

بهبودسازی تصفیه پساب‌های نفتی از طریق فرآیند ترکیبی انعقاد-اولترافیلتراسیون با

استفاده از غشای پلی‌اتر سولفون

خدیجه شه نظری پور^۱، مجید پیروی^{۱*}، سودابه خلیلی^۲، محسن جهانشاهی^۱

۱- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - دانشکده مهندسی شیمی - بابل - ایران

۲- گروه آموزشی صنایع کاربردی - دانشگاه ملی مهارت - تهران - ایران

majidpeyravi@nit.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، تصفیه پساب نفتی با استفاده از فرآیند ترکیبی انعقاد و غشای اولترافیلتراسیون از جنس پلی‌اتر سولفون مورد بررسی قرار گرفت. غشای پلی‌اتر سولفون به روش وارونگی فاز ساخته شد و جهت مطالعه مورفولوژی آن، آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام گردید. در فرآیند انعقاد و اولترافیلتراسیون، از عوامل منعقدکننده کلرید آهن ($FeCl_3$) و پلی‌آلومینیوم کلرید (PAC) در غلظت‌های مختلف و در مقادیر pH برابر ۳، ۵، ۷ و ۱۰ استفاده شد. این شرایط به صورت مجزا و ترکیبی، در حضور و عدم حضور اشعه فرابنفش (UV) و طی مدت زمان ۳۰ دقیقه، به منظور تعیین شرایط بهینه حذف شیمیایی اکسیژن‌خواه (COD) ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که در فرآیند انعقاد-اولترافیلتراسیون، افزایش غلظت عوامل منعقدکننده و تغییر pH اثر قابل توجهی بر بهبود شار تراوا و کاهش COD دارد. تابش UV می‌تواند با تجزیه جزئی ترکیبات آلی و تأثیر بر لخته‌های تشکیل شده، کارایی فرآیند را افزایش دهد و شار تراوا و عملکرد حذف COD را بهبود بخشد. به طور کلی، استفاده از فرآیند ترکیبی انعقاد همراه با غشای پلی‌اتر سولفون، چه در حضور و چه در عدم حضور تابش UV، موجب افزایش نرخ شار و بهبود عملکرد حذف COD شد. بازده حذف COD در فرآیند انعقاد و فرآیند ترکیبی انعقاد-اولترافیلتراسیون به ترتیب ۸۶٪ و ۹۶٪ به دست آمد.

کلید واژه‌ها: تصفیه پساب نفتی، انعقاد، اولترافیلتراسیون، غشا، پلی‌آلومینیوم کلراید، کلرید آهن (III).

* majidpeyravi@nit.ac.ir

بابل - خیابان شریعتی - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - دانشکده مهندسی شیمی - کدپستی: ۴۷۱۴۸۷۱۱۶۷

Nomenclature			
FeCl ₃	Ferric Chloride	SDS	Sodium dodecyl sulfate
PAC	Poly Aluminum Chloride	NaCl	Sodium chloride
NaOH	Sodium hydroxide	CaCl ₂	Calcium chloride
HCl	Hydrogen Chloride	MgCl ₂	Magnesium chloride
UF	Ultrafiltration	SEM	Scanning Electron
Microscope			
PES	Polyether sulfone	DLS	Dynamic Light Scattering
PVP	Polyvinyl pyrrolidone	COD	Chemical Oxygen Demand
DMF	Dimethylformamide	UV	Ultraviolet irradiation
PF	Permeate Flux		

۱. مقدمه

فاضلاب‌های نفتی یکی از منابع مهم آلودگی محیط زیست به شمار می‌روند و عمدتاً ناشی از فعالیت‌های پالایشگاه‌ها، پتروشیمی‌ها، مراکز توزیع نفت و صنعت حمل‌ونقل هستند. پساب‌های نفتی به دلیل دارا بودن هیدروکربن‌ها، مواد آلی و ذرات معلق، از مهم‌ترین منابع آلودگی محیط‌زیست محسوب می‌شوند و تخلیه آن‌ها بدون تصفیه مناسب می‌تواند اثرات مخربی بر اکوسیستم‌های آبی، حیات وحش و سلامت انسان داشته باشد [۱-۳]. بر اساس استانداردهای زیست‌محیطی، حد مجاز روغن و گریس برای تخلیه فاضلاب روغنی به محیط ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر و برای آب‌های سطحی و ساحلی ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر تعیین شده است [۴]. بنابراین، توسعه روش‌های کارآمد برای تصفیه پساب‌های نفتی و کاهش آلودگی‌های آبی اهمیت ویژه‌ای دارد و استانداردها و مقررات بین‌المللی نیز بر استفاده از فناوری‌های پیشرفته برای این منظور تأکید دارند [۵و۶]. روش‌های متعددی مانند جداسازی، جذب، اکسیداسیون، فناوری غشایی و انعقاد-لخته‌سازی برای حذف آلاینده‌های نفتی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۷-۹]. در میان

این روش‌ها، فناوری جداسازی غشایی به دلیل مزایایی نظیر راندمان بالا، سهولت بهره‌برداری، نیاز به فضای کم، مصرف انرژی پایین و هزینه نگهداری اندک، به‌عنوان راه‌حلی مؤثر و جایگزین شناخته شده است [۱۰]. اولترافیلتراسیون (UF) به‌عنوان یک روش جداسازی غشایی با نیروی محرکه فشار، می‌تواند امولسیون‌های روغن-آب را بدون نیاز به فرایند شکست امولسیون تصفیه کرده و لجن روغنی تولید نکند [۱۱]. به همین دلیل، این روش به‌عنوان یکی از شیوه‌های کارآمد برای تصفیه پساب‌های نفتی در نظر گرفته می‌شود. با این حال، یکی از چالش‌های اصلی فرآیندهای غشایی، پدیده رسوب‌گذاری است که می‌تواند باعث کاهش شار نفوذ (PF) و افزایش هزینه‌های عملیاتی به دلیل نیاز به شستشوی مکرر یا تعویض غشا شود. بنابراین کنترل گرفتگی غشا گام کلیدی در دستیابی به جداسازی کارآمد روغن-آب است [۱۲]. به منظور کاهش رسوب‌گذاری و بهینه‌سازی عملکرد فرآیندهای غشایی، استفاده از پیش‌تصفیه انعقادی به‌عنوان یک راهکار مؤثر پیشنهاد می‌شود؛ زیرا این فرآیند با تجمع ذرات و مواد آلی، ساختارهای قابل جداسازی تری ایجاد می‌کند که به‌سادگی با شستشوی هیدرولیکی از سطح غشا حذف می‌شوند. [۱۳-۱۵].

فرآیند ترکیبی انعقاد-میکروفیلتراسیون، به‌ویژه در حالت درون‌خطی، یکی از روش‌های رایج است [۱۶]. این فرآیندها که در آن واحدهای غشایی (مانند نانوفیلتراسیون، اولترافیلتراسیون و میکروفیلتراسیون) با روش‌هایی نظیر انعقاد، جذب یا تبادل یونی ادغام می‌شوند، به‌منظور کاهش مقدار مورد نیاز منعقدکننده و بهبود شرایط عملیاتی فرایند مورد استفاده قرار می‌گیرند. [۱۷]. همچنین، استفاده از اشعه ماوراءبنفش (UV) به‌عنوان یک عامل اکسیدکننده در کنار منعقدکننده‌ها، می‌تواند با تسهیل تجزیه جزئی ترکیبات آلی پیچیده، راندمان حذف آلاینده‌ها را افزایش دهد [۱۸]. مطالعات متعددی اثربخشی فرآیندهای ترکیبی را تأیید کرده‌اند. به‌عنوان مثال، کریستینا و همکاران در سال ۲۰۰۹ با استفاده از فرآیند انعقاد-اولترافیلتراسیون و غشای پلی‌اترسولفون، تأثیر منعقدکننده‌هایی نظیر کلرید آهن، سولفات آهن و سولفات آلومینیوم را بررسی کردند. مطالعات نشان داده‌اند که یکپارچه‌سازی روش‌های شیمیایی با UF می‌تواند در برخی موارد نتایج مطلوبی ایجاد کند. [۱۹]. در مطالعه‌ای دیگر، مین و همکاران با استفاده از فرآیند انعقاد-میکروفیلتراسیون و پلی‌آلومینیوم کلراید به‌عنوان منعقدکننده، به حذف ۵۵ تا ۷۰/۴ درصد مواد آلی محلول از آب سطحی دست یافتند [۲۰]. همچنین، ژانگ و همکاران با استفاده از انعقاد پیش از فیلتراسیون و منعقدکننده‌هایی مانند کلرید آلومینیوم و پلی‌آلومینیوم کلراید، حذف فسفر و بهبود فیلتراسیون پساب خانگی را گزارش کردند [۲۱]. رسولی و همکاران با ترکیب فرآیند جذب و فیلتراسیون غشایی، حذف ۹۹/۵ تا ۹۹/۹ درصد کل کربن آلی (TOC) را با استفاده از PAC و ژئولیت به‌عنوان جاذب گزارش کردند که عملکرد بهتری در کاهش رسوب‌گذاری غشا داشت [۲۲]. با توجه به پیچیدگی ترکیبات موجود در پساب‌های نفتی، به‌ویژه امولسیون‌های پایدار روغن در آب، انتخاب نوع منعقدکننده و تعیین شرایط مناسب پیش‌تصفیه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در سال‌های اخیر، استفاده از منعقدکننده پلی‌آلومینیوم کلراید (PAC) در تصفیه آب و فاضلاب به‌طور گسترده‌ای گسترش یافته است.

از مهم‌ترین مزایای PAC می‌توان به نیاز به غلظت کمتر، خاصیت اسیدی پایین‌تر، تشکیل سریع لخته‌های مترکم‌تر و تولید لجن کمتر اشاره کرد. با این حال، از نظر ویژگی‌های انعقاد و لخته‌سازی و همچنین ساختار شیمیایی، PAC در موقعیتی بین نمک‌های فلزی متداول و لخته‌سازهای آلی قرار دارد. این ویژگی منجر به تشکیل کمپلکس‌های آبی پایدار در محیط‌های آبی می‌شود که یکی از توانمندی‌های ویژه این ماده در فرآیند انعقاد محسوب می‌گردد [۲۳ و ۲۴].

این مطالعه با تمرکز بر فرآیند ترکیبی انعقاد-اولترافیلتراسیون با استفاده از غشای پلی‌اتر سولفون (PES) برای تصفیه پساب‌های نفتی واقعی (از پالایشگاه بندرعباس) و سنتزی (امولسیون گازوئیل/آب) انجام شده است. در این پژوهش، که در دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل انجام شد، از منعقدکننده‌های کلرید آهن ($FeCl_3$) و پلی‌آلومینیوم کلراید (PAC) در غلظت‌های مختلف و اشعه ماوراءبنفش به عنوان عامل اکسید کننده استفاده شد. شاخص‌های COD و PF در مراحل مختلف فرآیند اندازه‌گیری و مقایسه شدند. در واقع هدف از این مطالعه بهینه‌سازی ساختار غشای PES متعارف برای شرایط سخت پساب نفتی و ارزیابی عملکرد آن در یک سیستم ترکیبی شامل انعقاد، تابش UV و اولترافیلتراسیون است. اگرچه فرآیند ترکیبی انعقاد-اولترافیلتراسیون در مطالعات پیشین بررسی شده، پژوهش‌های موجود عمدتاً روی پساب سنتزی، یک نوع منعقدکننده یا شرایط محدود آزمایشگاهی تمرکز داشته‌اند و بررسی جامع اثر ترکیب دو منعقدکننده (PAC و $FeCl_3$)، تابش UV، تغییر pH نزدیک نقطه ایزوالکتریک و ویژگی‌های امولسیون نفتی واقعی (حاوی سورفکتانت SDS) کمتر انجام شده است. مطالعه حاضر با ارزیابی عملکرد غشای PES در چنین شرایطی و بررسی دقیق تغییر الگوی گرفتگی از انسداد منفذی به لایه کیک متخلخل، درکی مکانیکی از اثر منعقدکننده‌ها و شرایط عملیاتی بر کنترل گرفتگی و پایداری فرآیند ترکیبی ارائه می‌دهد. این رویکرد کاربردی و بررسی همزمان چند عامل مؤثر در پساب واقعی پالایشگاهی، جنبه‌ای نو و متمایز نسبت به مطالعات پیشین ایجاد می‌کند.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱ مواد

در این پژوهش، کلیه مواد شیمیایی با درجه خلوص آزمایشگاهی استفاده شدند. پلی‌اتر سولفون (PES) به عنوان پلیمر اصلی سازنده غشا از شرکت سیگما آلدریج^۱ تهیه گردید. آب مقطر به عنوان غیرحلال در مراحل آماده‌سازی محلول‌ها و شست‌وشو مورد استفاده قرار گرفت. دی‌متیل فرمامید (DMF) با خلوص بالا از شرکت مرک^۲ به عنوان حلال پلیمر به کار گرفته شد. پلی‌وینیل

^۱ Sigma-Aldrich

^۲ Merck

پیرولیدن (PVP) محصول شرکت سیگما آلدریج به عنوان عامل شکل دهنده حفرات غشا استفاده گردید. برای بهبود خواص سطحی غشا و کاهش کشش سطحی محلول پلیمری، از سورفکتانت های سدیم دودسیل سولفات (SDS) و تریتون (Triton X-100)، هر دو ساخت شرکت مرک، استفاده شد. گلیسرول به عنوان عامل انعطاف پذیر کننده و پایدار کننده ساختار غشا از شرکت مرک تهیه گردید. تنظیم pH محلول ها با استفاده از سدیم هیدروکسید (NaOH) و هیدروکلریک اسید (HCl)، هر دو محصول شرکت مرک، انجام شد. همچنین، برای فرآیند انعقاد، از دو منعقد کننده شامل پلی آلومینیوم کلرید (PAC) محصول شرکت فلز آب و کلرید آهن (FeCl₃) محصول شرکت مرک استفاده گردید. همچنین در این تحقیق از پساب نفتی تهیه شده از پالایشگاه بندرعباس با COD برابر به ۸۷۰۰ میلی گرم بر لیتر و پساب سنتزی (امولسیون گازوئیل / آب) به عنوان خوراک با COD برابر به ۲۸۰۰ میلی گرم بر لیتر مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۲ تهیه امولسیون (گازوئیل / آب)

پساب نفتی سنتزی به صورت امولسیون گازوئیل / آب با افزودن ۵۰۰ میلی گرم بر لیتر گازوئیل به آب مقطر تهیه شد. به منظور افزایش پایداری امولسیون، سورفکتانت سدیم دودسیل سولفات (SDS) با غلظت ۵۰ میلی گرم بر لیتر به محلول اضافه گردید. غلظت ۵۰ میلی گرم بر لیتر SDS مطابق گزارش های اخیر بوده و این محدوده از غلظت (۴۰-۶۰ mg/L) برای پایدارسازی فیلم کش گزارش شده است [۲۵]. این ترکیب به کمک دستگاه اولتراسونیک به مدت ۶۰ دقیقه همگن شد.

۲-۳ ساخت غشا

در این تحقیق، غشای پلی اتر سولفون (PES) با استفاده از روش وارونگی فاز به وسیله رسوبدهی غوطه وری تهیه گردید. در این روش، ابتدا محلول پلیمری یکنواختی تهیه شد که شامل ۱۵ درصد وزنی پلی اتر سولفون به عنوان ماده اصلی سازنده غشا و دی متیل فرمامید (DMF) به عنوان حلال بود. پلیمر PES به تدریج به حلال DMF اضافه گردید و به وسیله همزن مغناطیسی مدل Helmer-MK20 ساخت کشور آلمان در سرعت متوسط همزده شد تا به طور کامل در حلال حل شود و محلول همگن حاصل گردد. به منظور بهبود خواص عملکردی و ساختاری غشا، به محلول حاصل ۳ درصد وزنی گلیسرول به عنوان عامل انعطاف پذیر کننده، ۱ درصد وزنی تریتون به عنوان سورفکتانت و ۱ درصد وزنی پلی وینیل پیرولیدن (PVP) به عنوان عامل شکل دهنده حفرات اضافه شد. افزودن PVP باعث افزایش تخلخل سطحی و داخلی غشا می شود و توزیع یکنواخت حفرات را تسهیل می کند، در حالی که گلیسرول باعث افزایش انعطاف پذیری فیلم و کاهش شکنندگی آن در مراحل خشک سازی می شود. سورفکتانت تریتون نقش تثبیت کننده حباب ها و کاهش تنش سطحی را ایفا می کند و از ایجاد ساختارهای غیر یکنواخت جلوگیری می نماید.

پس از افزودن این مواد، محلول به مدت ۴ ساعت تحت اختلاط یکنواخت با همزن مغناطیسی قرار گرفت تا از عدم تشکیل گره های

پلیمری و توزیع کامل مواد افزودنی اطمینان حاصل شود. در مرحله بعد، محلول پلیمری جهت حذف حباب‌های هوای تشکیل شده، در شرایط اتمسفر و به دور از لرزش به مدت کافی رها شد تا فرآیند حباب‌زدایی کامل انجام گیرد. سپس محلول یکنواخت و بدون حباب بر روی لایه‌ای از پلی‌استر به‌عنوان تکیه‌گاه ریخته شد و با استفاده از فیلم‌کش^۳ لایه‌ای با ضخامت کنترل شده ایجاد گردید. عملیات غوطه‌وری در حمام غیرحلال در دمای محیط انجام شد و طی آن، فرآیند وارونگی فاز رخ داد؛ به این صورت که حلال DMF با آب غیرحلال جایگزین شده و ساختار نامتقارن غشا شکل گرفت. این فرآیند منجر به تشکیل حفرات متخلخل در لایه پشتیبان و یک لایه سطحی فشرده با نفوذپذیری کنترل شده در سطح غشا می‌شود. ساختار حفرات غشا تحت تأثیر نسبت پلیمر به حلال، حضور افزودنی‌ها و سرعت غوطه‌وری کنترل می‌شود. افزایش نسبت PVP و سورفکتانت، منجر به افزایش اندازه و تراکم حفرات می‌شود، در حالی که گلیسرول و شرایط خشک‌سازی مناسب باعث کاهش شکنندگی و حفظ یکپارچگی ساختار غشا می‌گردد. غشاهای شکل گرفته به مدت ۲۴ ساعت در حمام غیرحلال نگهداری شدند تا فرآیند جداسازی فاز و خروج کامل حلال DMF از ساختار غشا تکمیل گردد. در نهایت، غشاها از حمام خارج شده و در دمای محیط به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند تا برای مراحل بعدی، از جمله ارزیابی عملکرد اولترافیلتراسیون، آماده شوند [۲۶ و ۲۷].

۲-۴ اندازه‌گیری COD

برای تعیین میزان آلودگی و اندازه‌گیری ذرات معلق و کلوئیدی موجود در پساب نفتی، شاخص COD به کار گرفته شد. این اندازه‌گیری می‌تواند به صورت دستی (تیتراسیون) یا با استفاده از دستگاه انجام شود. در این مطالعه، اندازه‌گیری COD با استفاده از فتومتر مخصوص COD انجام شد و ویال‌های ویژه حاوی دی‌کرومات پتاسیم به‌عنوان عامل اکسند مورد استفاده قرار گرفتند. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، ۲۰۰ میکرولیتر از پساب با سرنگ مخصوص برداشته شده و به ویال حاوی دی‌کرومات پتاسیم اضافه شد و محلول به‌طور کامل تکان داده شد تا یکنواخت شود. ویال‌ها سپس در راکتور در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲۰ دقیقه قرار گرفتند. پس از پایان زمان واکنش، ویال‌ها در دمای محیط خنک شدند و میزان COD با استفاده از فتومتر خوانده شد. میزان درصد پس‌زنی COD نیز با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد.

$$R = (1 - \frac{C_p}{C_f}) \times 100 \quad (1)$$

³ Film Applicator

در این رابطه R درصد پس زنی COD و C_F و C_P به تربیت غلظت COD در خوراک و در خروجی می‌باشد [۲۸].

۲-۵ روش انجام آزمایش

۲-۵-۱ بررسی عملکرد غشا

عملکرد غشا در تصفیه پساب نفتی سنتزی از نظر شار تراوا و میزان حذف COD مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، غشا در سل آزمایشگاهی نصب شد و مخزن آن با آب مقطر پر شد تا شار تراوا غشا پایه تحت شرایط عملیاتی شامل فشار ۲ بار، زمان ۱۲۰ دقیقه و دمای محیط اندازه‌گیری گردد. پس از اتمام اندازه‌گیری، آب تخلیه شد و پساب نفتی سنتزی در مخزن ریخته شد و شرایط عملیاتی مشابه تنظیم گردید تا عملکرد غشا در دو شاخص شار تراوا و درصد حذف COD ارزیابی شود.

۲-۵-۲ تعیین شرایط بهینه استفاده از منعقدکننده‌ها

به منظور تعیین شرایط بهینه استفاده از منعقدکننده‌ها، آزمایشاتی طراحی شد. در این آزمایش‌ها، چهار بشر استریل و دستگاه همزن مورد استفاده قرار گرفت. در هر بشر، ۵۰۰ میلی‌لیتر پساب ریخته شد و غلظت‌های مختلفی از پلی‌آلومنیوم کلراید (PAC) به میزان ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و کلرید آهن ($FeCl_3$) به میزان ۱۰، ۳۰، ۶۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به نمونه‌ها اضافه گردید. pH نمونه‌ها با افزودن محلول‌های NaOH و HCl در چهار مقدار ۳، ۵، ۷ و ۱۰ تنظیم شد. این دامنه وسیع pH به ما اجازه خواهد داد تا رفتار سیستم در شرایط افراطی و غیرمعمول در صنایع نیز مورد ارزیابی قرار گیرد و تأثیر pH بر عملکرد حذف آلاینده‌ها به‌طور جامع بررسی شود. با این حال، محدوده عملیاتی واقعی واحدهای صنعتی معمولاً محدودتر است. نمونه‌ها تحت اختلاط مکانیکی قرار گرفتند؛ ابتدا به مدت ۱ دقیقه با سرعت بالا و سپس به مدت ۳۰ دقیقه با سرعت متوسط هم زده شدند تا فرآیند انعقاد و لخته‌سازی به‌صورت یکنواخت انجام شود. پس از پایان آزمایش، مایع فوقانی نمونه‌ها جمع‌آوری شد و آنالیز COD برای ارزیابی میزان حذف آلاینده‌ها انجام گرفت.

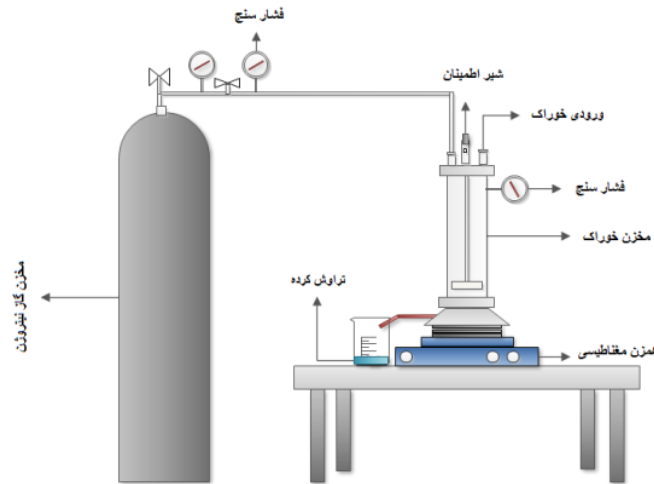
۲-۵-۳ بررسی اثر تابش فرابنفش (UV) بر کارایی انعقاد

برای بررسی اثر تابش فرابنفش بر فرآیند انعقاد، ترکیب تابش اشعه فرابنفش و مواد منعقدکننده مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا PAC در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و $FeCl_3$ در غلظت‌های ۱۰، ۳۰، ۶۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به نمونه‌ها افزوده شد. تمامی نمونه‌ها در pH برابر با ۷ تنظیم و تحت تابش لامپ UV با توان ۱۵۰ وات و اختلاط متوسط به مدت

۳۰ دقیقه قرار گرفتند. لازم به ذکر است که تابش UV در این مطالعه هیچ‌گونه نقش فوتوکاتالیستی یا فعال‌سازی شیمیایی برای PAC و FeCl₃ ندارد. UV صرفاً به‌عنوان یک عامل فوتولیتیک ملایم جهت کاهش پایداری امولسیون‌های نفتی و بهبود شرایط لخته‌سازی استفاده شده است. فوتولیز جزئی ترکیبات آلی و تشکیل مقدار اندکی رادیکال‌های کلر و هیدروکسیل در حضور یون‌های کلرید، منجر به افزایش واکنش‌پذیری سطحی آلاینده‌ها و ایجاد لخته‌های متراکم‌تر می‌شود [۲۹ و ۳۰]. در مرحله بعد، به منظور بررسی اثر pH، غلظت بهینه هر دو منعقدکننده که از مرحله قبل به دست آمد، مورد استفاده قرار گرفت؛ به این صورت که غلظت بهینه PAC و FeCl₃ به نمونه‌ها اضافه شد و pH آن‌ها در چهار مقدار ۳، ۵، ۷ و ۱۰ تنظیم گردید. نمونه‌ها تحت اختلاط متوسط و تابش UV به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفتند (زمان انعقاد و تابش UV همزمان). پس از آن، فرآیند فیلتراسیون به مدت ۱۰۰ دقیقه انجام شد و در طول فرآیند نمونه‌برداری برای اندازه‌گیری COD انجام شد تا میزان حذف آلاینده‌ها ارزیابی شود.

۲-۵-۴ فرآیند ترکیبی انعقاد-ولترافیلتراسیون

برای ارزیابی عملکرد غشاها در فرآیند ترکیبی انعقاد-ولترافیلتراسیون و اندازه‌گیری شار تراوا، از سیستم آزمایشگاهی انتها بسته استفاده شد. این سیستم به گونه‌ای طراحی شده است که متغیرهای عملیاتی مانند فشار و سرعت جریان به راحتی قابل کنترل و اندازه‌گیری باشند. شکل ۱ شمایی از سیستم آزمایشگاهی انتها بسته را نمایش می‌دهد. مطابق با شکل، محلول خوراک توسط نیروی محرکه‌ای که از طرف گاز نیتروژن اعمال می‌شود از درون محفظه‌ی غشایی بر روی غشای پایه قرار گرفته شده در انتهای سل هدایت می‌گردد. غشاء در بخش انتهایی سل استوانه‌ای بر روی یک نگهدارنده قرار گرفته و به واسطه یک واشر ارینگ آب بندی می‌گردد. جزئیات سل استوانه‌ای سیستم انتها بسته در شکل نشان داده شده است. محلول خوراک از ورودی تعبیه شده در قسمت بالای سل وارد آن می‌شود. به منظور ایجاد نیروی محرکه فشاری جهت عبور محلول از غشاء از فشار گاز نیتروژن استفاده می‌گردد.



شکل (۱) نمایی شماتیک از ست آب آرزبایی عملکرد انتها بسته

به منظور اندازه‌گیری دقیق فشار در محفظه‌ی غشایی از فشارسنج استفاده شده است. جریان خوراک در محفظه غشایی با اعمال فشار مورد نیاز از روی سطح غشا عبور کرده و به مخزن جمع‌آوری خروجی جهت اندازه‌گیری فلاکس خروجی هدایت می‌شود. برای بهبود گرفتگی غشا و افزایش حذف COD، پس از هر مرحله فرآیند انعقاد، فیلتراسیون انجام شد. ابتدا شار تراوا از غشا اندازه‌گیری شد، سپس نمونه مرحله انعقاد به مخزن افزوده و فیلتراسیون به مدت ۱۰۰ دقیقه انجام شد. شار تراوا با استفاده از وزن‌سنجی تعیین گردید و در طول فرآیند، نمونه‌برداری در زمان‌های متفاوت برای تعیین میزان پس‌دهی COD انجام شد تا عملکرد غشا به‌طور کامل ارزیابی شود.

۲-۵-۵ تصفیه پساب نفتی شور با استفاده از فرآیند انعقاد- اولترا فیلتراسیون

هدف از سنتز و تصفیه پساب نفتی شور، شبیه‌سازی و تصفیه پساب خروجی از واحد نمک‌زدایی نفت خام می‌باشد. پساب حاصل از این واحد، شامل حدود ۷۵٪ سدیم کلراید، ۱۵٪ کلسیم کلراید و ۱۰٪ منیزیم کلراید است. بر این اساس، این سه نمک به پساب افزوده شد و فرآیند ترکیبی PAC/FeCl₃/UV همراه با اولترافیلتراسیون برای تصفیه پساب شور به کار گرفته شد. همچنین، برای ارزیابی و مقایسه تأثیر فرآیند انعقاد-اولترافیلتراسیون، آزمایشاتی مشابه بر روی پساب نفتی واقعی با شرایط عملیاتی برابر با پساب سنتزی انجام گردید.

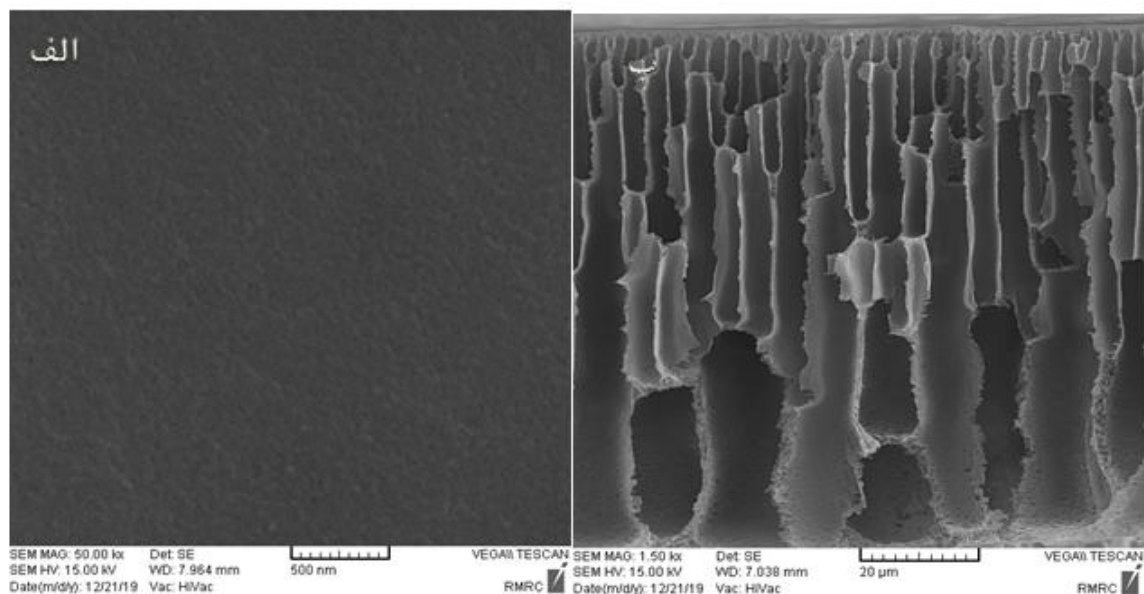
۳-۱ میکروسکوپ الکترونی روبشی

آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) جهت بررسی مورفولوژی و ساختار سطح و مقطع عرضی غشای پلی اتر سولفون ساخته شده به روش وارونگی فاز انجام و در شکل ۲ نشان داده شد. تصاویر SEM نشان داد که غشا دارای ساختار نامتقارن متشکل از لایه سطحی چگال^۴ و لایه زیرین متخلخل با منافذ انگشتمانند^۵ می باشد. این ساختار، ویژگی رایج غشاهای اولترافیلتراسیون پلیمری است که تعادل مناسبی بین استحکام مکانیکی و نفوذپذیری ایجاد می کند. در تصاویر سطحی (تصویر الف)، یکنواختی و عدم وجود نقص های قابل مشاهده مانند ترک یا حفرات بزرگ غیرکنترلی تأیید شد که نشان دهنده کیفیت بالای فرایند ساخت غشا است. این یکنواختی سطحی به کاهش نقاط مستعد گرفتگی و افزایش طول عمر عملیاتی غشا کمک می کند. وجود لایه زیرین متخلخل و منافذ انگشتمانند در تصاویر مقطع عرضی (تصویر ب) بیانگر سرعت بالای تبادل حلال و غیرحلال در مرحله تشکیل غشا می باشد که در روش وارونگی فاز رخ داده است. چنین ساختاری، به ویژه با منافذ پیوسته و کانال های عمقی، می تواند منجر به افزایش شار تراوا شود. در مجموع، نتایج SEM نشان می دهد که غشای ساخته شده از نظر ریخت شناسی^۶ مناسب فرآیند اولترافیلتراسیون بوده و انتظار می رود در ترکیب با فرآیند انعقاد، عملکرد مطلوبی در حذف آلاینده ها و کاهش گرفتگی سطحی داشته باشد [۳۱-۳۳]. علاوه بر این، ضخامت غشاء به طور تقریبی ۶۰ میکرومتر اندازه گیری شد، که این ویژگی با توجه به ساختار نامتقارن غشاء، می تواند تأثیری مثبت بر عملکرد و کارایی آن در فرآیند اولترافیلتراسیون داشته باشد، زیرا ضخامت مناسب می تواند تعادلی بین نفوذپذیری و استحکام ایجاد کند.

⁴ Skin Layer

⁵ Finger-like pores

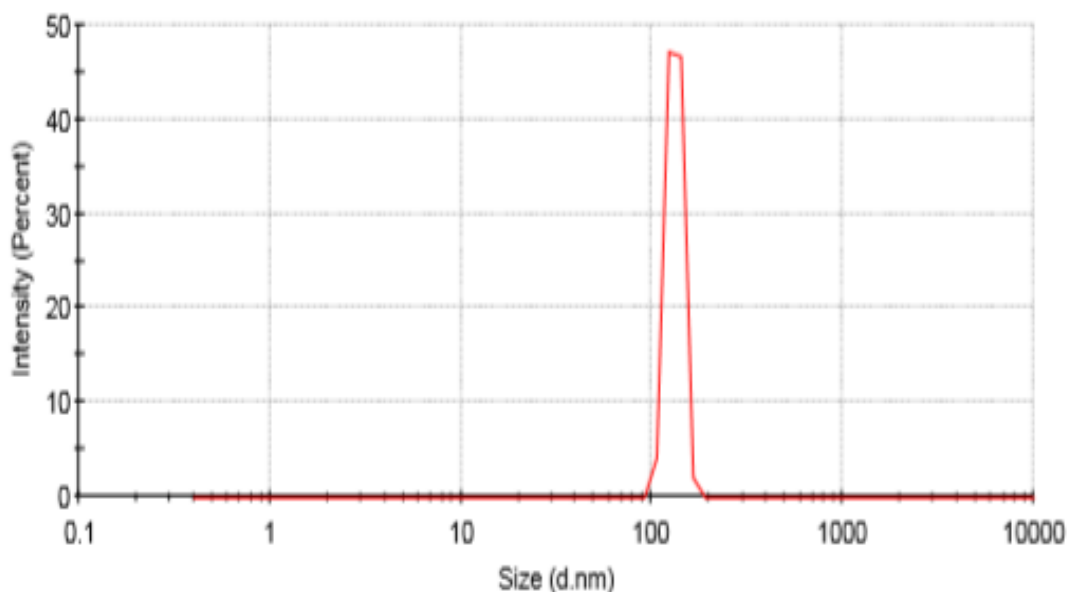
⁶ Morphology



شکل ۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی از غشای پلی اتر سولفون (الف) سطح غشا (ب) مقطع عرضی غشا

۲-۳ پراکندگی نور دینامیکی (DLS)

بر اساس نتایج حاصل از آنالیز DLS، اندازه متوسط قطرات گازوئیل در امولسیون خوراک (حاوی ۵۰۰ ppm گازوئیل در آب) در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، میانگین اندازه قطرات در حدود ۱۰۰ نانومتر قرار دارد. در این ابعاد، امولسیون از پایداری بالایی برخوردار بوده و برای استفاده در آزمایش های اولترافیلتراسیون (UF) بسیار مناسب است؛ به طوری که در طول دوره بررسی هیچ گونه جدایی فازی در آن مشاهده نشد [۳۴ و ۳۵].



شکل ۳: اندازه قطرات پساب نفتی سنتزی به دست آمده از آنالیز DLS

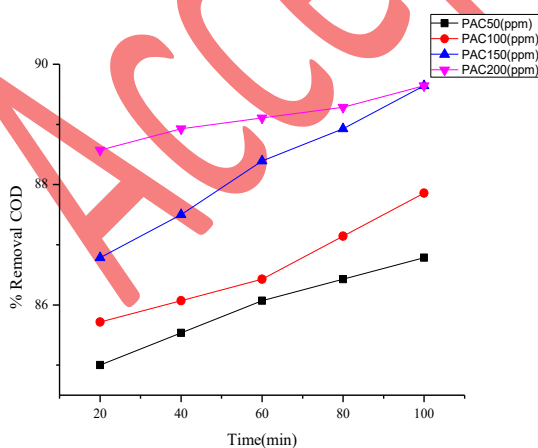
۳-۳ تأثیر غلظت پلی آلومینیوم کلراید (PAC) و کلرید آهن بر درصد حذف COD و شار تراوا غشا

در مرحله ترکیب فرآیند انعقاد با فیلتراسیون غشایی (شکل ۴ الف)، با استفاده از منعقدکننده و تشکیل لخته‌ها، کارایی فیلتراسیون با بازدهی بالاتر همراه شد و حذف COD افزایش یافت. در شرایط pH نزدیک به نقطه ایزوالکتریک (pH=6)، کاهش نیروی دافعه الکترواستاتیکی بین ذرات، باعث متراکم شدن لخته‌ها و تسهیل جداسازی آلاینده‌ها شد. افزودن PAC و $FeCl_3$ در دوزهای بالاتر موجب فعال شدن دو مکانیسم کلیدی خنثی‌سازی بار و جاروب‌سازی لخته‌ای می‌شود. یون‌های چندظرفیتی Al^{3+} و Fe^{3+} بار سطحی قطرات نفتی را کاهش داده و هیدروکسیدهای فلزی تشکیل شده، آلاینده‌ها را در لخته‌های حجیم و کم‌چگال به دام می‌اندازند. این لخته‌های بزرگ مانع از ورود آلاینده‌ها به منافذ غشا شده و سهم گرفتگی منفذی را کاهش می‌دهند، به طوری که شار تراوا نسبت به حالت بدون منعقدکننده به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

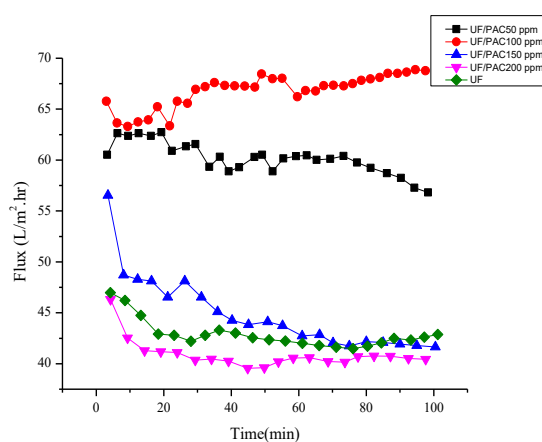
بر اساس شکل ۴ ب، افزایش غلظت PAC باعث کاهش نسبی شار می‌شود، اما مقدار شار همچنان بالاتر از UF بدون منعقدکننده است. این پدیده ناشی از تشکیل لخته‌های بزرگ‌تر و متخلخلی است که ورود قطرات نفت به منافذ را محدود کرده و گرفتگی برگشت‌ناپذیر را کاهش می‌دهد. با این حال، افزایش بیش از حد PAC می‌تواند موجب افزایش رسوبات و فشردگی لایه سطحی غشا شود که در نهایت افت شار را به دنبال دارد. بنابراین، انتخاب دوز بهینه برای جلوگیری از گرفتگی شدید و حفظ عملکرد

فیلتراسیون ضروری است [۳۶ و ۳۷]. اثر منعقدکننده‌ها سبب می‌شود که الگوی گرفتگی از حالت انسداد منفذی^۷ به حالت «تشکیل لایه کیک متخلخل» تغییر پیدا کند. لایه کیک ایجادشده در حضور PAC و $FeCl_3$ نفوذپذیرتر بوده و برخلاف رسوب‌های فشرده، مانع جدی در برابر عبور آب ایجاد نمی‌کند. این تغییر مکانیسم گرفتگی یکی از دلایل اصلی افزایش شار در دوزهای بهینه منعقدکننده است.

شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش غلظت کلرید آهن، حذف COD به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این افزایش ناشی از ناپایداری امولسیون و حذف مؤثر ذرات کلوئیدی است. یون‌های Fe^{3+} با سورفکتانت آنیونی SDS موجود در پساب واکنش داده و کمپلکس‌های نامحلول تشکیل می‌دهند که منجر به ته‌نشینی سریع قطرات روغن می‌شود. بنابراین، بخش عمده COD که در فاز کلوئیدی قرار دارد، توسط لخته‌ها حذف شده و راندمان بالای فرآیند انعقاد قابل توضیح است [۳۸ و ۳۹]. شکل ۴ تغییرات شار تراوای غشای پلی‌اتر سولفون را در حضور غلظت‌های مختلف کلرید آهن نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که با افزایش غلظت $FeCl_3$ از ۱۰ تا ۱۰۰ mg/L، شار تراوا به‌طور محسوسی افزایش یافته و پایداری بهتری در طول زمان از خود نشان می‌دهد. این افزایش ناشی از تشکیل لخته‌های درشت‌تر و جلوگیری از نفوذ مستقیم آلاینده‌ها به منافذ غشا است. با این حال، در دوزهای بسیار بالا، تمایل به تشکیل لایه‌های متراکم و تولید لجن اضافی افزایش می‌یابد که می‌تواند منجر به افزایش مقاومت فیلتراسیون و افت تدریجی شار شود. بنابراین، تعیین دوز بهینه کلرید آهن برای دستیابی به تعادل بین حذف مؤثر آلاینده‌ها و حفظ نفوذپذیری غشا ضروری است.

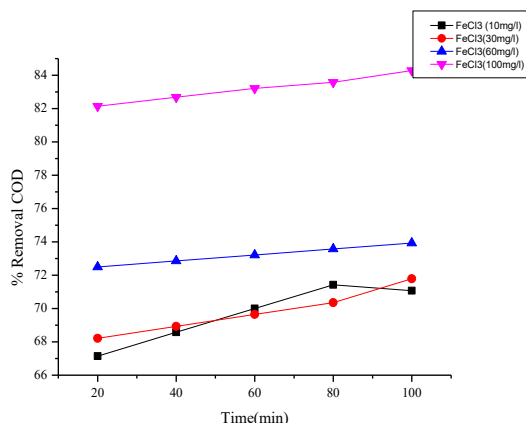


(الف)

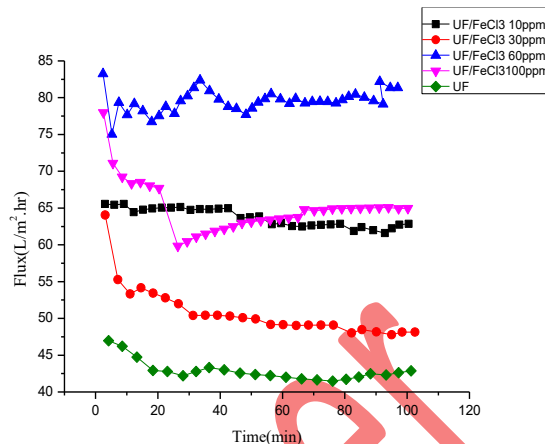


(ب)

⁷ Pore blocking



(ج)



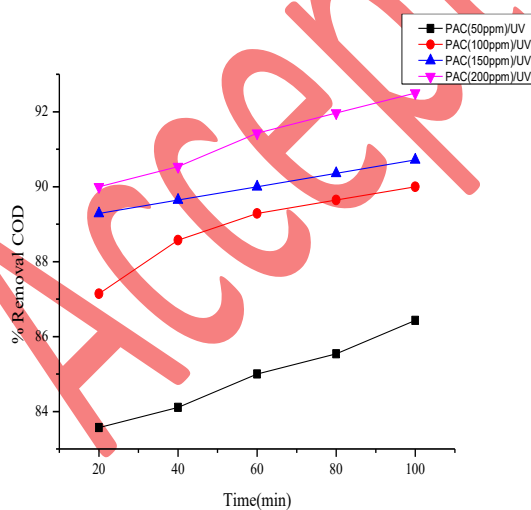
(د)

شکل ۴: (الف) تأثیر غلظت پلی آلومینیوم کلراید و کلرید آهن بر درصد حذف COD (الف و ج) و اثر افزایش غلظت پلی آلومینیوم کلراید و کلرید آهن بر شار تراوا غشای پلی اتر سولفون (ب و د)

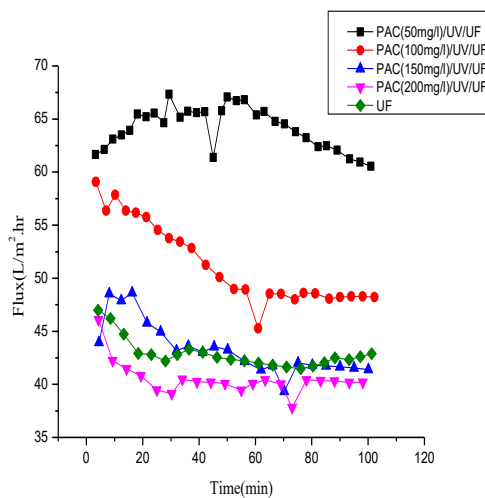
۳-۴ بررسی تأثیر ترکیب تابش فرابنفش با PAC و کلرید آهن بر حذف COD و شار تراوا غشا

شکل ۵ اثر ترکیب تابش فرابنفش با منعقدکننده‌های پلی آلومینیوم کلراید و کلرید آهن را بر راندمان حذف COD و شار تراوای غشای اولترافیلتراسیون نشان می‌دهد. شکل ۵الف تغییرات درصد حذف COD را در حضور PAC و تابش فرابنفش نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ترکیب PAC با UV منجر به افزایش قابل توجه راندمان حذف COD نسبت به استفاده از PAC به تنهایی می‌شود. تابش فرابنفش با ایجاد رادیکال‌های فعال و تجزیه جزئی ترکیبات آلی پیچیده، ساختار آلاینده‌ها را به ترکیبات ساده‌تر و قابل انعقادتر تبدیل می‌کند. این پدیده باعث بهبود عملکرد منعقدکننده و افزایش جذب آلاینده‌ها در لخته‌ها می‌شود. بیشترین راندمان حذف COD در pH برابر با ۷ مشاهده شده است که به شرایط بهینه بار سطحی ذرات و افزایش پایداری لخته‌های تشکیل شده نسبت داده می‌شود. تغییرات شار تراوای غشا را در فرآیند ترکیبی PAC و UV در شکل ۵ب نشان داده شده است. در مقایسه با حالت بدون تابش فرابنفش، استفاده از UV باعث افزایش شار اولیه و پایداری نسبی آن در طول زمان شده است که نشان‌دهنده کاهش گرفتگی منفذی و بهبود شرایط فیلتراسیون است. با این حال، افزایش بیش از حد غلظت PAC منجر به کاهش شار می‌شود که می‌تواند ناشی از تشکیل لخته‌های حجیم‌تر و افزایش تجمع آن‌ها روی سطح غشا و در نتیجه فشردگی لایه کیک باشد. این نتایج بیانگر وجود یک دوز بهینه PAC در حضور تابش فرابنفش برای دستیابی به بیشترین شار پایدار است.

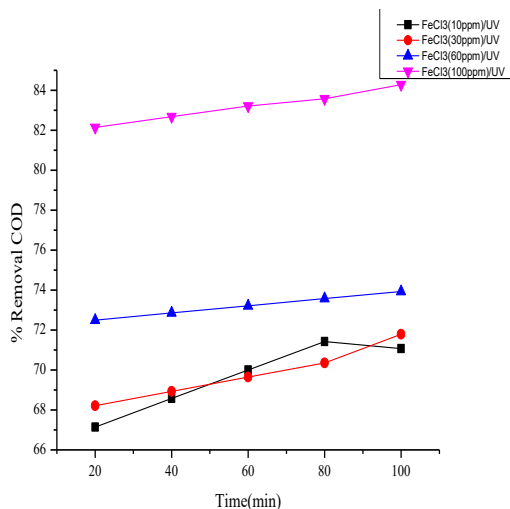
شکل ۵ج اثر ترکیب تابش فرابنفش با کلرید آهن بر درصد حذف COD را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که حضور UV باعث افزایش راندمان حذف COD در تمامی غلظت‌های FeCl_3 می‌شود. این افزایش به تجزیه جزئی ترکیبات آلی و بهبود واکنش یون‌های Fe^{3+} با آلاینده‌ها و سورفکتانت‌های موجود در پساب نسبت داده می‌شود. تابش فرابنفش همچنین می‌تواند با تغییر خواص سطحی لخته‌ها، تشکیل ساختارهای پایدارتر و مؤثرتر در حذف آلاینده‌ها را تسهیل کند. تغییرات شار تراوای غشا را در حضور FeCl_3 و تابش فرابنفش در شکل ۵د نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که فرآیند ترکیبی FeCl_3/UV منجر به افزایش شار تراوا و پایداری آن نسبت به فرآیند بدون UV می‌شود. این رفتار به کاهش غلظت مواد نفتی و ترکیبات آلی در محلول خوراک و جلوگیری از نفوذ مستقیم آلاینده‌ها به منافذ غشا نسبت داده می‌شود. با این حال، در غلظت‌های بالای کلرید آهن، کاهش نسبی شار مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از تولید لجن اضافی و افزایش فشردگی لایه سطحی غشا باشد. بنابراین، کنترل هم‌زمان شدت تابش UV و دوز منعقدکننده برای دستیابی به عملکرد بهینه غشا ضروری است [۴۰-۴۲].



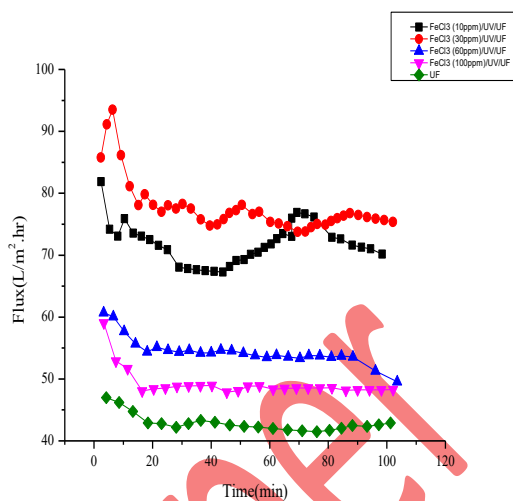
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۵: تأثیر غلظت پلی آلومینیوم کلراید و کلرید آهن در حضور اشعه فرابنفش اشعه فرابنفش بر درصد حذف COD (الف و ج) و اثر افزایش غلظت پلی آلومینیوم کلراید و کلرید آهن در حضور اشعه فرابنفش بر شار تراوا غشای پلی اتر سولفون (ب و د)

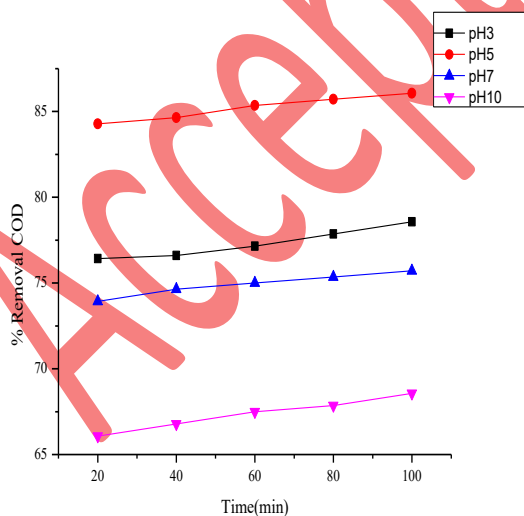
۳-۵ بررسی تأثیر pH در فرآیند ترکیب منعقدکننده پلی آلومینیوم کلرید با کلرید آهن (با نور مرئی و اشعه فرابنفش) بر تصفیه پساب سنتزی

آزمایش‌های متعددی با غلظت‌های مختلف کلرید آهن و پلی آلومینیوم کلرید (PAC) انجام شد. نتایج نشان داد که کلرید آهن در غلظت‌های ۳۰ تا ۶۰ میلی گرم بر لیتر کارایی حذف بالایی داشته، در حالی که PAC در غلظت ۱۵۰ میلی گرم بر لیتر با تولید لجن کمتر، عملکرد بهتری ارائه کرد. بر این اساس، غلظت‌های بهینه ۳۰ میلی گرم بر لیتر برای کلرید آهن و ۱۵۰ میلی گرم بر لیتر برای PAC برای مراحل بعدی انتخاب شدند. استفاده ترکیبی از دو منعقدکننده منجر به افزایش کارایی حذف COD نسبت به کاربرد جداگانه هر یک از آنها شد. همانطور که قبلاً گفته شد pH محلول نقش تعیین کننده‌ای در فرآیند انعقاد و لخته‌سازی دارد و بر حلالیت آلاینده‌ها و تعادل هیدرولیز گونه‌های فلزی تأثیر می‌گذارد [۴۳]. مقادیر پایین pH تولید رادیکال‌های هیدروکسیل را محدود کرده و مقادیر بالای pH جذب آلاینده‌ها را کاهش می‌دهد. بررسی‌ها نشان داد که ترکیب دو منعقدکننده در شرایط pH برابر با ۵، چه در حضور اشعه فرابنفش و چه در غیاب آن، بیشترین کارایی در حذف COD را فراهم می‌کند. همچنین pH یکی از عوامل کلیدی در فرآیندهای انعقاد و لخته‌سازی است، زیرا تعادل هیدرولیز گونه‌های مختلف موجود در محلول را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزودن نمک‌های فلزی و افزایش مقدار منعقدکننده معمولاً منجر به کاهش pH محلول می‌شود. در این پژوهش، حذف

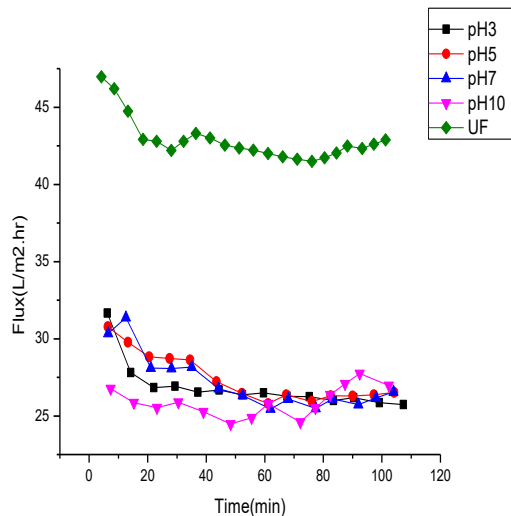
آلاینده‌های نفتی در محدوده pH ۳ تا ۱۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که pH به‌طور مستقیم بر کارایی حذف و حلالیت مواد شیمیایی، به‌ویژه تولید هیدروکسیدهای فلزی، تأثیر دارد. در نتیجه، مواد آلی موجود در پساب از طریق خنثی‌سازی بار و مکانیسم جذب حذف می‌شوند. همان‌طور که در شکل‌های ۶ (الف) و (ج) نشان داده شده است، بیشترین میزان حذف COD در pH برابر با ۵ مشاهده شد؛ تغییر pH به مقادیر کمتر یا بیشتر از مقدار بهینه، کارایی حذف COD را کاهش داد.

در مرحله ترکیب فرآیند انعقادی با فیلتراسیون غشایی، همان‌طور که در شکل‌های ۶ (ب) و (د) نشان داده شده است، تشکیل لخته با استفاده از منعقدکننده منجر به بهبود کارایی فیلتراسیون و افزایش حذف COD می‌شود. در pH نزدیک به نقطه ایزوالکتریک (pH = 6)، کاهش نیروی دافعه الکترواستاتیکی بین ذرات موجب متراکم شدن لخته‌ها و تسهیل جداسازی آلاینده‌ها می‌شود [۴۴]. تابش اشعه فرابنفش نیز موجب تغییر خواص و ساختار سطحی ذرات شده و باعث بزرگ شدن و پایدار شدن آن‌ها می‌گردد، به‌طوری که حذف آن‌ها از طریق فرآیندهای غشایی آسان‌تر می‌شود. در این مطالعه، فرآیند اولترافیلتراسیون با غشای پلی‌اتر سولفون مورد استفاده قرار گرفت که منجر به افزایش بازده حذف COD شد.

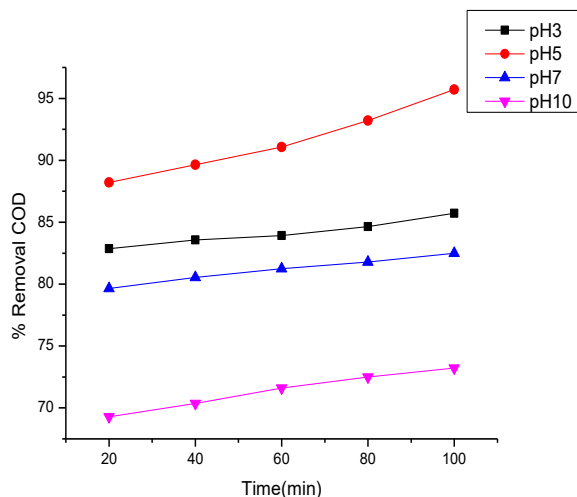
پلی‌آلومینیوم کلرید (PAC) و کلرید آهن به عنوان منعقدکننده عمل می‌کنند و می‌توانند با ایجاد لخته و جذب سطحی، انتقال و تجمع آلاینده‌ها را در محلول تسهیل کنند. ترکیب این دو ماده معمولاً کارایی حذف COD را نسبت به کاربرد جداگانه هر یک افزایش می‌دهد، زیرا ساختار لخته‌های تشکیل شده می‌تواند ذرات آلاینده را بهتر جذب کرده و تسهیل حذف آن‌ها از محلول را فراهم کند. این اثر هم‌افزایی در بهبود بازده حذف ترکیبات آلی در مطالعات پیشین گزارش شده است [۴۵].



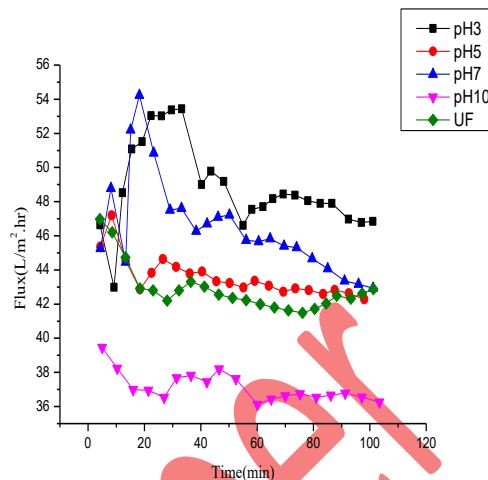
(الف)



(ب)



(ج)

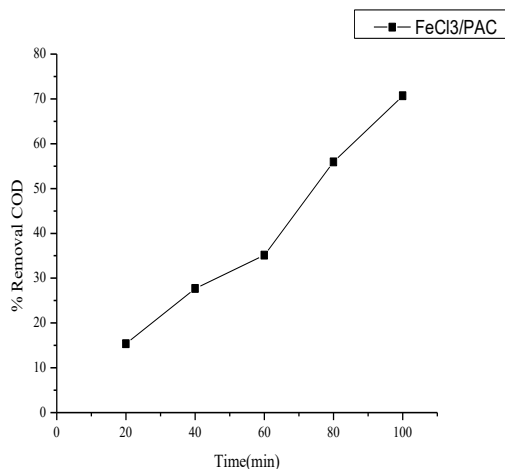


(د)

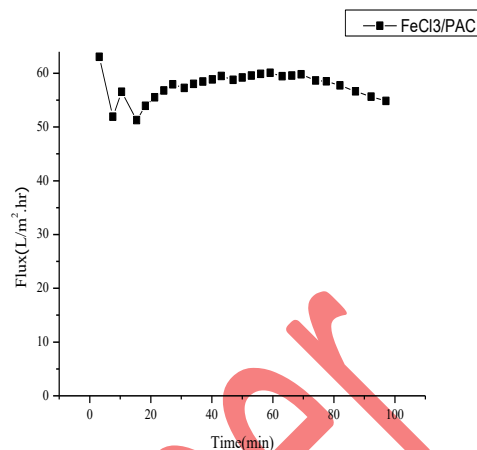
شکل ۶: تأثیر pH بر کارایی ترکیب پلی آلومینیوم کلرید و کلرید آهن، در غیاب اشعه فرابنفش (الف و ب) و با اشعه فرابنفش (ج و د)، در حذف COD و شار تراوا غشای پلی اتر سولفون

۳-۶ بررسی تأثیر pH در فرآیند ترکیب منعقدکننده پلی آلومینیوم کلرید با کلرید آهن (با نور مرئی و اشعه فرابنفش) بر تصفیه پساب نفتی

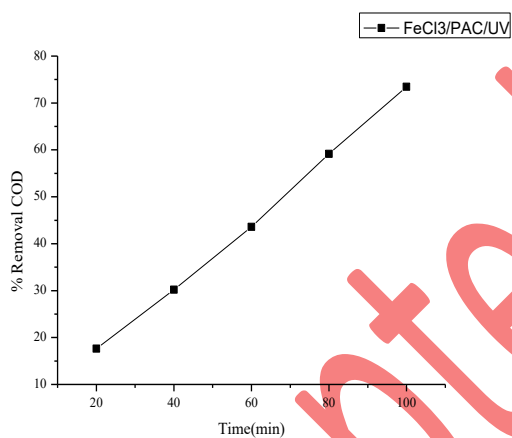
تأثیر pH بر عملکرد فرآیند ترکیبی انعقاد با منعقدکننده‌های پلی آلومینیوم کلرید (PAC) و کلرید آهن در تصفیه پساب نفتی واقعی بررسی شد. همان‌طور که در شکل ۷ (الف و ب) نشان داده شده، ترکیب این منعقدکننده‌ها در pH بهینه ۵ در غیاب اشعه فرابنفش، حذف تقاضای شیمیایی اکسیژن (COD) و شار تراوا غشای پلی اتر سولفون را بهبود بخشید. تابش اشعه فرابنفش (شکل ۷، ج و د) می‌تواند به واکنش‌های اکسیداسیون جزئی آلاینده‌ها کمک کند و با ایجاد شرایط مناسب برای تجزیه برخی ترکیبات، کارایی فرآیند انعقاد را افزایش دهد، به طوری که نرخ حذف COD تا ۹۶٪ افزایش یافت [۴۶]. این فرآیند در pH ۵ برای پساب نفتی عملکردی مشابه با پساب سنتزی نشان داده است. با این حال، افزایش حجم لخته‌ها در فرآیند ترکیبی منجر به افت فشار شد که می‌تواند به گرفتگی غشا مرتبط باشد.



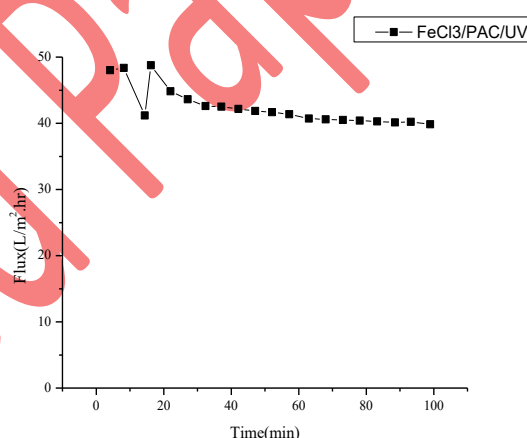
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

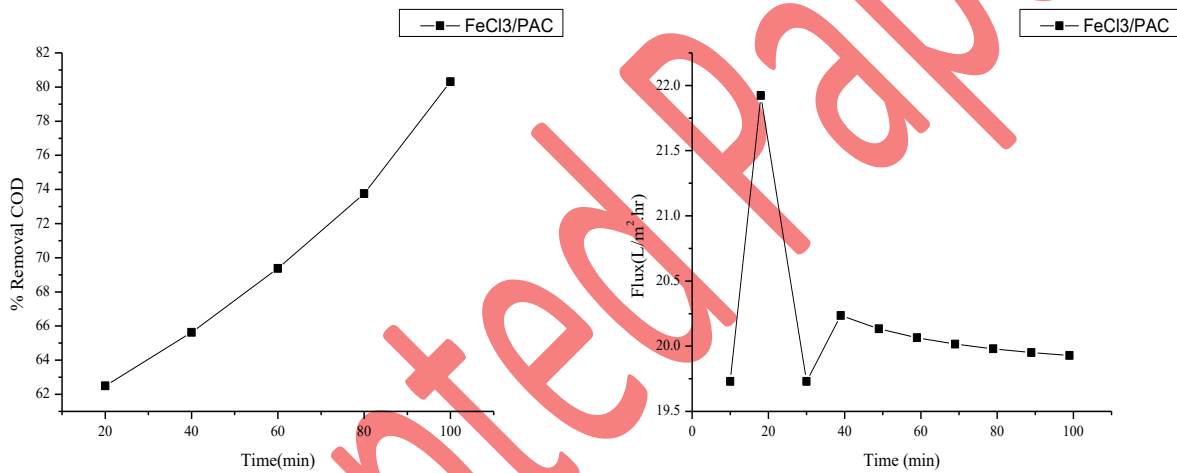
شکل ۷: تأثیر ترکیب بهینه پلی آلومینیوم کلرید و کلرید آهن، در غیاب اشعه فرابنفش (الف و ب) و با اشعه فرابنفش (ج و د)، بر درصد حذف COD و شار تراوا غشای پلی اتر سولفون در تصفیه پساب نفتی واقعی در pH بهینه

۳-۷ بررسی تأثیر نمک در فرآیند ترکیب منعقدکننده پلی آلومینیوم کلرید با کلرید آهن (با نور مرئی و اشعه فرابنفش)

بر تصفیه پساب شور

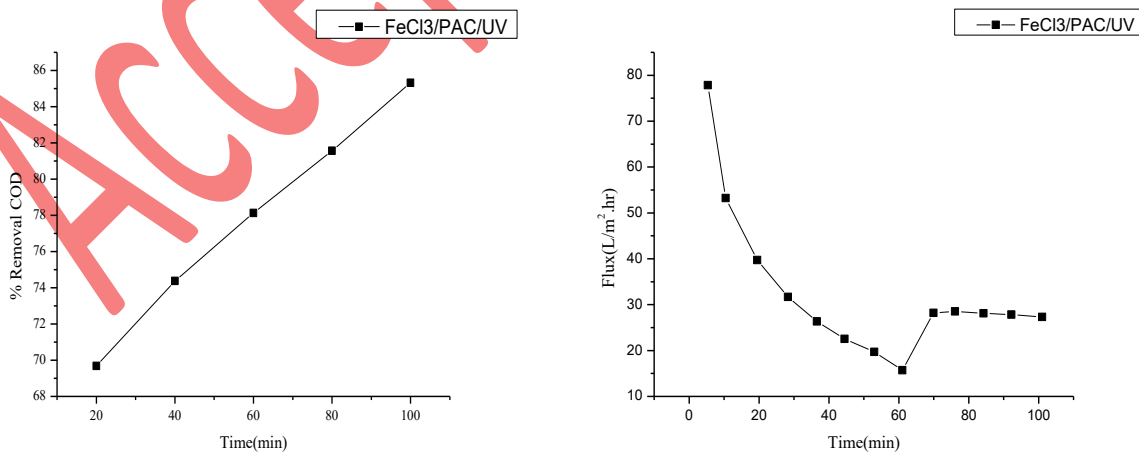
در شکل ۸ (الف) و (ج) تأثیر غلت نمک بر میزان حذف COD را نشان می دهد و شکل ۸ تأثیر نمک در تصفیه را نشان می دهد حضور نمک در پساب نفتی، باعث کاهش بار منفی سطح غشا بوسیله خنثی کردن قطره های نفت در پساب شده و درصد پس دهی را افزایش می دهد (ج) (د) نمک ها در پساب به آنیون و کاتیون تجزیه می شوند. با افزایش غلظت نمک در پساب (افزایش قدرت

یونی)، تعداد آنیون‌ها و کاتیون‌ها بیشتر می‌شود. قطره‌های امولسیون نفت از سوئی به وسیله کاتیون‌ها خنثی شده و از سوی دیگر دافع‌های بین آنیون‌ها و این قطره‌ها بوجود می‌آید که از نشستن و رسوب آن روی سطح غشا جلوگیری می‌کند که در نهایت، با افزایش غلظت کل نمک‌ها باعث افزایش درصد پس‌دهی می‌شود. با افزودن نمک به امولسیون، میانگین سایز قطره‌های روغن در امولسیون افزایش می‌یابد. به این سبب افزایش نمک به امولسیون تأثیر مخالف را بر شار تراوا دارد. افزایش میانگین سایز قطره‌های روغن در امولسیون موجب افزایش شار تراوا می‌شود در صورتی که بلورهای نمک خود موجب افزایش گرفتگی غشا و رسوب بر روی سطح غشا می‌گردند [۴۷].



(الف)

(ب)



(د)

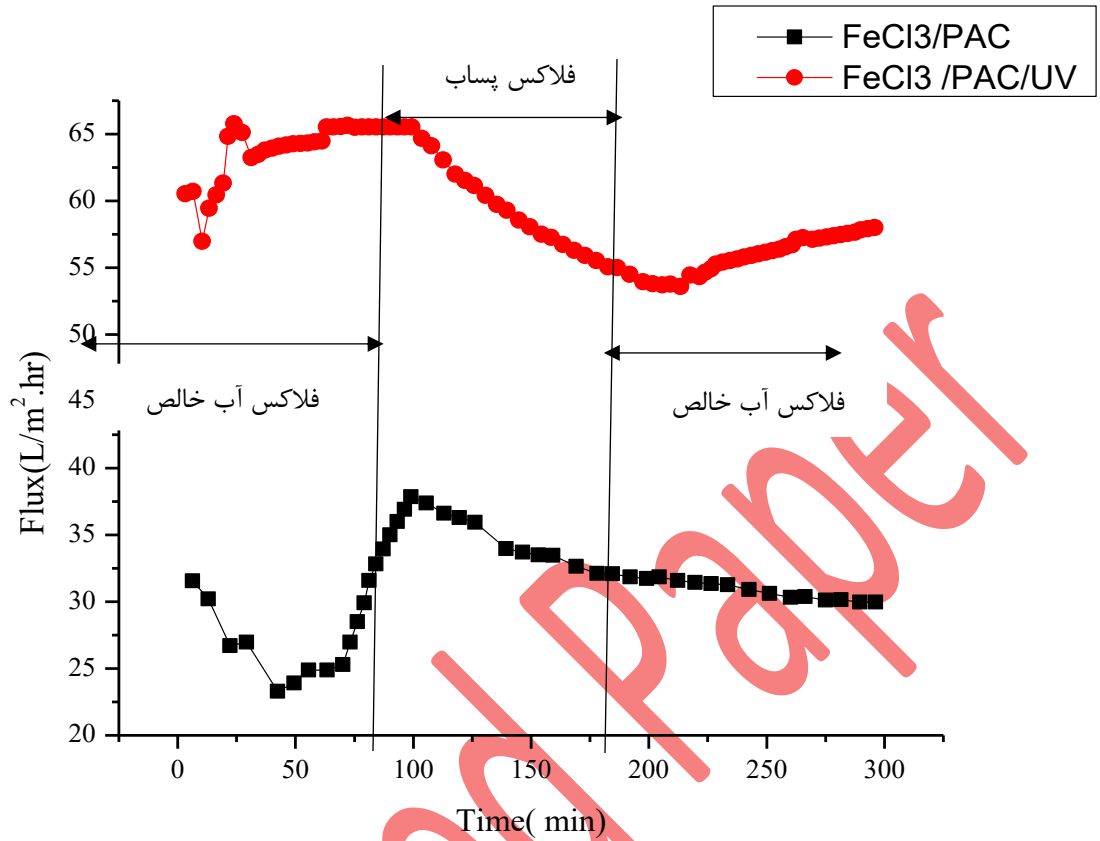
(ج)

شکل ۸: اثر ترکیب کلرید آهن و پلی‌آلومینیوم کلراید/بدون (UV) در pH بهینه بر (الف و ج) حذف COD و (ب و د) شار تراوا غشای PES با پساب شور.

۳-۸ بررسی فلاکس آب قبل و بعد از فیلتراسیون پساب

شکل ۹ فلاکس عبوری غشای پلی‌اترسولفون (PES) را در فرآیند ترکیبی انعقاد-اولترافیلتراسیون برای تصفیه امولسیون گازوئیل/آب در سه مرحله فیلتراسیون (با و بدون اشعه فرابنفش) نشان می‌دهد. کاهش شدید فلاکس پس از عبور پساب به انسداد منافذ غشا توسط آلاینده‌های نفتی نسبت داده می‌شود، که نشان‌دهنده گرفتگی برگشت‌ناپذیر است. همچنین، کاهش تدریجی فلاکس به دلیل تشکیل لایه کیک یا ژل مانده روی سطح غشا رخ می‌دهد، که عمدتاً برگشت‌پذیر است. تابش اشعه فرابنفش (UV) می‌تواند با تجزیه جزئی آلاینده‌ها و تغییر خواص سطحی لخته‌ها، تشکیل لایه کیک را کاهش داده و فلاکس عبوری غشا را بهبود بخشد، هرچند افت فشار ناشی از لخته‌های متراکم همچنان مشاهده شد.

جدول ۱ مقادیر مقاومت گرفتگی غشا را در شرایط نور مرئی و اشعه فرابنفش ارائه می‌دهد. گرفتگی برگشت‌پذیر (Rt) ناشی از لایه کیک یا ژل است که با شستشوی هیدرولیکی حذف می‌شود، اما بهره‌وری غشا را کاهش داده و هزینه‌های عملیاتی را افزایش می‌دهد. گرفتگی برگشت‌ناپذیر به دلیل انسداد منافذ توسط آلاینده‌ها با پیوندهای قوی رخ می‌دهد و نیازمند شستشوی شیمیایی است، که عملیات را پیچیده‌تر کرده و عمر غشا را کاهش می‌دهد. داده‌های جدول ۱ نشان می‌دهند که اشعه UV مقاومت گرفتگی برگشت‌پذیر را کاهش می‌دهد، اما تأثیر محدودی بر گرفتگی برگشت‌ناپذیر دارد [۴۸ و ۴۹].



شکل ۹: فلاکس عبوری غشا در دو حالت ترکیب منعقدکننده پلی آلومینیوم کلراید و کلرید آهن در تصفیه امولسیون گازوئیل/آب در سه مرحله از فیلتراسیون با و بدون اشعه فرابنفش

جدول ۱: مقادیر مقاومت گرفتگی غشا پس از آزمایشات گرفتگی تحت تابش نور مرئی و فرابنفش

غشا	R_r (مقاومت گرفتگی)	R_{ir} (مقاومت گرفتگی)	R_t (مقاومت کل)	FRR% (درصد بازایی فلاکس)
	(برگشت پذیر)	(برگشت پذیر)	(گرفتگی)	(بازیابی فلاکس)
FeCl ₃ /PAC	۰/۰۴۹	۰/۱۵۸	۰/۲۰۷	%۸۴/۱۲۱
FeCl ₃ /PAC/UV	۰/۰۲۱	۰/۱۷۶	۰/۱۷۸۱	%۸۲/۳۱۳

۹-۳ مقایسه با مطالعات پیشین

برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در این پژوهش، نتایج به دست آمده در مقایسه با مطالعات مشابه در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده در این پژوهش با مطالعات مشابه نشان می‌دهد که راندمان حذف COD به شدت تحت تأثیر نوع خوراک، نوع پساب و فرآیند مورد استفاده قرار می‌گیرد. به طور مثال، در فاضلاب‌های روغنی، استفاده از فرآیندهای انعقاد-میکروفیلتراسیون یا انعقاد-نانوفیلتراسیون با انواع مختلف منعقدکننده، راندمان‌های متفاوتی بین ۸۶ تا ۹۹ درصد به دست آمده است. در این مطالعه، با انتخاب مناسب نوع فرآیند (انعقاد-اولترافیلتراسیون) و ترکیب منعقدکننده پلی‌آلومینیوم کلرید و کلرید آهن، راندمان حذف COD به مقدار مطلوب ۹۶ درصد رسید. این نتایج نشان می‌دهد که ترکیب بهینه فرآیند و نوع منعقدکننده، نقش تعیین‌کننده‌ای در دستیابی به عملکرد بالای تصفیه دارد و روش پیشنهادی این پژوهش، ضمن کارایی بالا، با توجه به شرایط عملیاتی، گزینه‌ای موثر و قابل رقابت با مطالعات پیشین محسوب می‌شود.

فرآیند	نوع پساب	منعقدکننده	pH	راندمان حذف COD (%)	مرجع
انعقاد-میکروفیلتراسون	پساب روغنی	پلی‌آلومینیوم کلرید	۷/۲	۹۵/۲	۵۰
انعقاد-میکروفیلتراسون	پساب روغنی	سولفات آلومینیوم + پلی‌آلومینیوم کلرید	۶	۹۲/۹	۵۱
انعقاد-میکروفیلتراسون	پساب روغنی	کلرید آلومینیوم + پلی کلرید آلومینیوم	۶	۹۳/۱	۵۱
انعقاد-میکروفیلتراسون	پساب نفتی سنتزی	سولفات آلومینیوم	۷/۲	۹۷/۳۱	۵۲
انعقاد-نانوفیلتراسون	پساب کارخانجات روغن نخل	الکتروآهن	۳	۸۶/۲۷	۵۳
انعقاد-اولترافیلتراسیون	شیرابه	کلرید آهن	۶	۶۲	۵۴
انعقاد-نانوفیلتراسون+اسمز معکوس	فاضلاب صنعت نیشکر	سولفات آلومینیوم	۶/۸	۹۹/۲	۵۵
انعقاد-نانوفیلتراسون+اسمز معکوس	فاضلاب صنعت نیشکر	بذر مورینگا	۶/۸	۹۸/۸	۵۵
اکسیداسیون بیولوژیکی	فاضلاب روغن زیتون	-	۸-۹ ۲/۲	۹۰	۵۶

۵۶	۹۴	۸-۹ ۲/۲	سولفات آهن	فاضلاب روغن زیتون	انعقاد-اکسیداسیون
۵۷	۷۵/۷۱	-	الکتروود آهن	فاضلاب پالایشگاه نفت	اکسیداسیون+انعقاد
۹	۸۴	۷/۹۵	-	فاضلاب روغنی	میکروفیلتراسیون+ نانوفیلتراسون
در این مطالعه	۹۶	۵	پلی آلومینیوم کلرید + کلرید آهن	پساب نفتی سنتزی	انعقاد - اولترافیلتراسیون

۴ نتیجه گیری

این پژوهش به بررسی تصفیه پساب‌های نفتی (سنتزی و واقعی) با استفاده از فرآیند ترکیبی انعقاد-اولترافیلتراسیون با غشای پلی اترسولفون (PES) پرداخت. مورفولوژی غشا با آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تأیید شد و نشان‌دهنده ساختار متخلخل مناسب برای فیلتراسیون بود. منعقدکننده‌های کلرید آهن ($FeCl_3$) در غلظت‌های ۱۰، ۳۰، ۶۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و پلی‌آلومینیوم کلرید (PAC) در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که غلظت‌های بهینه ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر برای $FeCl_3$ و ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر برای PAC، بالاترین کارایی را در حذف تقاضای شیمیایی اکسیژن (COD) فراهم کردند. فرآیند ترکیبی این منعقدکننده‌ها در pH ۵، چه در حضور نور مرئی و چه با تابش اشعه فرابنفش (UV)، عملکرد بهتری نسبت به استفاده جداگانه آن‌ها داشت. تابش UV می‌تواند با تجزیه جزئی آلاینده‌ها و تغییر خواص سطحی لخته‌ها، کارایی فرآیند ترکیبی را بهبود داده و شار تراوا غشا را افزایش دهد. این فرآیند همچنین گرفتگی غشا را کاهش داد، هرچند افت فشار ناشی از لخته‌های متراکم همچنان چالش‌ساز بود. نتایج حاکی از آن است که فرآیند ترکیبی انعقاد-اولترافیلتراسیون با استفاده از $FeCl_3$ و PAC در غلظت‌های کم و pH بهینه، روشی مؤثر، اقتصادی و قابل اجرا برای تصفیه پساب‌های نفتی است.

مراجع

1. Wang, Xue, Wanli Cheng, Dong Wang, Xiaohui Ni, and Guangping Han. "Electrospun polyvinylidene fluoride-based fibrous nanocomposite membranes reinforced by cellulose nanocrystals for efficient separation of water-in-oil emulsions." *Journal of Membrane Science* 575 (2019): 71-79.

2. Yao, Xinyu, Xianbo Hou, and Rubing Zhang. "Flexible and mechanically robust polyimide foam membranes with adjustable structure for separation and recovery of oil-water emulsions and heavy oils." *Polymer* 250 (2022): 124889.
3. Tian, Ying, Jingjing Zhou, Changqing He, Lin He, Xingang Li, and Hong Sui. "The formation, stabilization and separation of oil–water emulsions: a review." *Processes* 10, no. 4 (2022): 738.
4. Neff, J. M. (2002). *Bioaccumulation in marine organisms: effect of contaminants from oil well produced water*. Elsevier.
5. Han, M., Zhang, J., Chu, W., Chen, J., & Zhou, G. (2019). Research progress and prospects of marine oily wastewater treatment: a review. *Water*, 11(12), 2517.
6. Adetunji, A. I., & Olaniran, A. O. (2021). Treatment of industrial oily wastewater by advanced technologies: a review. *Applied Water Science*, 11(6), 98.
7. Wang, B., Shui, Y., Ren, H., & He, M. (2017). Research of combined adsorption-coagulation process in treating petroleum refinery effluent. *Environmental Technology*, 38(4), 456-466.
8. Moremada, P., & Kalpage, S. (2022, November). Advances in Coagulation Technique for COD Removal of Petroleum Wastewater—A Review. In *International Conference on Sustainable Built Environment* (pp. 733-747). Singapore: Springer Nature Singapore.
9. Dizayee, K. K. H., & Judd, S. J. (2022). A brief review of the status of low-pressure membrane technology implementation for petroleum industry effluent treatment. *Membranes*, 12(4), 391.
10. Haq, H. U., Talib, A., Rukhsar, A., Syeda, S. E. Z., Khan, M. J., & Arain, M. B. (2024). Membrane technology for remediation and degradation of petroleum pollutants. In *Nanotechnology to Monitor, Remedy, and Prevent Pollution* (pp. 509-525). Elsevier.
11. Martini, S., Ang, H. M., & Znad, H. (2017). Integrated ultrafiltration membrane unit for efficient petroleum refinery effluent treatment. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 45(2), 1600342.
12. Ullah, A., Tanudjaja, H. J., Ouda, M., Hasan, S. W., & Chew, J. W. (2021). Membrane fouling mitigation techniques for oily wastewater: A short review. *Journal of Water Process Engineering*, 43, 102293.
13. Ullah, A., Tanudjaja, H. J., Ouda, M., Hasan, S. W., & Chew, J. W. (2021). Membrane fouling mitigation techniques for oily wastewater: A short review. *Journal of Water Process Engineering*, 43, 102293.
14. Almojjly, A., Johnson, D., Oatley-Radcliffe, D. L., & Hilal, N. (2018). Removal of oil from oil-water emulsion by hybrid coagulation/sand filter as pre-treatment. *Journal of water process*

engineering, 26, 17-27.

15. Tabatabai, S. A. A., Gaulinger, S. I., Kennedy, M. D., Amy, G. L., & Schippers, J. C. (2009). Optimization of inline coagulation in integrated membrane systems: A study of FeCl₃. *Desalination and Water Treatment*, 10(1-3), 121-127.
16. Rasouli, Y., Abbasi, M., & Hashemifard, S. A. (2017). Investigation of in-line coagulation-MF hybrid process for oily wastewater treatment by using novel ceramic membranes. *Journal of Cleaner Production*, 161, 545-559.
17. El Batouti, M., Alharby, N. F., & Elewa, M. M. (2021). Review of new approaches for fouling mitigation in membrane separation processes in water treatment applications. *Separations*, 9(1), 1.
18. Esteki, R., Ehrampoush, M. H., Nasab, H., & Ebrahimi, A. A. (2024). Investigating the improvement of the quality of industrial effluents for reuse with added processes: coagulation, flocculation, multi-layer filter and UV. *Scientific reports*, 14(1), 3971.
19. Konieczny, K., Szałkol, D., Płonka, J., Rajca, M., & Bodzek, M. (2009). Coagulation—ultrafiltration system for river water treatment. *Desalination*, 240(1-3), 151-159.
20. Meyn, T., Altmann, J., & Leiknes, T. (2012). In-line coagulation prior to ceramic microfiltration for surface water treatment—minimisation of flocculation pre-treatment. *Desalination and Water Treatment*, 42(1-3), 163-176.
21. Zheng, X., Plume, S., Ernst, M., Croué, J. P., & Jekel, M. (2012). In-line coagulation prior to UF of treated domestic wastewater—foulants removal, fouling control and phosphorus removal. *Journal of Membrane Science*, 403, 129-139.
22. Rasouli, Y., Abbasi, M., & Hashemifard, S. A. (2019). A new combination of microfiltration, powdered activated carbon and coagulation for treatment of oily wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(10), 5595-5610.
23. Zouboulis, A. I., & Tzoupanos, N. D. (2009). Polyaluminium silicate chloride—A systematic study for the preparation and application of an efficient coagulant for water or wastewater treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 162(2-3), 1379-1389.
24. Justina, M. D., Muniz, B. R. B., Bröring, M. M., Costa, V. J., & Skoronski, E. (2018). Using vegetable tannin and polyaluminium chloride as coagulants for dairy wastewater treatment: A comparative study. *Journal of Water Process Engineering*, 25, 173-181.
25. Zhu, M., Huang, C., & Mao, Y. (2025). Silica-nanocoated membranes with enhanced stability and antifouling performance for oil-water emulsion separation. *Membranes*, 15(2), 41.

26. Tan, X., & Rodrigue, D. (2019). A review on porous polymeric membrane preparation. Part I: production techniques with polysulfone and poly (vinylidene fluoride). *Polymers*, 11(7), 1160.
27. Peydayesh, M., Bagheri, M., Mohammadi, T., & Bakhtiari, O. (2017). Fabrication optimization of polyethersulfone (PES)/polyvinylpyrrolidone (PVP) nanofiltration membranes using Box–Behnken response surface method. *RSC advances*, 7(40), 24995-25008.
28. Jahanshahi, Mohsen, Majid Peyravi, Nader Shafaei, and Hatf Mirani. "Analysis of nanoporous membrane fouling relying on experimental observation and theoretical model for landfill leachate treatment." *Water Science and Technology* 73, no. 1 (2016): 1-12.
29. Chang, X., Lin, T., Mo, J., Xu, H., Tao, H., & Liu, W. (2022). Coagulation combined with ultraviolet irradiation activated sodium percarbonate as pretreatment prior to ultrafiltration: Analysis of free radical oxidation mechanism and membrane fouling control. *Chemosphere*, 287, 132049.
30. Esteki, R., Ehrampoush, M. H., Nasab, H., & Ebrahimi, A. A. (2024). Investigating the improvement of the quality of industrial effluents for reuse with added processes: coagulation, flocculation, multi-layer filter and UV. *Scientific reports*, 14(1), 3971.
31. Kusworo, T. D., & Utomo, D. P. (2017). Performance evaluation of double stage process using nano hybrid PES/SiO₂-PES membrane and PES/ZnO-PES membranes for oily waste water treatment to clean water. *Journal of environmental chemical engineering*, 5(6), 6077-6086.
32. MacKeown, H., Benedetti, B., Scapuzzi, C., Di Carro, M., & Magi, E. (2024). A review on polyethersulfone membranes in polar organic chemical integrative samplers: preparation, characterization and innovation. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 54(6), 1758-1774.
33. Zulkefli, N. F., Alias, N. H., Jamaluddin, N. S., Abdullah, N., Abdul Manaf, S. F., Othman, N. H., ... & Kusworo, T. D. (2021). Recent mitigation strategies on membrane fouling for oily wastewater treatment. *Membranes*, 12(1), 26.
34. Nandhini, M., & Thanigaivel, S. (2023, November). Morphological characterisation of combined castor and gingelly oil nanoemulsions using DLS, SEM and FTIR for in vitro toxicological studies. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2587, No. 1, p. 140027). AIP Publishing LLC.
35. Koreh, P., Lashkarbolooki, M., Peyravi, M., & Jahanshahi, M. (2022). Interfacial performance of cationic, anionic and non-ionic surfactants; effect of different characteristics of crude oil. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 218, 110960.
36. Felder, A., Epsztein, R., Villensky, N., & Gitis, V. (2011). Optimization of coagulation step in

membrane treatment of municipal secondary effluents. *Desalination and Water Treatment*, 35(1-3), 62-67.

37. Ullah, A., Tanudjaja, H. J., Ouda, M., Hasan, S. W., & Chew, J. W. (2021). Membrane fouling mitigation techniques for oily wastewater: A short review. *Journal of Water Process Engineering*, 43, 102293.

38. Sharghi, E. A., & Davarpanah, L. (2022). Optimization of chemical coagulation–flocculation process of detergent manufacturing plant wastewater treatment for full scale applications: a case study. *Desalination and Water Treatment*, 262, 38-53.

39. Ma, X. J., & Xia, H. L. (2009). Treatment of water-based printing ink wastewater by Fenton process combined with coagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 162(1), 386-390.

40. Zulkefli, N. F., Alias, N. H., Jamaluddin, N. S., Abdullah, N., Abdul Manaf, S. F., Othman, N. H., ... & Kusworo, T. D. (2021). Recent mitigation strategies on membrane fouling for oily wastewater treatment. *Membranes*, 12(1), 26.

41. Liu, C., Yan, M., Guo, K., Gao, Y., Liu, F., & Gao, B. (2024). Ta-Fe in-situ coating PES membrane and its application in oily wastewater treatment: Insight into modification and anti-fouling mechanisms. *Separation and Purification Technology*, 346, 127506.

42. Balik, Ö. Y., & Aydin, S. (2016). Coagulation/flocculation optimization and sludge production for pre-treatment of paint industry wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 57(27), 12692-12699.

43. Yang, Z. L., Gao, B. Y., Yue, Q. Y., & Wang, Y. (2010). Effect of pH on the coagulation performance of Al-based coagulants and residual aluminum speciation during the treatment of humic acid–kaolin synthetic water. *Journal of Hazardous Materials*, 178(1-3), 596-603.

44. Badawi, A. K., Salama, R. S., & Mostafa, M. M. M. (2023). Natural-based coagulants/flocculants as sustainable market-valued products for industrial wastewater treatment: a review of recent developments. *RSC advances*, 13(28), 19335-19355.

45. Yan, M., Guo, K., Gao, Y., Yue, Q., & Gao, B. (2023). Insights into the control mechanism of different coagulation pretreatment on ultrafiltration membrane fouling for oily wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 327, 124907.

46. Zhao, F., & Zhou, Z. (2024). Coupling pretreatment of ultraviolet/ferrate (UV/Fe (vi)) for improving the ultrafiltration of natural surface water. *RSC advances*, 14(2), 1360-1366.

47. Hesampour, M. (2009). Treatment of oily wastewater by ultrafiltration: The effect of different operating and solution conditions. Lappeenranta University of Technology.

48. Bergamasco, R., Konradt-Moraes, L. C., Vieira, M. F., Fagundes-Klen, M. R., & Vieira, A.

- M. S. (2011). Performance of a coagulation–ultrafiltration hybrid process for water supply treatment. *Chemical Engineering Journal*, 166(2), 483-489.
49. Huang, W., Zhu, Y., Wang, L., Lv, W., Dong, B., & Zhou, W. (2021). Reversible and irreversible membrane fouling in hollow-fiber UF membranes filtering surface water: effects of ozone/powdered activated carbon treatment. *RSC advances*, 11(17), 10323-10335.
50. Cheng, X. N., & Gong, Y. W. (2018). Treatment of oily wastewater from cold-rolling mill through coagulation and integrated membrane processes. *Environmental Engineering Research*, 23(2), 159-163.
51. Rasouli, Y., Abbasi, M., & Hashemifard, S. A. (2019). A new combination of microfiltration, powdered activated carbon and coagulation for treatment of oily wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(10), 5595-5610.
52. Sheikhi, M., Arzani, M., Mahdavi, H. R., & Mohammadi, T. (2019). Kaolinitic clay-based ceramic microfiltration membrane for oily wastewater treatment: Assessment of coagulant addition. *Ceramics International*, 45(14), 17826-17836.
53. Ismail, S. A., Chua, S. F., Ang, W. L., Mahmoudi, E., Mohammad, A. W., & Wong, W. Y. (2024). Sequential peroxi-coagulation-nanofiltration treatment of anaerobically treated palm oil mill effluent (POME). *Journal of Water Process Engineering*, 66, 105935.
54. Elfilali, N., Elazhar, F., Dhiba, D., Elmidaoui, A., & Taky, M. (2022). Performances of various hybrids systems coagulation–ultrafiltration/nanofiltration-reverse osmosis in the treatment of stabilized landfill leachate. *Desalination and Water Treatment*, 257, 55-63.
55. Sawadogo, B., Moussa, A. W. N., Konaté, Y., Tiendrebeogo, C., Sossou, S., Sidibé, S. D. S., & Karambiri, H. (2024). Integrated coagulation-flocculation with nanofiltration and reverse osmosis membrane for treating sugar cane industry effluent. *Heliyon*, 10(23).
56. Ioannou-Ttofa, L., Michael-Kordatou, I., Fattas, S. C., Eusebio, A., Ribeiro, B., Rusan, M., ... & Fatta-Kassinou, D. (2017). Treatment efficiency and economic feasibility of biological oxidation, membrane filtration and separation processes, and advanced oxidation for the purification and valorization of olive mill wastewater. *Water Research*, 114, 1-13.
57. Zhang, B., Zhang, S., Wu, Y., Hong, X., Liang, Y., Wang, T., & Qiu, J. (2021). Enhanced separation performance of microfiltration carbon membranes for oily wastewater treatment by an air oxidation strategy. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 169, 108620.

Optimization of Oily Wastewater Treatment via Integrated Coagulation-Ultrafiltration Process Using Polyethersulfone Membranes

Khadijah Shahnazari pour¹, Majid Peyravi^{1,*}, Soodabeh Khalili², Mohsen Jahanshahi¹

¹Department of Chemical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Shariati Ave., Babol, Iran, Post Code:47148-71167

²Department of Applied Industries engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

Abstract:

In this study, the treatment of oily wastewater was investigated using a combined coagulation and polyethersulfone (PES) ultrafiltration membrane process. The PES membrane was fabricated via the phase inversion method, and its morphology was examined using scanning electron microscopy (SEM). In the coagulation-ultrafiltration process, ferric chloride (FeCl_3) and polyaluminum chloride (PAC) were applied as coagulants at different concentrations and at pH levels of 3, 5, 7, and 10. These conditions were tested both individually and in combination, in the presence and absence of ultraviolet (UV) irradiation, over a period of 30 minutes, to determine the optimal conditions for chemical oxygen demand (COD) removal. The results indicated that in the coagulation-ultrafiltration process, increasing the coagulant concentration and adjusting the pH significantly improved permeate flux and reduced COD levels. UV irradiation was found to enhance the process efficiency by partially decomposing organic compounds and influencing floc formation, thereby improving both permeate flux and COD removal performance. Overall, the integrated coagulation-PES membrane process, whether applied with or without UV irradiation, led to increased flux rates and enhanced COD removal efficiency. The COD removal efficiencies achieved were 86% for the coagulation process alone and 96% for the combined coagulation-ultrafiltration process.

Keywords: Oily wastewater treatment, coagulation, ultrafiltration, membrane, polyaluminum chloride, ferric chloride.