

Increasing the Efficiency of the Ultrafiltration Process in the Treatment of Pharmaceutical Industry Wastewater by Using Mixed Anionic-Nonionic Micelles

Nadia Sahebamee¹✉, Maryam Omidvar^{1,2}

1. Corresponding author, Department of Chemical Engineering, Qu . C., Islamic Azad University, Quchan, Iran. E-mail: Sahebamee@iau.ir

2. Department of Chemical Engineering, Ma . C., Islamic Azad University, Mashhad, Iran. E-mail: Maryam.Omidvar@iau.ac.ir

Article Info

Article type: research paper

Article history:

Received: 20 September 2025

Received in revised form: 19
November 2025

Accepted: 18 December 2025

Published online 21 December 2025

Keywords:

Micelle-Enhanced Ultrafiltration
Pharmaceutical Wastewater
Surfactant
Sodium dodecyl sulfate
IGEPAL

ABSTRACT

Objective: The pharmaceutical industry generates wastewater containing drugs, surfactants, pathogenic bacteria, and unbalanced ions, posing significant environmental risks. This study evaluates the efficiency of micelle-enhanced ultrafiltration (MEUF) for treating pharmaceutical wastewater using the anionic surfactant sodium dodecyl sulfate (SDS) and its combination with the nonionic surfactant IGEPAL (IGE).

Materials and methods: Experiments were conducted at three transmembrane pressure levels and varying concentrations of anionic and nonionic surfactants. The effects of these parameters on permeate flux and the removal efficiency of key wastewater contaminants, including turbidity, total dissolved solids (TDS), and electrical conductivity (EC), were systematically investigated.

Results: The results demonstrated that increasing pressure enhanced permeate flux, whereas higher surfactant concentrations reduced it. Under optimal conditions, the process achieved approximately 95% turbidity removal, 25% TDS removal, and 68% EC reduction. Furthermore, the combined IGE–SDS system outperformed SDS alone, indicating a synergistic effect between the two surfactants.

Conclusions: The micelle-enhanced ultrafiltration process is an efficient and promising method for treating pharmaceutical wastewater, representing a potential alternative to conventional treatment approaches.

Citation Sahebamee, Omidvar (2025). Increasing the Efficiency of the Ultrafiltration Process in the Treatment of Pharmaceutical Industry Wastewater by Using Mixed Anionic-Nonionic Micelles, *Journal of Separation Science and Engineering*, 17 (2), 74-89. <http://doi.org/10.22103/jsse.2025.5211>



© The Author(s).

Publisher: Shahid Bahonar University of Kerman

افزایش کارایی فرایند اولترافیلتراسیون در تصفیه پساب صنایع دارویی با بهره‌گیری از میسل‌های ترکیبی آنیونی-غیریونی

نادیا صاحب‌جمعی^۱ , مریم امیدوار^۲ 

^۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی شیمی، واحد قوچان، دانشگاه آزاد اسلامی، قوچان، ایران. رایانامه: sahebjaamee@iaau.ir

^۲. گروه مهندسی شیمی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران. رایانامه: Maryam.omidvar@iaau.ac.ir

چکیده

هدف: صنعت داروسازی فاضلابی حاوی داروها، سورفکتانت‌ها، باکتری‌های بیماری‌زا و یون‌های نامتعادل تولید می‌کند که خطرات زیست‌محیطی قابل توجهی را به همراه دارد. فرایند اولترافیلتراسیون بهبودیافته با میسل از سورفکتانت‌ها برای ایجاد میسل‌هایی استفاده می‌کند که آلاینده‌ها را محصور کرده و جداسازی آن‌ها را از طریق غشاهای اولترافیلتراسیون امکان‌پذیر می‌سازد. این مطالعه به ارزیابی کارایی این روش در تصفیه فاضلاب داروسازی با استفاده از سورفکتانت آنیونی سدیم دودسیل سولفات (SDS) و ترکیب آن با سورفکتانت غیریونی آجیپال (IGE) می‌پردازد.

مواد و روش: آزمایش‌ها در سه سطح فشار میان‌غشایی (TMP) و با غلظت‌های مختلف سورفکتانت‌های آنیونی و غیریونی انجام شد. اثر این پارامترها بر شار تراوه و کارایی حذف آلاینده‌های کلیدی پساب، شامل کدورت، مواد جامد محلول (TDS) و هدایت الکتریکی (EC) به طور سیستماتیک مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج: نتایج نشان داد که افزایش فشار میان‌غشایی، شار تراوه را افزایش می‌دهد، درحالی‌که غلظت بالاتر سورفکتانت باعث کاهش آن می‌شود. تحت شرایط بهینه، این فرایند حدود ۹۵ درصد کدورت، ۲۵ درصد مواد جامد محلول و ۶۸ درصد هدایت الکتریکی را کاهش داد. همچنین، سیستم ترکیبی IGE-SDS عملکرد بهتری نسبت به SDS تنها داشت که نشان‌دهنده اثر هم‌افزایی بین این دو سورفکتانت است.

نتیجه‌گیری: فرایند اولترافیلتراسیون بهبودیافته با میسل می‌تواند به‌عنوان یک فرایند مؤثر در تصفیه پساب کارخانه‌ها صنایع دارویی مورد استفاده قرار گیرد و می‌تواند جایگزین بالقوه‌ای برای روش‌های تصفیه مرسوم محسوب شود.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: علمی پژوهشی

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹

دریافت فایل اصلاح شده نهایی: ۱۴۰۴/۰۸/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۷

انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

کلمات کلیدی:

اولترافیلتراسیون بهبودیافته با میسل
پساب داروسازی
سورفکتانت
سدیم دودسیل سولفات
آجیپال

استناد: صاحب‌جمعی، امیدوار (۱۴۰۴). عنوان مقاله افزایش کارایی فرایند اولترافیلتراسیون در تصفیه پساب صنایع دارویی با بهره‌گیری از

میسل‌های ترکیبی آنیونی-غیریونی. نشریه علوم و مهندسی جداسازی، (۲) ۱۷، ۸۹-۷۴. <http://doi.org/10.22103/jsse.2025.5211>



© نویسندگان

ناشر: دانشگاه شهید باهنر کرمان

صنایع دارویی از مهم‌ترین منابع انتشار آلاینده‌های مقاوم زیست‌محیطی محسوب می‌شوند و حجم قابل توجهی از فاضلاب با ترکیب شیمیایی پیچیده تولید می‌کنند. هرچند داده‌های دقیق و معتبر درباره حجم سالانه این پساب در سطح جهانی محدود و پراکنده است، اما تأثیر قابل توجه آن بر محیط‌زیست مورد توافق منابع علمی و صنعتی است. این فاضلاب معمولاً حاوی غلظت بالایی از ترکیبات دارویی و محصولات مراقبت شخصی، مواد فعال زیستی، یون‌ها و ذرات معلق است که پایداری و زیست‌فعالی آن‌ها در محیط‌های آبی می‌تواند مخاطرات جدی برای اکوسیستم‌های آبی و سلامت انسان ایجاد نماید [۱-۳]. ماهیت چندگانه آلاینده‌ها و پایداری بالای ترکیبات آلی و دارویی باعث محدودیت عملکرد روش‌های متداول تصفیه شده و نیاز به توسعه فناوری‌های پیشرفته و کارآمد برای افزایش راندمان حذف، کاهش آثار جانبی و امکان بازیافت آب را ضروری می‌سازد.

در دهه‌های اخیر، فرایند اولترافیلتراسیون بهبودیافته با میسل^۱ (MEUF) به‌عنوان یک فناوری نوین غشایی برای حذف هم‌زمان آلاینده‌های آلی و معدنی از جریان‌های فاضلاب صنعتی مورد توجه قرار گرفته است [۴-۶]. در این فرایند، سورفکتانت‌ها با تشکیل میسل در غلظت‌های بالاتر از غلظت بحرانی میسل^۲ (CMC)، امکان محصورسازی آلاینده‌ها و جداسازی آن‌ها از طریق غشای UF را فراهم می‌سازند. مطالعات گزارش کرده‌اند که MEUF علاوه بر راندمان بالای حذف، به دلیل فشار عملیاتی پایین، مصرف انرژی کمتر و کاهش رسوب‌گذاری، مزایای قابل توجهی نسبت به فرایندهای غشایی متداول نظیر نانوفیلتراسیون^۳ (NF) و اسمز معکوس^۴ (RO) دارد و گزینه‌ای مقرون به‌صرفه برای تصفیه فاضلاب‌های صنعتی محسوب می‌شود [۷-۱۲].

باوجود این مزایا، چالش‌هایی مانند نیاز به غلظت نسبتاً بالای سورفکتانت، احتمال نشت سورفکتانت از غشا، هزینه بازیافت و نگرانی‌های زیست‌محیطی مرتبط، مانع کاربرد وسیع MEUF در مقیاس صنعتی شده است. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از مخلوط سورفکتانت‌های آنیونی و غیریونی موجب کاهش CMC، افزایش پایداری میسل‌ها، بهبود ظرفیت جذب آلاینده‌ها، کاهش مصرف سورفکتانت و ارتقای عملکرد جدا سازی می‌گردد [۱۳-۱۶]. با این حال، کاربرد رویکرد مخلوط سورفکتانت‌ها در تصفیه پساب دارو سازی و بررسی اثرات هم‌زمان متغیرهای کلیدی عملیاتی همچون فشار، غلظت و نسبت سورفکتانت‌ها و زمان فرایند، تاکنون به‌صورت جامع و نظام‌مند مورد مطالعه قرار نگرفته است.

براین‌اساس، نوآوری پژوهش حاضر در به‌کارگیری مخلوط سورفکتانت آنیونی و غیریونی در فرایند MEUF برای تصفیه پساب دارویی، همراه با ارزیابی سیستماتیک اثر فشار، غلظت و نسبت سورفکتانت‌ها و زمان فرایند بر شار عبوری و راندمان حذف شاخص‌های آلودگی شامل TDS، کدورت و هدایت الکتریکی، و ارائه رویکردی مبتنی بر کاهش مصرف سورفکتانت و افزایش کارایی فرایند به‌منظور ارتقای امکان‌پذیری صنعتی این فناوری در تصفیه پساب داروسازی است. به طور خلاصه می‌توان گفت که هدف این پژوهش، بهینه‌سازی فرایند MEUF برای افزایش کارایی تصفیه، کاهش هزینه عملیاتی و ارتقای کیفیت آب خروجی، در صنعت داروسازی است.

¹ Micelle-enhanced ultrafiltration (MEUF)

² Critical Micelle Concentration (CMC)

³ Nanofiltration (NF)

⁴ Reverse osmosis (RO)

۲- مواد و روشها

۱-۲- مواد

در این تحقیق سدیم دودسیل سولفات^۱ (SDS، خلوص ۹۹٪ درصد) به عنوان ماده فعال سطحی آنیونی و آیجیپال^۲ (IGE، خلوص ۹۸٪ درصد) به عنوان ماده فعال سطحی غیریونی از شرکت مرک تهیه و بدون خالص سازی بیشتر استفاده شدند. از غشا پلی اترسولفون دست ساز استفاده شد. هیدروکسید سدیم، اسید کلریدریک و آب مقطر برای شستن رسوبات استفاده شدند. نمونه پسابی از یک شرکت تولیدکننده دارو در منطقه تهیه شد و برای به دست آوردن مقادیر آلودگی آنالیز شد. نتایج نشان داد که TDS نمونه شامل ۲۱۷۰ ppm، کدورت ۱۴۹۸ NTU و هدایت الکتریکی برابر ۲۳۴۱ $\mu\text{S}/\text{cm}$ بود.

۲-۲- روش تحقیق

در این پژوهش از یک سامانه آزمایشگاهی اولترافیلتراسیون برای تصفیه پساب استفاده شد (شکل ۱). این سامانه شامل مخزن خوراک، پمپ فشار بالا، شیر تنظیم فشار و فشار سنج بود. ماژول غشایی دارای یک ورودی خوراک و دو خروجی برای جریان تراوه^۳ و جریان ناتراوه^۴ بود. غشای پلی اترسولفون^۵ (PES) با سطح مؤثر cm^2 ۱۵،۸۹ در داخل ماژول قرار گرفت. پیش از انجام آزمایش های اصلی، آزمون های اولیه با آب مقطر به منظور بررسی عملکرد سامانه، اطمینان از آب بندی ماژول و پایداری شرایط عملیاتی انجام شد. همچنین، جهت جلوگیری از گرفتگی غشا، پساب خام ابتدا جهت حذف مواد جامد معلق پیش تصفیه گردید. آزمایش های اولترافیلتراسیون در سه سطح اختلاف فشار میان غشایی^۶ (TMP) شامل ۲، ۳ و ۴ bar و چهار غلظت از سورفکتانت آنیونی SDS (۰، ۳، ۶ و ۹ mM) در دمای 25°C انجام شد. در این مطالعه، فشار TMP بر اساس میانگین اختلاف فشار بین جریان خوراک و جریان تراوه در دو طرف غشا محاسبه گردید. برای بررسی اثر سورفکتانت غیریونی IGE، نسبت جرمی IGE/SDS در بازه ۰ تا ۱،۴، با غلظت ثابت ۶ mM از SDS مورد مطالعه قرار گرفت. در هر آزمایش، حجم مشخصی از پساب با سورفکتانت مورد نیاز مخلوط و پس از رسیدن به تعادل، تحت عملیات اولترافیلتراسیون قرار گرفت. شار تراوه تا رسیدن به حالت پایدار ثبت شد و سپس نمونه های خوراک و تراوه جهت آنالیز برداشته گردید. برای ثابت نگه داشتن غلظت خوراک در طول آزمایش، جریان های تراوه و ناتراوه مجدداً به مخزن خوراک بازگردانده شدند. پس از هر آزمایش، غشا با محلول های شست و شوی قلیایی و اسیدی و سپس آب مقطر تا رسیدن pH به حالت خنثی، تمیز شد. پس از عملیات شست و شو، شار آب خالص غشا جهت ارزیابی بازیابی عملکرد اندازه گیری شد. در صورت عدم بازیابی کافی شار، فرایند شست و شو تکرار شد و در صورت نیاز، غشا تعویض گردید.

¹ Sodium Dodecyl Sulfate

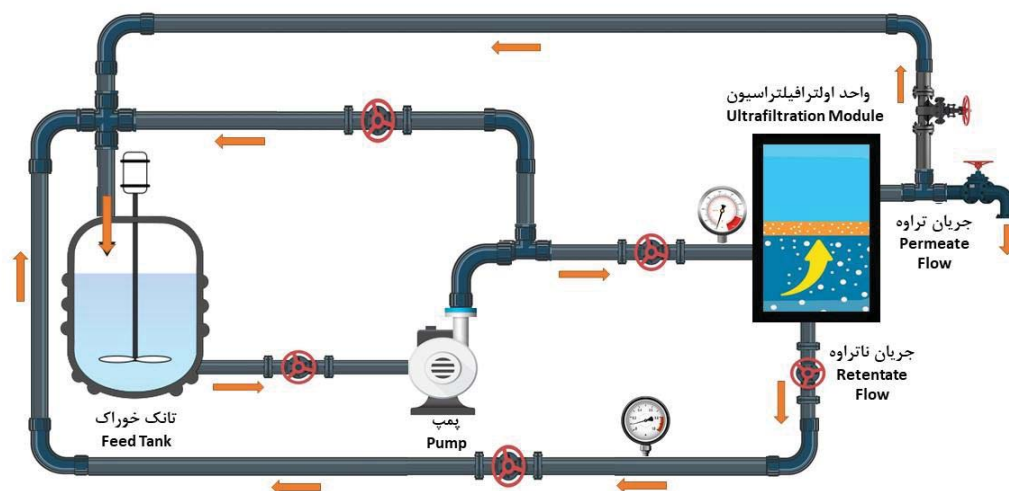
² IGEPAL

³ Permeate Flow

⁴ Retentate Flow

⁵ Polyethersulfone

⁶ Transmembrane pressure



شکل ۱: نمایی از شماتیک سامانه آزمایشگاهی

Figure 1: Schematic diagram of experimental setup

۳-۲- آنالیز نمونه‌ها

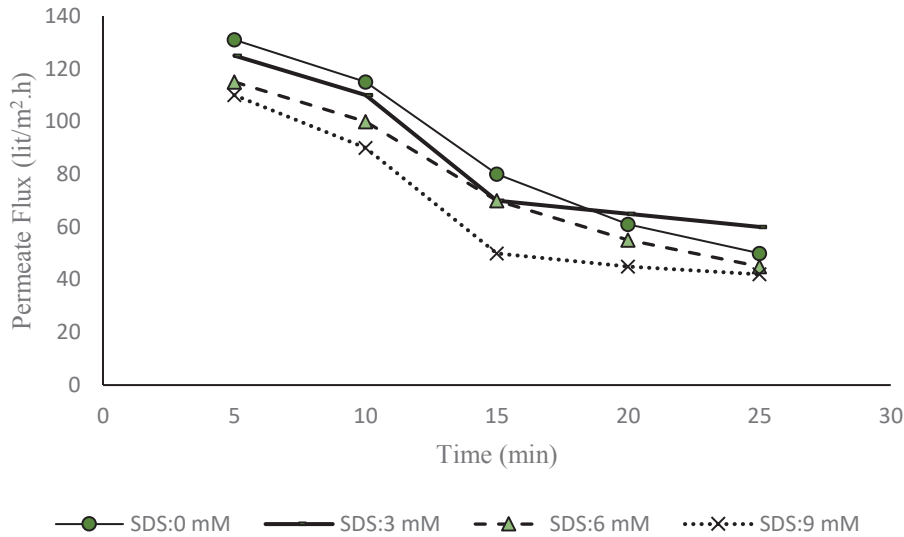
کیفیت نمونه‌های پساب پس از هر آزمایش تصفیه آنالیز شد. در این مجموعه آزمایش‌ها، مقدار دفع سه شاخص آلودگی یعنی TDS، کدورت و هدایت الکتریکی^۱ (EC) از طریق اندازه‌گیری غلظت آنها در خوراک و جریان تراوه تعیین شد. دستگاه اندازه‌گیری هدایت الکتریکی (JENWAY) برای تعیین میزان یون، دستگاه اندازه‌گیری TDS مدل HI5522 برای اندازه‌گیری کل ذرات جامد محلول و کدورت‌سنج (WTW TURB 355 IR) برای اندازه‌گیری میزان کدورت به‌منظور آنالیز نمونه‌ها استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شار جریان تراوه

نتایج حاصل از شار تراوه در طول زمان در فشار $TMP=3$ bar (فشار میانی در بازه تعیین شده) برای غلظت‌های مختلف SDS در شکل ۲ نشان داده شده است.

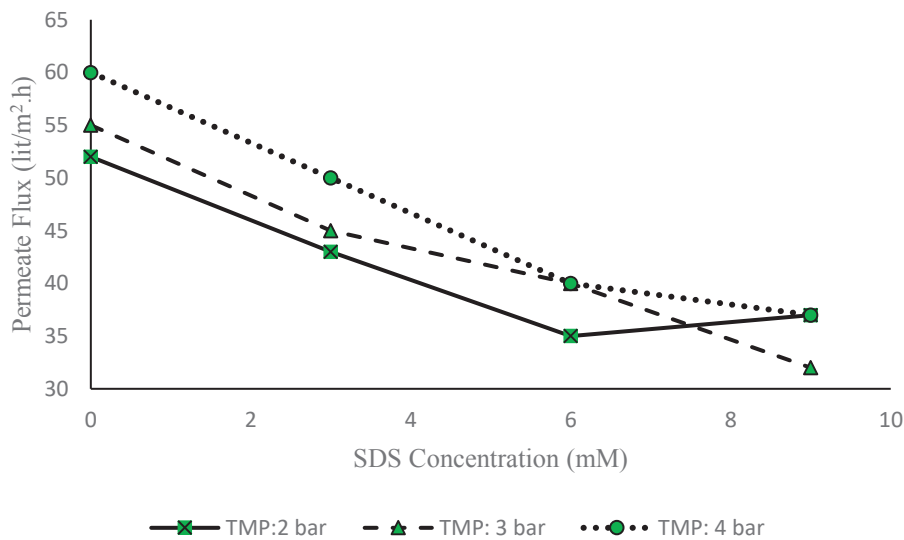
¹ Electrical Conductivity (EC)



شکل ۲: اثر زمان عملیات بر شار جریان تراوه در غلظت‌های مختلف SDS (TMP=3 bar)

Figure 2: Effect of operating time on permeate flux at different SDS concentrations (TMP=3 bar)

در شکل ۲ می‌توان مشاهده کرد که در تمامی غلظت‌های SDS، شار جریان تراوه در طول زمان کاهش می‌یابد. مطابق با شکل، شار تراوه در دقایق اولیه فرایند بسیار بالا و مطلوب بوده و تقریباً از دقیقه ۱۵ به بعد به حالت نسبتاً پایا می‌رسد. این مساله نشان می‌دهد که با گذشت زمان، غشا دچار گرفتگی می‌شود و میزان عبور سیال از آن کاهش پیدا می‌کند. هرچه غلظت SDS، افزایش می‌یابد، مقدار شار اولیه کمتر می‌شود. داده‌ها یک همبستگی معکوس قوی بین غلظت سورفکتانت و شار نفوذ اولیه را نشان می‌دهند. طبق شواهد می‌توان گفت که مقاومت هیدرولیکی لایه رسوب مبتنی بر سورفکتانت، تابع مستقیمی از بار میسل‌ها در محلول خوراک است که نشان دهنده یک ارتباط علت و معلولی بین میزان سورفکتانت و شدت افت نفوذپذیری یا عملکرد غشا می‌باشد [۱۸].



شکل ۳: تأثیر غلظت SDS و TMP بر شار جریان تراوه

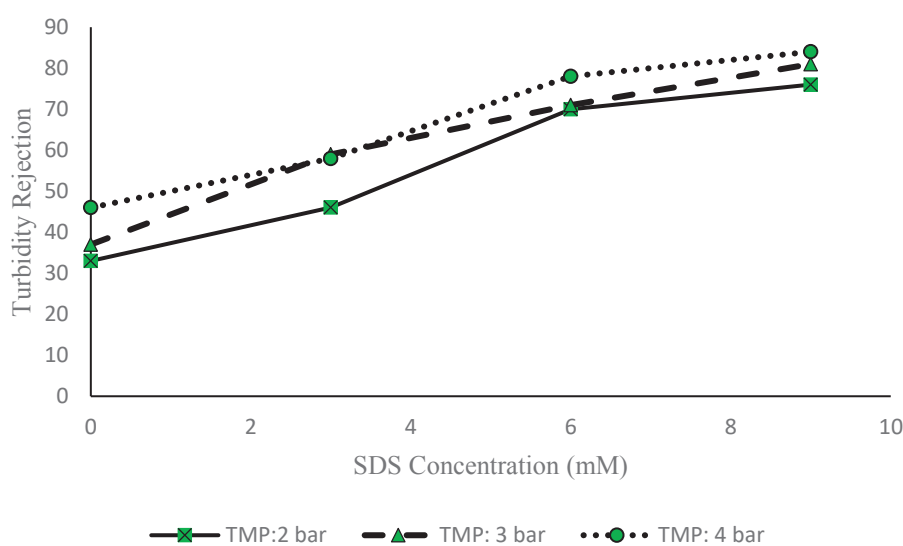
Figure 3: Effect of SDS concentration and TMP on permeate flux

تعامل بین فشار (TMP) و غلظت سورفکتانت بر شار جریان تراوه در شکل ۳ بررسی شده است. همانطور که مشخص شد، افزایش غلظت SDS به طور مداوم شار جریان تراوه را در تمام سطوح فشار کاهش می‌دهد، که نتیجه مستقیم تشدید قطبش غلظت^۱ و تراکم لایه رسوب است [۱،۲۱].

باین حال، مهم‌ترین یافته برای کاربردهای عملی، معکوس شدن نقش فشار است. درحالی‌که فشار بالا به‌عنوان یک نیروی محرکه مثبت در غلظت‌های پایین سورفکتانت عمل می‌کند، اثربخشی آن در فشارهای بالای SDS خنثی می‌شود. این امر نشان می‌دهد که در غلظت‌های فراتر از غلظت بحرانی میسل، فشار اعمال شده دیگر جریان تراوه را افزایش نمی‌دهد، بلکه در درجه اول برای فشرده‌سازی لایه رسوب و افزایش مقاومت هیدرولیکی آن عمل می‌کند. این گذار نشان‌دهنده یک تغییر اساسی در دینامیک فرایند از یک رژیم کنترل شده با فشار به یک رژیم کنترل شده با انتقال جرم است [۲۲].

۲-۳- درصد دفع شاخص‌های آلودگی پساب

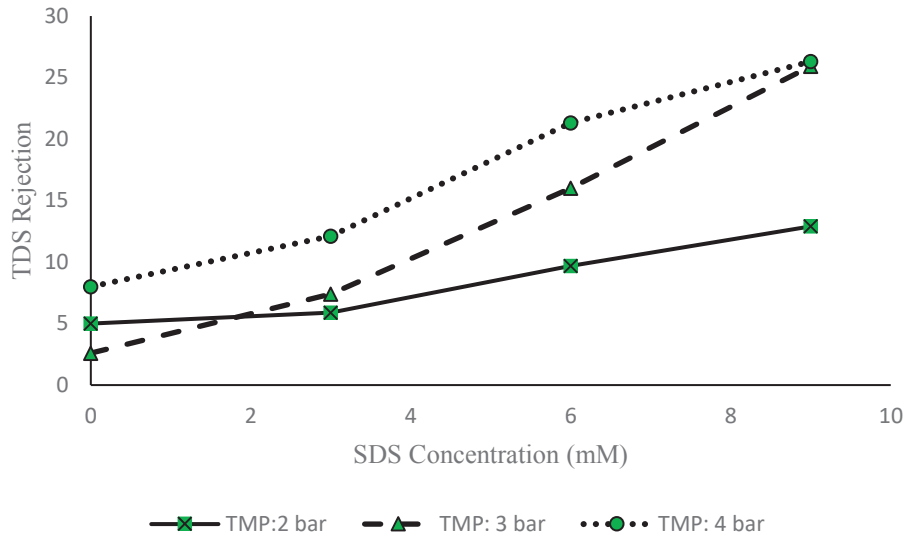
در این قسمت تأثیر فشار و غلظت‌های مختلف عامل فعال سطحی بر میزان دفع آلودگی‌ها با استفاده از سه شاخص کدورت، TDS و EC مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۴: تأثیر غلظت SDS و TMP بر دفع کدورت

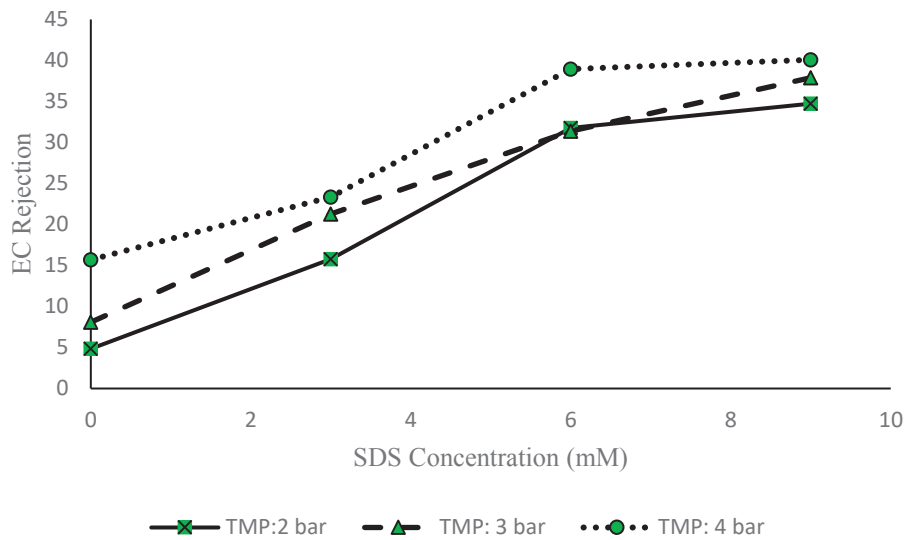
Figure 4: Effect of SDS concentration and TMP on turbidity rejection

¹ Concentration polarization



شکل ۵: تأثیر غلظت SDS و TMP بر دفع TDS

Figure 5: Effect of SDS concentration and TMP on TDS rejection



شکل ۶: تأثیر غلظت SDS و TMP بر هدایت الکتریکی

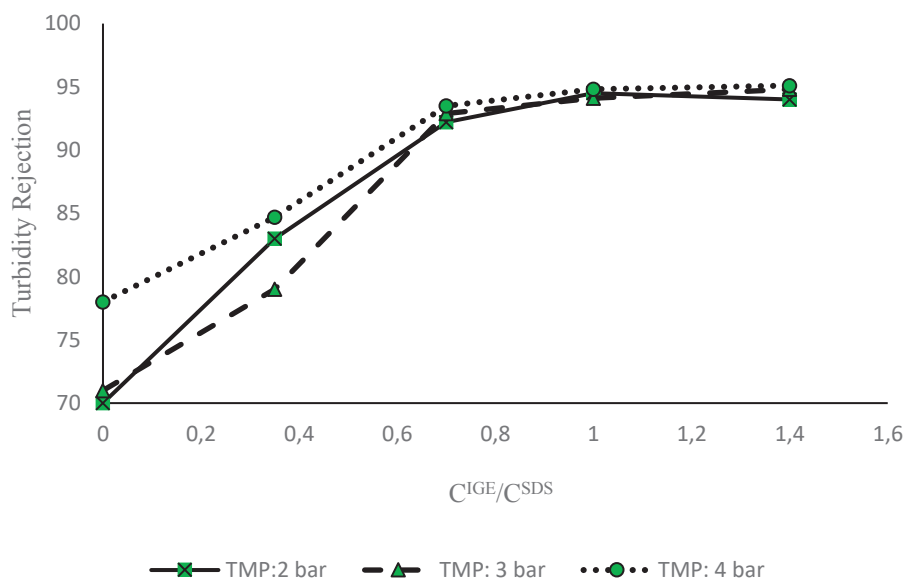
Figure 6: Effect of SDS concentration and TMP on EC rejection

اثر بخشی MEUF مبتنی بر میسل‌ها در حذف آلاینده‌های کلیدی فاضلاب داروسازی در شکل‌های ۴-۶ کمی سازی شده است. داده‌ها یک سلسله مراتب در راندمان دفع را به صورت: کدورت ($\approx 80\%$ در صد) < رسانایی الکتریکی ($\approx 40\%$ در صد) < TDS ($\approx 26\%$) در شرایط بهینه ۴ bar و ۹ mM SDS نشان می‌دهند. این سلسله مراتب بینش مستقیمی در مورد مکانیسم‌های جداسازی ارائه می‌دهد. درصد حذف بالای کدورت، غربال کردن مؤثر توده‌های بزرگ آلاینده میسل را تأیید می‌کند. همچنین کاهش متوسط رسانایی الکتریکی، اتصال ترجیحی الکترواستاتیکی یون‌های رسانای خاص به میسل‌های آنیونی را نشان می‌دهد. در مقابل، درصد حذف پایین تر TDS، محدودیت MEUF در برابر جامدات محلول بدون بار یا با برهمکنش ضعیف را برجسته می‌کند و وجود یک مرز گزینش‌پذیری برای فرایند را نشان می‌دهد [۱۲، ۲۳].

همبستگی مثبت بین غلظت سورفکتانت و حذف آلاینده با تشکیل یک لایه پویا و عملکردی در سطح غشا توضیح داده می شود. در زیر CMC، قطبش غلظت، غلظت موضعی سورفکتانت را افزایش می دهد و جذب اولیه و تجمع پیش میسل را تسهیل می کند [۲۲،۲۳]. در بالای CMC، تشکیل یک لایه ژل میسل متراکم نه تنها به عنوان یک رسوب، بلکه به عنوان یک فیلتر ثانویه پویا عمل می کند و از طریق ترکیبی از حذف اندازه و افزایش مکان های اتصال، دفع را افزایش می دهد. این امر، لایه ژل را به یک جزء عملکردی پیچیده از سیستم جداسازی تبدیل می کند [۲۴-۲۶].

علاوه بر این، نتایج نشان داد که در غلظت های پایین SDS، تأثیر مثبت افزایش TMP بر کارایی فرایند، بیانگر غالب بودن رژیم کنترل شده با فشار است؛ به گونه ای که افزایش نیروی محرکه، موجب افزایش شار تراوه بدون بروز فشردگی شدید لایه رسوب در حال تشکیل می گردد [۲۷]. با این حال، افت بازده جداسازی در فشارها و غلظت های بالاتر (نظیر افزایش کدورت نفوذی)، بیانگر وقوع یک نقطه گذار است. این پدیده احتمالاً ناشی از فشردگی و تغییر شکل ساختار میسل ها تحت فشارهای بیش از حد است که به کاهش تخلخل و ظرفیت نگهداری آلاینده در آنها منجر شده و در نتیجه، عملکرد لایه میسل به عنوان فیلتر ثانویه را تضعیف می کند [۲۸،۲۹].

به طور خلاصه، این نتایج مرزهای عملیاتی مؤثر و گزینه پذیر فرایند MEUF بهبود یافته با SDS و IGE را مشخص می کنند. یافته ها نشان می دهند که این فرایند برای حذف کلوئیدی و یون های خاص به جای جامدات محلول عمومی، مؤثرتر است و برای افزایش عملکرد لایه ژل میسل، پارامترهای عملیاتی نیز باید بهینه شوند.

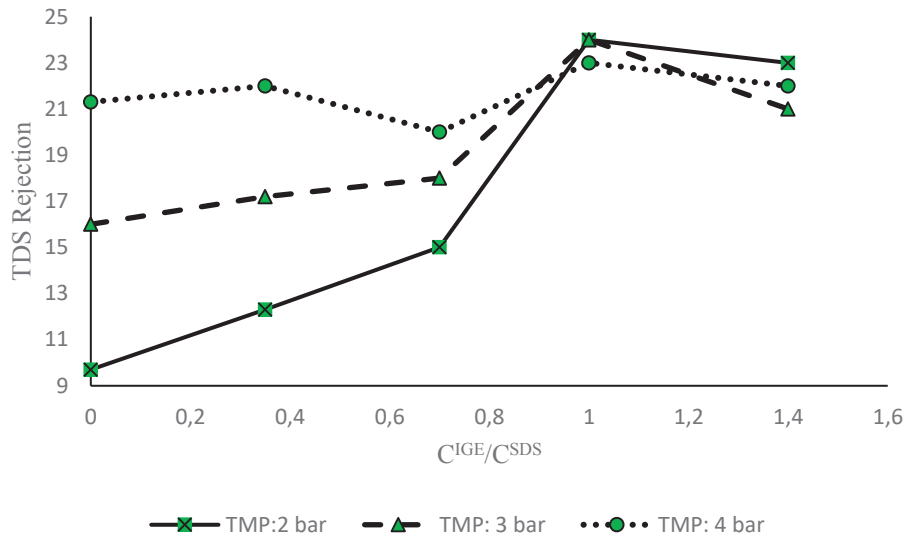


شکل ۷: تأثیر مخلوط سورفکتانت ها و TMP بر دفع کدورت

Figure 7: Effect of surfactant mixture and TMP on turbidity removal

نتایج (شکل ۷) نشان می دهد که افزایش نسبت جرمی IGE/SDS، راندمان حذف کدورت را افزایش می دهد و در تمام فشارهای آزمایش شده (TMP) به حدود ۹۵ درصد می رسد. این امر نشان دهنده اثر هم افزایی بین سورفکتانت های غیر یونی و آنیونی است که تشکیل میسل مؤثرتر را تقویت می کند. فشارهای میان غشایی بالاتر، به

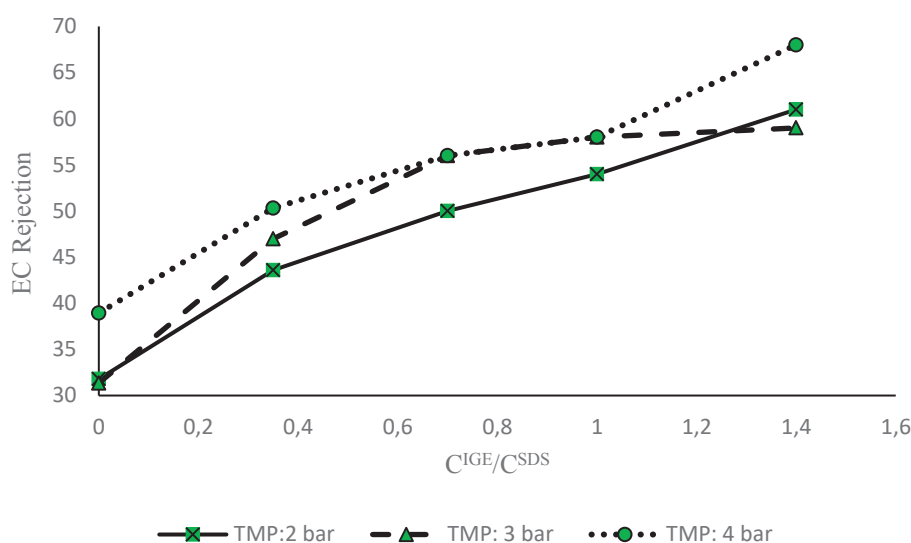
ویژه ۴ bar عملکرد را بیشتر بهبود می‌بخشند. این یافته‌ها اهمیت علمی ترکیب سورفکتانت را در بهینه‌سازی فرایندهای MEUF برجسته می‌کند و نشان می‌دهد که تنظیم دقیق TMP و نسبت‌های سورفکتانت می‌تواند هم راندمان و هم مقرون به صرفه بودن را در تصفیه فاضلاب بهبود بخشد.



شکل ۸: تأثیر مخلوط سورفکتانت‌ها و TMP بر دفع TDS

Figure 8: Effect of surfactant mixture and TMP on TDS removal

شکل ۸ تأثیر ترکیب مخلوط سورفکتانت و TMP بر راندمان حذف TDS را نشان می‌دهد. افزایش نسبت جرمی IGE/SDS، حذف TDS را تا نسبت ۱ تا نسبت ۱ افزایش می‌دهد، پس از آن راندمان تثبیت یا کمی کاهش می‌یابد. حداکثر حذف، که در نسبت ۱ و فشار TMP=۲ bar به دست می‌آید، می‌تواند به کاهش غلظت بحرانی میسل (CMC) نسبت داده شود، که باعث میسل‌سازی مؤثرتر و افزایش مشارکت مولکول‌های SDS در کپسوله‌سازی یون می‌شود [۳۰]. در نسبت‌های بالاتر، سورفکتانت غیر یونی ممکن است باعث اشباع سطح غشا، گرفتگی یا تغییر در آبدوستی شود، در حالی که چسبندگی میسل را تضعیف کرده و ظرفیت حذف یون را کاهش می‌دهد. با افزایش TMP از ۲ به ۴ bar، راندمان جداسازی TDS، بهبود کمی نشان می‌دهد یا حتی کاهش می‌یابد، احتمالاً به دلیل شار تراوه بالاتر که زمان تماس یون‌ها با سطح غشا را کاهش می‌دهد و اجازه می‌دهد مواد محلول بیشتری از آن عبور کنند. این یافته‌ها اهمیت متعادل کردن ترکیب سورفکتانت و اختلاف فشار اعمال شده را برای بهینه‌سازی عملکرد MEUF برجسته می‌کند. از دیدگاه عملی، حفظ نسبت IGE/SDS نزدیک به واحد و عملکرد در اختلاف فشار متوسط می‌تواند راندمان حذف را به حداکثر برساند و در عین حال مصرف انرژی و خطر رسوب‌گذاری را به حداقل برساند.



شکل ۹: تأثیر مخلوط سورفکتانت‌ها و TMP بر هدایت الکتریکی (EC)
Figure 9: Effect of surfactant mixture and TMP on Electrical Conductivity

شکل ۹ بیانگر چگونگی تغییرات راندمان حذف EC با تغییرات نسبت سورفکتانت و TMP را نشان می‌دهد. مطابق با نتایج افزایش نسبت جرمی IGE/SDS، حذف EC را تقریباً تا ۱,۴ افزایش می‌دهد، که پس از آن بهبود کمتر محسوس می‌شود. به طور مشابه، فشارهای عملیاتی بالاتر با تسهیل انتقال و برهمکنش میسل‌ها با یون‌های محلول، منجر به عملکرد حذف بهتر می‌شوند. این مشاهدات تأیید می‌کنند که هم ترکیب سورفکتانت و هم فشار، پارامترهای حیاتی در بهینه‌سازی راندمان MEUF هستند.

نتایج نشان می‌دهند که افزایش نسبت مخلوط سورفکتانت و فشار، توانایی غشا را در حذف شاخص‌های کلیدی کیفیت آب مانند کدورت، TDS و EC بهبود می‌بخشد. باین‌حال، کاهش دفع TDS در نسبت‌های بالاتر نشان می‌دهد که مکانیسم‌های حاکم بر حذف یون‌های محلول، پیچیده‌تر از مکانیسم‌های مربوط به ذرات معلق هستند. راندمان دفع برتر حاصل از سورفکتانت‌های مخلوط در مقایسه با SDS به تنهایی، اثر هم‌افزایی بین سورفکتانت‌های غیر یونی (IGE) و آنیونی (SDS) را نشان می‌دهد که پایداری میسل و ظرفیت جذب یون را افزایش می‌دهد. این موضوع اهمیت سیستم‌های میسلی مخلوط را در بهبود فرایندهای جداسازی مبتنی بر غشا برجسته می‌کند. همچنین از نظر عملی، بهینه‌سازی ترکیب سورفکتانت و TMP می‌تواند منجر به تصفیه فاضلاب مؤثرتر و با بهره‌وری انرژی بالاتر شود.

۳-۳- مقایسه نتایج با مطالعات قبلی

فرایند MEUF نسبت به روش‌های غشایی مرسوم نظیر NF و RO دارای مزایای قابل توجهی است. این فرایند معمولاً در فشار بسیار پایین‌تر (حدود ۱ تا ۶ bar) در مقایسه با NF و RO (۵ تا ۲۵ bar) عمل می‌کند و لذا انرژی مصرفی و هزینه بهره‌برداری به طور محسوسی کاهش می‌یابد [۳۱، ۳۲].

علاوه بر آن، به دلیل برهم کنش انتخابی آلاینده‌ها با میسل‌ها، بازده حذف ترکیبات آلی باردار و یون‌های فلزی چندظرفیتی حتی در غلظت‌های بسیار کم بالا بوده و در بسیاری از موارد نسبت به RO/NF انتخاب‌پذیری بهتری دارد. به‌کارگیری میسل‌ها همچنین از تماس مستقیم آلاینده با سطح غشا جلوگیری کرده و پتانسیل رسوب‌گیری و فولینگ را کاهش می‌دهد، درحالی‌که در RO/NF رسوب‌گیری و گرفتگی غشا از چالش‌های اصلی است. از سوی دیگر، برخلاف RO و NF که املاح و مواد معدنی مفید را نیز به طور غیرانتخابی حذف کرده و نیاز به تنظیم مجدد کیفیت آب در مرحله پس‌تصفیه دارند، MEUF عمدتاً آلاینده‌های هدف را حذف نموده و نیازی به تعدیل ترکیب آب ندارد. همچنین، امکان بازیافت و استفاده مجدد از سورفکتانت در MEUF وجود داشته و این موضوع علاوه بر کاهش هزینه‌ها، مدیریت پسماند را نیز بهبود می‌بخشد. براین‌اساس، MEUF یک گزینه کارآمد، کم‌انرژی و مقرون‌به‌صرفه برای حذف انتخابی آلاینده‌های باردار و فلزات سنگین از پساب محسوب می‌شود، به‌ویژه در شرایطی که روش‌های RO/NF با محدودیت‌های اقتصادی و عملیاتی روبه‌رو هستند [۳۳-۳۶].

با این حال، مقایسه کمی این روش‌ها نیازمند طراحی آزمایش جداگانه است که خارج از محدوده مطالعه حاضر است. در این پژوهش تمرکز بر کارایی MEUF در بهبود شاخص‌های کیفی شامل TDS، کدورت و هدایت الکتریکی بوده است. در جدول ۱ نتایج بدست آمده در این تحقیق با نتایج قبلی مقایسه شده است.

جدول ۱: مقایسه میزان دفع شاخص‌های آلودگی به روش MEUF در پساب‌های مختلف

Table 1: Comparison of the removal rate of pollution indicators by MEUF method in different wastewaters

مرجع Reference	کاهش یا پس‌زنی (Rejection / Reduction)	پارامتر کیفیت آب Water quality parameter	مدل Model	نوع پساب Wastewater type
[۳۷]	97%	Turbidity	MEUF (alkylbenzene sulfonate)	پساب فرآوری روغن خوراکی Edible oil processing wastewater
	86%	EC		
	87%	TDS		
[۱]	99.5%	Turbidity	MEUF (SDS, Triton X-100)	پساب فرآوری نوشابه Soft drink processing wastewater
	81.3%	COD		
	56.7%	TDS		
This study	95%	Turbidity	MEUF (SDS, IGE)	پساب داروسازی Pharmaceutical wastewater
	68%	EC		
	25%	TDS		

مطالعات اندکی کدورت، TDS و EC را برای MEUF گزارش کرده‌اند. لازم به ذکر است که تفاوت در نتایج مربوط به نوع پساب، مقدار و نوع آلاینده‌های موجود در پساب می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد فرایند MEUF با استفاده از غشای UF و مخلوط سورفکتانت‌های SDS و IGE می‌تواند به طور مؤثری شاخص‌های آلودگی پساب صنایع داروسازی را کاهش دهد. رفتار شار تراوه بیانگر آن بود که افزایش TMP موجب افزایش نیروی محرکه و بهبود شار عبوری می‌شود، درحالی‌که افزایش غلظت سورفکتانت به واسطه تشکیل میسل‌های بزرگ‌تر، پدیده پلاریزا سیون غلظت و گرفتگی غشا را تشدید کرده و در نتیجه موجب کاهش شار می‌گردد. به‌طور کلی یافته‌ها بیانگر آن است که انتخاب نسبت مناسب مخلوط

سورفکتانت‌ها همراه با اعمال TMP بهینه، عملکرد فرایند MEUF را برای حذف کدورت، TDS و EC بهبود می‌دهد و استفاده هم‌زمان از SDS و IGE نسبت به مصرف تنها SDS، کارایی بالاتری ایجاد می‌کند. این نتایج از نظر علمی نشان می‌دهد که رفتار میسل‌ها، پایداری آن‌ها و برهم‌کنش با آلاینده‌ها نقش کلیدی در افزایش راندمان جداسازی دارد و از نظر عملی می‌تواند راهنمایی برای طراحی و بهینه‌سازی سیستم‌های غشایی در تصفیه پساب‌های دارویی باشد.

توصیه می‌شود که پژوهش‌های بعدی با استفاده از نمونه‌های متنوع‌تری از پساب کارخانه‌های دارویی مختلف انجام شود تا قابلیت تعمیم‌پذیری نتایج افزایش یابد؛ چراکه اگرچه شاخص‌های عمومی آلودگی مانند TDS، کدورت و EC در بسیاری از پساب‌های دارویی الگوی مشابهی دارند، اما ترکیب شیمیایی دقیق آن‌ها بسته به نوع دارو و مواد به کار برده شده می‌تواند متفاوت باشد و به تبع آن، راندمان حذف نیز تا حدی تغییر کند. همچنین انجام مطالعات طولانی‌مدت برای ارزیابی دوام، پایداری و رفتار عملیاتی غشا در شرایط واقعی ضروری است. در نهایت، برای کاربردهای حساس و مقیاس صنعتی، پایش مقادیر باقیمانده سورفکتانت در جریان تراوه توصیه می‌شود و در صورت نیاز می‌توان از روش‌های تکمیلی مانند جذب، اکسیداسیون پیشرفته یا فرایندهای فیلتراسیون کمکی برای به حداقل رساندن آلودگی و بهبود کیفیت نهایی خروجی استفاده کرد.

References

- [1] Namaghi, H. A., & Mousavi, S. M. (2014) "Micellar-enhanced ultrafiltration of soft drink wastewater using anionic and mixed anionic/nonionic surfactants", *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45(4), 1850–1854, <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2014.03.015>
- [2] Oluwole, A. O., Omotola, E. O., & Olatunji, O. S. (2020) "Pharmaceuticals and personal care products in water and wastewater: a review of treatment processes and use of photocatalyst immobilized on functionalized carbon in AOP degradation ", *BMC Chemistry*, 14, 1–29, <https://doi.org/10.1186/s13065-020-00714-1>
- [3] Obayomi, O. V., Olawoyin, D. C., Oguntimehin, O., Mustapha, L. S., Kolade, S. O., Oladoye, P. O., Oh, S., & Obayomi, K. S. (2024) "Exploring emerging water treatment technologies for the removal of microbial pathogens " *Current Research in Biotechnology*, 8, 100252, <https://doi.org/10.1016/J.CRBIOT.2024.100252>
- [4] Ma, R., Li, J., Zeng, P., Duan, L., Dong, J., Ma, Y., & Yang, L. (2024) "The application of membrane separation technology in the pharmaceutical industry" *Membranes*, 14(1), 24, <https://doi.org/10.3390/membranes14010024>
- [5] Taşcıoğlu, S. (2018) "Nanofiltration mediated by surfactant micelles: micellar-enhanced ultrafiltration", IntechOpen, <https://doi.org/10.5772/intechopen.75775>
- [6] Fillipi, B. R., Brant, L. W., Scamehorn, J. F., & Christian, S. D. (1999a) "Use of Micellar-Enhanced Ultrafiltration at Low Surfactant Concentrations and with Anionic–Nonionic Surfactant Mixtures" *Journal of Colloid and Interface Science*, 213(1), 68–80, <https://doi.org/10.1006/JCIS.1999.6092>
- [7] Grzegorzec, M., & Majewska-Nowak, K. (2018) "The use of micellar-enhanced ultrafiltration (MEUF) for fluoride removal from aqueous solutions", *Separation and Purification Technology*, 195, 1–11, <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2017.11.022>
- [8] Gibbs, L. L., Scamehorn, J. F., & Christian, S. D. (1987) "Removal of n-alcohols from aqueous streams using micellar-enhanced ultrafiltration", *Journal of Membrane Science*, 30(1), 67–74, [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(00\)83341-4](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(00)83341-4)
- [9] Huang, J., Peng, L., Zeng, G., Li, X., Zhao, Y., Liu, L., Li, F., & Chai, Q. (2014) "Evaluation of micellar enhanced ultrafiltration for removing methylene blue and cadmium ion simultaneously with mixed surfactants", *Separation and Purification Technology*, 125, 83–89, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.01.020>
- [10] Tanhaei, B., Chenar, M. P., Saghatoleslami, N., Hesampour, M., Laakso, T., Kallioinen, M., Sillanpää, M., & Mänttari, M. (2014) "Simultaneous removal of aniline and nickel from water by micellar-enhanced ultrafiltration with different molecular weight cut-off membranes", *Separation and Purification Technology*, 124, 26–35, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.01.009>
- [11] West, C. C., & Harwell, J. H. (1992) "Surfactants and subsurface remediation", *Environmental Science & Technology*, 26(12), 2324–2330, <https://doi.org/10.1021/es00036a002>
- [12] Aryanti, N., Nafiunisa, A., Kusworo, T. D., & Wardhani, D. H. (2020) "Micellar-enhanced ultrafiltration using a plant-derived surfactant for dye separation in wastewater treatment", *Membranes*, 10(9), 220, <https://doi.org/10.3390/membranes10090220>
- [13] Deriszadeh, A. L. I., Husein, M. M., & Harding, T. G. (2010) "Produced water treatment by micellar-enhanced ultrafiltration", *Environmental Science & Technology*, 44(5), 1767–1772, <https://doi.org/10.1021/es902862j>
- [14] Afifi, M., Golestani, H. A., Sharifi, S., & Kiani, S. (2014) "Wastewater treatment of raisins processing factory using micellar-enhanced ultrafiltration", *Desalination and Water Treatment*, 52(1–3), 57–64, <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.782254>
- [15] Huang, J., Zeng, G., Fang, Y., Qu, Y., & Li, X. (2009) "Removal of cadmium ions using micellar-enhanced ultrafiltration with mixed anionic-nonionic surfactants", *Journal of Membrane Science*, 326(2), 303–309, <https://doi.org/10.1006/jcis.1999.6092>

- [16] Ghosh, S., & Moulik, S. P. (1998) "Interfacial and micellization behaviors of binary and ternary mixtures of amphiphiles (Tween-20, Brij-35, and sodium dodecyl sulfate) in aqueous medium", *Journal of Colloid and Interface Science*, 208(2), 357–366, <https://doi.org/10.1006/jcis.1998.5752>
- [17] Yu, Z., Zhang, C., Zheng, Z., Hu, L., Li, X., Yang, Z., Ma, C., & Zeng, G. (2017) "Enhancing phosphate adsorption capacity of SDS-based magnetite by surface modification of citric acid", *Applied Surface Science*, 403, 413–425, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.163>
- [18] Li, X., Zeng, G.-M., Huang, J.-H., Zhang, D.-M., Shi, L.-J., He, S.-B., & Ruan, M. (2011) "Simultaneous removal of cadmium ions and phenol with MEUF using SDS and mixed surfactants", *Desalination*, 276(1–3), 136–141, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.03.041>
- [19] Li, Y., Wang, A., Bai, Y., & Wang, S. (2017) "Evaluation of a mixed anionic–nonionic surfactant modified eggshell membrane as an advantageous adsorbent for the solid-phase extraction of Sudan I–IV as model analytes", *Journal of Separation Science*, 40(12), 2591–2602, <https://doi.org/10.1002/jssc.201700094>
- [20] Tanhaei, B., Chenar, M. P., Saghatoleslami, N., Hesampour, M., Kallioinen, M., Sillanpää, M., & Mänttari, M. (2014) "Removal of nickel ions from aqueous solution by micellar-enhanced ultrafiltration, using mixed anionic–non-ionic surfactants", *Separation and Purification Technology*, 138, 169–176, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.10.018>
- [21] Field RW, Wu JJ. (2022) "Permeate flux in ultrafiltration processes—Understandings and misunderstandings", *Membranes (Basel)*, 12, 187, <https://doi.org/10.3390/membranes12020187>
- [22] Joshi, T., Mata, J., & Bahadur, P. (2005) "Micellization and interaction of anionic and nonionic mixed surfactant systems in water", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 260(1–3), 209–215, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.03.009>
- [23] Samper, E., Rodríguez, M., De la Rubia, M. A., & Prats, D. (2009) "Removal of metal ions at low concentration by micellar-enhanced ultrafiltration (MEUF) using sodium dodecyl sulfate (SDS) and linear alkylbenzene sulfonate (LAS)", *Separation and Purification Technology*, 65(3), 337–342, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2008.11.013>
- [24] Binte Rafiq Era S, Mulligan CN. (2023) "Removal of nutrients from water using biosurfactant micellar-enhanced ultrafiltration", *Molecules*, 28, 1559, <https://doi.org/10.3390/molecules28041559>
- [25] Ferella, F., Prisciandaro, M., & De Michelis, I. (2007) "Removal of heavy metals by surfactant-enhanced ultrafiltration from wastewaters", *Desalination*, 207(1–3), 125–133, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.07.007>
- [26] Aryanti N, Giraldi VF, Susanto H, Kusworo TD, Widiasta IN, Rokhati N. (2023) "Model of fouling mechanism in ultrafiltration and micellar-enhanced ultrafiltration membrane for reactive dye removal", *AIP Conf Proc*, vol. 2667, AIP Publishing LLC, p. 040008, <https://doi.org/10.1063/5.0118033>
- [27] Sharifi, S., Golestani, H. A., Afifi, M., & Kiani, S. (2014) "Treatment of edible oil processing wastewater using micellar-enhanced ultrafiltration process", *Desalination and Water Treatment*, 52(13–15), 2412–2418. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.794113>
- [28] Purkait, M. K., DasGupta, S., & De, S. (2004) "Resistance in series model for micellar enhanced ultrafiltration of eosin dye", *Journal of Colloid and Interface Science*, 270(2), 496–506, <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2003.10.030>
- [29] Luo, F., Zeng, G.-M., Huang, J.-H., Zhang, C., Fang, Y.-Y., Qu, Y.-H., Li, X., Lin, D., & Zhou, C.-F. (2010) "Effect of groups difference in surfactant on solubilization of aqueous phenol using MEUF", *Journal of Hazardous Materials*, 173(1–3), 455–461, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.106>
- [30] Yusaf, A., Usman, M., Mansha, A., Saeed, M., Ahmad, M., & Siddiq, M. (2022) "Micellar-enhanced ultrafiltration (MEUF) for removal of rhodamine B (RhB) from aqueous system", *Journal of Dispersion Science and Technology*, 43(3), 348–366, <https://doi.org/10.1080/01932691.2020.1841002>
- [31] Schwarze M. (2017) "Micellar-enhanced ultrafiltration (MEUF)—state of the art", *Environ Sci (Camb)*, 3, 598–624, <https://doi.org/10.1039/C6EW00324A>

-
- [32] Yaqub M, Lee SH, Lee W. (2022) "Investigating micellar-enhanced ultrafiltration (MEUF) of mercury and arsenic from aqueous solution using response surface methodology and gene expression programming", *Sep Purif Technol*, 281, 119880, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119880>
- [33] Aryanti N, Nafiunisa A, Kusworo TD, Wardhani DH. (2020) "Micellar-enhanced ultrafiltration using a plant-derived surfactant for dye separation in wastewater treatment", *Membranes (Basel)*, 10, 220, <https://doi.org/10.3390/membranes10090220>
- [34] Ren J, Jiang Y, Ren H, Xue X, Yang Z, Yang L, et al. (2024) "Micellar-enhanced ultrafiltration of heavy metal wastewater with palygorskite under various temperatures and pressures.", *Journal of Water Process Engineering*, 67, 106208, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106208>
- [35] Moreno M, Mazur LP, Weschenfelder SE, Regis RJ, de Souza RAF, (2022) "Marinho BA, et al. Water and wastewater treatment by micellar enhanced ultrafiltration—A critical review", *Journal of Water Process Engineering*, 46, 102574, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102574>
- [36] Lin W, Jing L, Zhang B. (2020) "Micellar-enhanced ultrafiltration to remove nickel ions: a response surface method and artificial neural network optimization", *Water (Basel)*, 12, 1269, <https://doi.org/10.3390/w12051269>
- [37] Sharifi S, Golestani HA, Afifi M, Kiani S. (2014) "Treatment of edible oil processing wastewater using micellar-enhanced ultrafiltration process", *Desalination Water Treat*, 52, 2412–8, <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.794113>