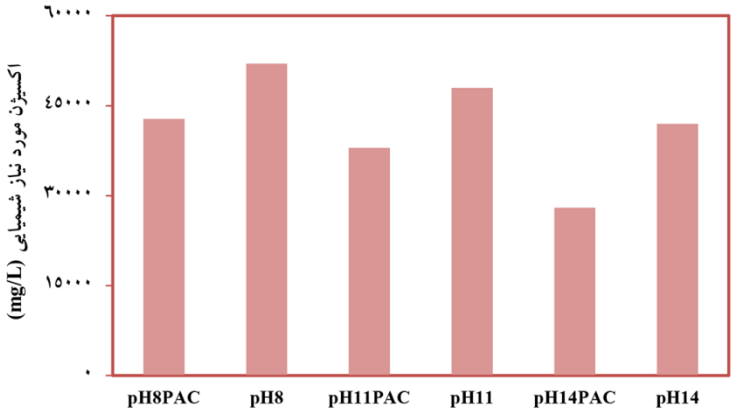
یافته‌ها

تصویر ظاهری پساب خام و نمونه‌های تهیه شده در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. کاملا واضح است که pH برابر با ۸ بر ته نشینی ذرات معلق تاثیر آنچنانی نداشته، در حالی که دو pH دیگر تاثیر مناسب و به نسبت یکسانی بر روی پساب داشته‌اند، اگرچه pH برابر با ۱۴ تاثیرش تا حدودی بیشتر بوده است. علاوه بر این، از شکل پساب‌ها کاملا واضح است که حضور PAC، ته نشینی ذرات را تحت تاثیر قرار داده و نمونه‌های حاوی PAC از نظر ظاهری کیفیت بهتری نسبت به نمونه‌های بدون PAC در هر pH دارند.

شکل ۲- تصویر ظاهری پساب خام و پساب‌های تصفیه شده بعد از مرحله انعقاد و لخته سازی در شرایط مختلف

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-11]

نمودار ۱، COD پساب های خروجی از مرحله اول را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است COD پساب‌ها بعد از خروج از مرحله اول نسبت به پساب خام (۶۲۰۰۰ mg/L) کاهش داشته است. تغییرات COD در pH های مختلف نشان می‌دهد با افزایش pH، COD روند کاهشی داشته است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد افزودن PAC در همه pH ها باعث کاهش COD شده است به طوری که کمترین COD در این مرحله برای نمونه حاوی PAC در pH برابر با ۱۴ بدست آمده است. COD این نمونه ۲۸۰۰۰ mg/L بوده است که ۵۵ درصد نسبت به COD پساب خام کاهش داشته است.



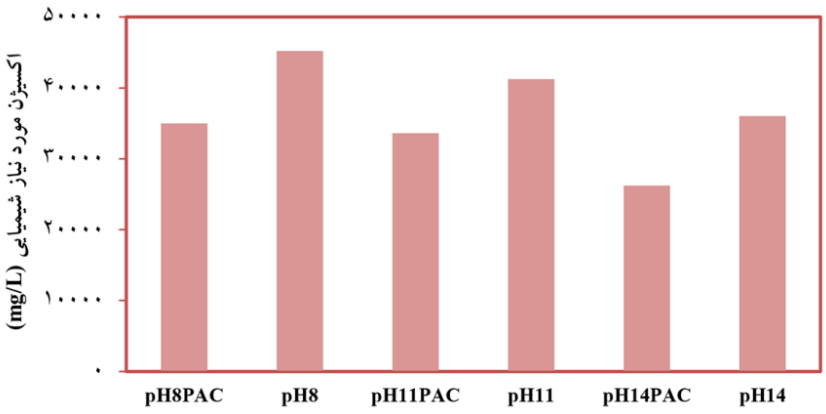
نمودار ۱- COD مربوط به پساب خروجی از مرحله انعقاد و لخته سازی در شرایط مختلف

بعد از ته نشینی نسبی مواد معلق در مرحله اول فرایند تصفیه، در مرحله دوم از ازن زنی استفاده شد؛ به این شکل که هر کدام از خروجی‌های مرحله اول ازن زنی شده و نمونه‌برداری شدند. شکل ۳ تصویر ظاهری نمونه‌های ازن زنی شده را نشان می‌دهد. همانطور که واضح است نمونه‌هایی که در مرحله اول، ته نشینی خوبی داشته‌اند ازن زنی تاثیر زیادی از نظر تغییر رنگ پساب بر روی این نمونه‌ها داشته است. این پدیده نشان می‌دهد در حالتی که ذرات معلق به خوبی ته نشین نشده باشند گاز ازن تزریق شده به پساب تاثیر آنچنانی از نظر تغییر رنگ نخواهد داشت. هر چقدر پساب مورد نظر عاری از ذرات معلق باشد گاز ازن در رنگ زدایی و تخریب ترکیبات پیچیده بهتر عمل خواهد کرد. در میان نمونه‌های پساب ازن زنی شده، نمونه‌های pH14PAC و pH11PAC وضعیت ظاهری بهتری نسبت به بقیه نمونه‌ها داشته‌اند.

شکل ۳- تصویر ظاهری نمونه‌ها بعد از مرحله ازن زنی شده

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-11]

COD مربوط به پساب‌ها بعد از ازن زنی در نمودار ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است در مرحله دوم نیز COD پساب ها نسبت به مرحله قبل روند کاهشی داشته و ازن زنی توانسته ترکیبات تقاضا کننده اکسیژن را تا حد معینی کاهش داده و باعث کاهش COD شود. در میان نمونه‌های ازن زنی شده، نمونه pH14PAC با ۲۶۲۰۰ mg/L COD کمترین COD را نسبت به بقیه داشته که COD آن نسبت به COD پساب خام ۵۸ درصد کاهش داشته است.



نمودار ۲- COD مربوط به پساب‌ها بعد از مرحله ازن زنی

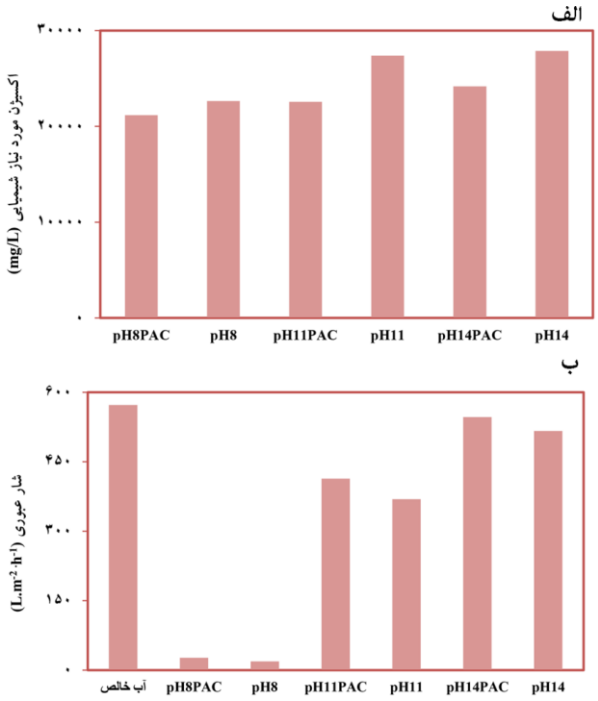
در مرحله سوم فرایند تصفیه، از فیلتراسیون غشایی برای تصفیه نهایی نمونه‌های خروجی از مرحله ازن زنی استفاده شد. از آنجایی که غشاهای سرامیکی مورد نظر متخلخل هستند ذرات معلق پشت حفرات مانده و پساب تصفیه شده از داخل حفرات رد شده و بعنوان جریان عبور کرده جمع آوری می‌شود. نیروی محرکه عبور آب از حفرات غشا، اختلاف فشاری است که در توسط پمپ اعمال می‌شود. شکل ۴ تصویر نمونه‌های خروجی از مرحله فیلتراسیون غشایی را نشان می‌دهد. تصویر نمونه‌ها قابلیت فیلتراسیون غشایی در حذف ذرات معلق را به خوبی نشان می‌دهد.

شکل ۴- تصویر ظاهری پساب‌های خروجی از فیلتراسیون غشایی

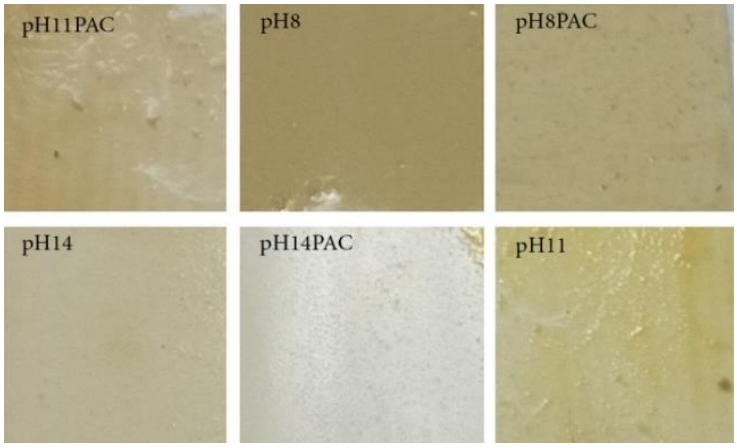
[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-11]

COD مربوط به پساب‌های خروجی از مرحله فیلتراسیون غشایی در نمودار ۳-الف آورده شده است. واضح است که فیلتراسیون غشایی باعث کاهش COD پساب عبوری از آن شده است. نکته قابل توجه در این مرحله، افت شدید COD پساب‌هایی که در pH برابر ۸ بودند و در مراحل قبلی COD نسبتا بالایی در مقایسه با نمونه‌های دیگر داشتند، است. این رفتار نشان می‌دهد فیلتراسیون غشایی در هر شرایطی بخش قابل توجهی از ترکیبات تقاضا کننده اکسیژن را حذف کرده و COD را تا حد قابل توجهی کاهش داده‌اند بطوریکه COD پساب pH8PAC تا ۲۱۱۷۰ mg/L کاهش داشته که نسبت به COD پساب خام ۶۶ درصد کاهش داشته است. با توجه به اینکه تهیه و نگهداری غشاها در فیلتراسیون غشایی پرهزینه است، شار عبوری در این نوع فیلتراسیون از اهمیت قابل توجهی در راستای صنعتی کردن آن برخوردار است. هر چقدر شارعبوری از غشاها بیشتر باشد سطح کمی از غشا مورد نیاز بوده که هزینه تهیه و نگهداری کمی بدنبال خواهد داشت. نمودار ۳-ب شار عبوری غشا برای آب خالص و نمونه‌های پساب را نشان می‌دهد. واضح است که شار عبوری غشا برای نمونه‌های پساب خروجی از مرحله ازن زنی نسبت به شار عبوری غشا برای آب خالص کاهش داشته است. علاوه بر این نتایج حاصل از تعیین شار عبوری غشا برای شش نمونه پساب خروجی از مرحله دوم تصفیه، نشان می‌دهد که شار عبوری غشا برای نمونه‌های pH8PAC و pH8 افت شدیدی داشته است. دلیل این رفتار حضور حجم زیادی از ذرات معلق در پساب مورد نظر به دلیل عدم تصفیه درست در مراحل قبلی است. اگرچه COD این دو نمونه بعد از عبور از غشا همانند نمونه‌های دیگر کاهش داشت اما شار عبوری پایین این دو نمونه پساب از غشا نشان دهنده مناسب نبودن pH برابر ۸ بمنظور انعقاد و لخته سازی در مرحله اول تصفیه است. چرا که همانطور که گفته شد ذرات معلق در این pH توسط انعقاد و لخته سازی جدا نشده و در مرحله فیلتراسیون غشایی جدا می‌شوند که با قرار گرفتن در دهانه حفرات غشا باعث افت شدید شار عبوری از غشا می شوند. این درحالی است که در نمونه پساب‌هایی که در مرحله انعقاد و لخته سازی و ته نشینی حجم زیادی از ذرات معلق خود را از دست داده‌اند، شار عبوری پساب از غشا نسبت به شار عبوری آب خالص افت زیادی نداشته است. این رفتار نشان می‌دهد که درصورتی که مرحله انعقاد و لخته سازی بدرستی انجام شود، مرحله ازن زنی به عنوان مرحله بعدی در شکستن ترکیبات پیچیده و حذف رنگ پساب موفق عمل خواهد کرد (۲۰). این روند باعث می‌شود تنها ذرات معلق بسیار ریزی که توانسته‌اند از دو مرحله اول رد شوند وارد مرحله فیلتراسیون غشایی شده که به راحتی توسط غشای مورد نظر قابل جداسازی هستند. این در حالی است که در صورتی که مرحله انعقاد و لخته سازی بعنوان مرحله اولیه بدرستی صورت نگیرد حجم آلودگی پساب ورودی به بخش ازن زنی بیشتر بوده و این مرحله ازن زنی در شکستن ترکیبات پیچیده و رنگ زدایی موفق عمل نخواهد کرد؛ چرا که عملکرد گاز ازن منتشر شده توسط حجم زیادی از آلودگی مختل خواهد شد. با وجود عبور پساب از دو مرحله اول، به دلیل عدم پیش تصفیه مناسب، پساب ورودی به مرحله نهایی فیلتراسیون غشایی از کیفیت مناسبی برخوردار نبوده و باعث افت شدید شار عبوری غشا خواهد شد. شکل ۵ تصویر ظاهری سطح غشا را بعد از عبور هر نمونه پساب از آن را نشان می‌دهد. کاملا واضح است که نمونه پساب‌های pH14 و pH14PAC کمترین بار آلودگی را روی سطح غشا ایجاد کرده‌اند، در مقابل غشاهای pH8 و pH8PAC بیشترین بار آلودگی را روی سطح غشا ایجاد کرده‌اند.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-11]



نمودار ۳- COD مربوط به پساب‌های خروجی از مرحله فیلتراسیون غشایی (الف) و شار عبوری نمونه‌های پساب از غشا (ب)



شکل ۵- تصویر ظاهری سطح غشا بعد از عبور هر نمونه پساب از آن

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-11]

بحث

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از منعقد کننده PAC در مرحله اول تصفیه پساب، نقش کلیدی در حذف ذرات معلق و کاهش COD دارد. این یافته‌ها با مطالعات قبلی همسو است که نشان می‌دهند انعقاد و لخته‌سازی به عنوان مراحل اولیه تصفیه، پایه‌ای برای فرآیندهای بعدی هستند (۱۰). با این حال، نکته جالب توجه در این مطالعه، تأثیر pH بر عملکرد PAC است. نتایج نشان داد که با افزایش pH، عملکرد PAC در حذف ذرات معلق و کاهش COD به طور قابل توجهی بهبود یافته است. این موضوع می‌تواند به دلیل تشکیل ترکیبات هیدروکسید آلومینیوم در pH های قلیایی باشد که به عنوان لخته‌کننده‌های قوی عمل می‌کنند. این یافته‌ها اهمیت کنترل pH در فرآیند انعقاد را برجسته می‌کند و نشان می‌دهند که انتخاب pH مناسب می‌تواند به طور چشمگیری بر بازدهی فرآیند تصفیه تأثیر بگذارد. مرحله دوم تصفیه، یعنی ازن‌زنی، به عنوان یک روش اکسیداسیون پیشرفته، توانست به طور مؤثری ترکیبات آلی پیچیده و رنگ پساب را کاهش دهد. این نتایج با مطالعات متعددی که ازن‌زنی را به عنوان یک روش مؤثر در تجزیه ترکیبات آلی مقاوم و کاهش COD معرفی کرده‌اند، همخوانی دارد (۸). علاوه بر این نتایج حاصل نشان داد که عملکرد ازن‌زنی به شدت به کیفیت مرحله اول تصفیه (انعقاد و لخته‌سازی) وابسته است. اگر ذرات معلق به طور کامل در مرحله اول حذف نشوند، عملکرد ازن‌زنی مختل می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که فرآیندهای تصفیه باید به صورت زنجیره‌ای و با توجه به وابستگی مراحل به یکدیگر طراحی شوند. فیلتراسیون غشایی به عنوان مرحله نهایی تصفیه، توانست ذرات معلق باقیمانده و ترکیبات آلی را به طور مؤثر حذف کند. اگرچه نتایج نشان داد که عملکرد غشاها به شدت تحت تأثیر مراحل پیش‌تصفیه قرار دارد. اگر مراحل انعقاد و لخته سازی و ازن‌زنی به درستی انجام نشوند، ذرات معلق بزرگ‌تر و ترکیبات پیچیده‌تر به غشاها می‌رسند و باعث گرفتگی حفرات غشا و کاهش شار عبوری می‌شوند. این موضوع اهمیت مراحل پیش‌تصفیه را در افزایش بازدهی و طول عمر غشاها برجسته می‌کند. کاهش ۶۶ درصدی COD در مرحله فیلتراسیون غشایی نشان داد که این فرآیند می‌تواند به عنوان یک روش مؤثر برای تصفیه نهایی پساب و استفاده مجدد از آن در صنعت مورد استفاده قرار گیرد. این موضوع از جنبه‌های اقتصادی و محیط زیستی حائز اهمیت است، زیرا بازچرخانی پساب نه تنها باعث کاهش مصرف آب می‌شود، بلکه از تخلیه پساب‌های آلوده به محیط‌زیست نیز جلوگیری می‌کند. ترکیب مراحل انعقاد و لخته‌سازی، ازن‌زنی و فیلتراسیون غشایی می‌تواند به عنوان یک روش مؤثر برای تصفیه پساب‌های صنعتی مورد استفاده قرار گیرد؛ با این حال، موفقیت این فرآیندها به شدت به اجرای صحیح مراحل پیش‌تصفیه وابسته است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه از فرایند سه مرحله‌ای انعقاد و لخته سازی-ازن زنی- فیلتراسیون غشایی برای تصفیه پساب کاغذسازی مربوط به شرکت صنایع کاغذسازی شهر تبریز استفاده شد. بررسی اثر هرکدام از مراحل تصفیه نشان داد هرکدام از مراحل استفاده شده نقش کلیدی در تصفیه پساب داشتند. مرحله انعقاد و لخته سازی با حذف حجم زیادی از آلودگی و ذرات معلق درشت و مرحله ازن‌زنی نیز از طریق تخریب ترکیبات پیچیده به ترتیب منجر به کاهش ۵۵ درصد و ۵۸ درصدی COD نسبت به پساب خام شدند. مرحله فیلتراسیون غشایی بعنوان مرحله نهایی با حذف ذرات معلق بسیار ریز، نقش منحصربفردی در فرایند تصفیه ایفا کرده و باعث کاهش ۶۶ درصدی COD شد. علاوه بر این، نتایج حاصل از مقایسه COD و کیفیت ظاهری پساب‌ها نشان داد در صورتی که مراحل اولیه بخصوص مرحله انعقاد و لخته‌سازی بدرستی انجام نشود بخش زیادی از بار آلودگی به مرحله فیلتراسیون غشایی رسیده و شار عبوری از غشا به شدت کاهش خواهد یافت. این رفتار، مانعی برای عملیاتی شدن فرایند تصفیه به دلیل نیاز به سطح غشایی بالا و عدم اقتصادی بودن آن است، در حالی که پیش تصفیه مناسب

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-11]

پساب و حذف حجم زیادی از ذرات درشت در مرحله اول باعث کارکرد درست مرحله ازن زنی شده و باعث حفظ شار عبوری غشا در فیلتراسیون غشایی می‌شود که استفاده از فرایند تعبیه شده در صنعت کاغذسازی را عملیاتی‌تر می‌کند.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل طرح تحقیقاتی با عنوان "طراحی خط تصفیه پساب کاغذسازی بمنظور بازچرخانی و استفاده مجدد شرکت صنایع کاغذسازی سپید دماوند تبریز" مصوب دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا (ص) بهبهان در سال ۱۴۰۳ است که با حمایت دانشگاه صنعتی خاتم الانبیا (ص) بهبهان و شرکت صنایع کاغذسازی شهر تبریز انجام شده است.

References

1. Partovinia A, Kashkouli M, Ghorbannezhad P, Nazerian M. Performance of perlite as an adsorbent on the physical treatment of cellulose industry wastewater. Iranian Journal of Wood and Paper Industries. 2022;13(3):313-23 (in Persian).
2. Ventura JRS, Tulipan JU, Banawa A, Umali KD, Villanueva JAL. Advancements and challenges in decentralized wastewater treatment: a comprehensive review. Desalination and Water Treatment. 2024:100830.
3. Salehpour A, Alizadeh M, Ajalli N, Azamat J. Arsenic removal from aqueous solution using PWN-type zeolite membrane: a theoretical investigation. Journal of Molecular Liquids. 2024;395:123952.
4. Abed MJ, Khaleel OR, Fayyadh MM. Effect of aluminium sulphate Al2 (SO4) 3 treatment on paper waste as a fine aggregate partial replacement in lightweight cement mortar. Materials Today: Proceedings. 2021;42:1152-59.
5. Liu Y, Guo Y, Yin Z, Yang W. Insights into coagulation, softening and ozonation pre-treatments for reverse osmosis membrane fouling control in reclamation of textile secondary effluent. Journal of Water Process Engineering. 2024;58:104764.
6. Lu Z, Bai H, Liang L, Chen S, Yu H, Quan X. MgO-loaded tubular ceramic membrane with spatial nanoconfinement for enhanced catalytic ozonation in refractory wastewater treatment. Journal of Hazardous Materials. 2024:134842.
7. Mortazavi B, Barikbin B, Moussavi GR. Survey of Nano filtration Performance for Hexavalent Chromium Removal fromWater Containing Sulfate. Iranian Journal of Health and

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-11]

Environment. 2010;3(3):281-90 (in Persian).

8. Abdolkarimi Mahabadi M, Bayat A. Investigating the treatment of paper industry effluent using ozonation process. Journal of Water and Wastewater. 2023;34(4):123-36 (in persian).

9. Hojjat Hemmat abadi, Rabi Behrooz. Investigation of electro coagulation process on TSS and COD removal from effluent of the paper recycling mill using Al electrodes. Iranian Journal of Wood and Paper Industries. 2013;3(2):53-64 (in Persian).

10. Birjandi N, Yonesi H, Bahramifar N. Comparison of the efficiency of Alum and Polyaluminium chloride for removal of paper mill wastewater pollution. Environmental Sciences. 2015; 13 (1):67-74 (in Persian).

11. Bazrafshan E, Mostafapour FK, Farzadkia M, Ownagh K, Mansurian HJ. Application of combined chemical coagulation-electro coagulation process for treatment of the Zahedan cattle slaughterhouse wastewater. Iranian Journal of Health and Environment. 2012;5(3):283-94 (in Persian).

12. Taghipour A, Mahvi A, Vaezi F, Nabizade R, Dehghanzade R. Study the efficiency of the combined system of coagulation and flocculation/ ozonation in treatment of fresh landfill leachates in Tabriz city. Iranian Journal of Health and Environment. 2011;4(1):57-64 (in Persian).

13. Chen X, Ma J, Chen J, Wang Z. Ceramic membrane filtration coupled with ozonation for water purification: Principles, applications and perspectives. Journal of Water Process Engineering. 2023;55:104127.

14. Wei D, Tao Y, Zhang Z, Liu L, Zhang X. Effect of in-situ ozonation on ceramic UF membrane fouling mitigation in algal-rich water treatment. Journal of Membrane Science. 2016;498:116-24.

15. Karahan BN, Akdag Y, Fakioglu M, Korkut S, Guven H, Ersahin ME, et al. Coupling ozonation with hydrogen peroxide and chemically enhanced primary treatment for advanced treatment of grey water. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2023;11(3):110116.

16. Aghdami A, Elyasi Kojabad M. Wastewater treatment hybrid process using coagulation-membrane filtration for industrial purposes. Applied Chemistry Today. 2024;19(72):269-82 (in Persian).

17. Ajiboye TO, Sawunyama L, Ravele MP, Rasheed Adeleke AA, Seheri NH, Onwudiwe DC, et al. Synthesis approaches to ceramic membranes, their composites, and application in the removal of tetracycline from water. Environmental Advances. 2023;12:100371.

18. Zhou J, Zhang X, Wang Y, Larbot A, Hu X. Elaboration and characterization of tubular macroporous ceramic support for membranes from kaolin and dolomite. Journal of Porous Materials. 2010;17:1-9.

19. Parsons SA, Jefferson B. Introduction to Potable Water Treatment Processes: Wiley Online Library; 2006.

20. Song D, Han X, Li J, Cheng W, Liu C, Wu C, et al. Migration of membrane fouling with

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-11]

minimal damage to cell integrity by catalytic ceramic membrane systems in low dosages of ozone during algae-laden water treatment. Chemical Engineering Journal. 2024:156636.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-11]

Available online: https://ijhe.tums.ac.ir

Orginal Article

The treatment of papermaking effluent with the hybrid process of coagulation-ozonation-membrane filtration in order to recycle and reuse

Mahdi Elyasi Kojabad[1,*], Ali Aghdami[2]

1- Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran
2- Faculty of Chemical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

ARTICLE INFORMATION:

Received: 19 February 2025
Revised: 05 May 2025
Accepted: 11 May 2025
Published: 16 September 2025

Keywords: Papermaking effluent, Coagulation, Ozonation, Membrane filtration, Chemical oxygen demand

***Corresponding Author:**
m.elyasi@bktu.ac.ir

ABSTRACT

Background and Objective: The paper industry is one of the most water-intensive sectors, generating a large volume of wastewater. Proper management of this waste—including its treatment, recycling, and reuse—can help prevent environmental pollution and conserve the country's water resources. In this study, a three-step process consisting of coagulation, ozonation, and membrane filtration was employed to treat papermaking wastewater.

Materials and Methods: A three-step process involving coagulation, ozonation, and membrane filtration was employed to treat the wastewater. In the first stage, polyaluminum chloride (PAC) was used to remove larger particles. This was followed by ozonation to degrade complex organic compounds. The final stage involved membrane filtration to further purify the water. At each stage, the chemical oxygen demand (COD) of the wastewater was measured and analyzed for comparative evaluation.

Results: Each stage played a critical role in the treatment process. Coagulation effectively removed a substantial amount of suspended particles, while ozonation addressed issues related to color and the breakdown of complex compounds. The final stage, membrane filtration, was instrumental in eliminating extremely fine suspended particles. Despite these efforts, the treated effluent exhibited a higher COD than the initial sample, possibly due to the release of intermediate compounds during treatment. However, the process successfully reduced the concentration of crude oil by 66%.

Conclusion: The membrane flux analysis revealed that at pH levels of 11 and 14, the effluent's membrane flux closely approached that of pure water. This finding highlights the potential effectiveness of the proposed purification method for the treatment and recycling of papermaking wastewater.

Please cite this article as: Elyasi Kojabad M, Aghdami A. The treatment of papermaking effluent with the hybrid process of coagulation-ozonation-membrane filtration in order to recycle and reuse. Iranian Journal of Health and Environment. 2025;18(2):335-48.

Copyright © 2025 Iranian Association of Environmental Health، and Tehran University of Medical Sciences. Published by Tehran University of Medical Sciences. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Noncommercial uses of the work are permitted، provided the original work is properly cited.

[Downloaded from ijhe.tums.ac.ir on 2026-06-11]