

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و دوم، شماره چهار، تیر ماه ۹۹

بررسی عملکرد غشا الیاف توخالی نانوساختار پلی اترسولفون در

تصفیه و تغلیظ آب پنیر

غلامرضا باکری^{۱*}

bakeri@nit.ac.ir

شبنم لطفی^۲

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۲/۲۶

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۸/۲۳

چکیده

زمینه و هدف: آب پنیر یک محصول جانبی صنایع لبنی در هنگام تولید پنیر است. به عنوان یک ماده خام، آب پنیر کاربردهای بسیاری در صنایع غذایی به دلیل خواص عملکردی و غذایی پروتئین‌ها و لاکتوز موجود در آن دارد. تکنولوژی غشایی، مخصوصاً اولترافیلتراسیون (UF)، در صنعت لبنیات برای تولید کنسانتره پروتئین آب پنیر استفاده می‌شود، زیرا این تکنولوژی امکان تغلیظ گزینشی پروتئین‌ها نسبت به باقی اجزای آب پنیر را فراهم می‌سازد. بر این پایه، هدف از این پژوهش تغلیظ و تصفیه آب پنیر با استفاده از غشاهای UF بوده است.

روش بررسی: سه غشا الیاف توخالی نانوساختار پلی اترسولفون با مشخصات و اندازه حفرات متفاوت آزمایش شدند و اثر پارامترهای عملیاتی دما (دمای 43°C)، فشار (سه فشار ۳ bar، ۲ bar و ۱ bar) و سرعت جریان عرضی خوراک بر شار جریان عبوری، پس زنی پروتئین و عبور لاکتوز بررسی و تحلیل شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داده با افزایش فشار، شار افزایش پیدا کرد ولی این افزایش در فشارهای پایین‌تر محسوس‌تر بوده است. علاوه بر این، با توجه به افزایش گرفتگی و کاهش بازبایی شار، فشارهای بالا مناسب تشخیص داده نشد. افزایش سرعت جریان عرضی خوراک با افزایش تلاطم و کاهش گرفتگی بر روی سطح غشا، باعث افزایش شار شد اگرچه تأثیر این پارامترها بر درصد پس زنی پروتئین و عبور لاکتوز ناچیز بود. در بهترین شرایط عملیاتی درصد بیشینه پس زنی پروتئین ۹۱/۰۱٪ اندازه‌گیری شد.

بحث و نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که فرآیند UF با مدول الیاف توخالی برای تغلیظ و تصفیه آب پنیر مناسب است.

کلمات کلیدی: آب پنیر، غشا الیاف توخالی، فرآیند اولترافیلتراسیون، غشا نانوساختار پلی اترسولفون، پروتئین

۱- دانشیار گروه ترموسینتیک و کاتالیست، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۲- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی - ترموسینتیک و کاتالیست، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

An Investigation on the Performance of Nanostructure Poly-Ether-Sulfone Hollow Fiber Membrane in Concentration and Purification of Whey

Gholamreza Bakeri ^{1*}

bakeri@nit.ac.ir

Shabnam Lotfi ²

Accepted: 2018.05.16

Received: 2014.11.14

Abstract

Background and Objective: Whey is a by-product of dairy industries along cheese production. As a raw material, whey has several applications in food industries and its valuable protein and lactose contents. Membrane technology, more specifically ultrafiltration (UF), is being used in dairy industry to produce whey protein concentrate (WPC) because this technology allows selective separation of whey proteins compared to the rest of its components. In this regard, the objective of this research was to investigate the effects of different operating parameter on whey protein concentration and purification process using ultrafiltration membranes.

Method: Three different nanostructure Poly-Eether-Sulfone (PES) hollow fiber membranes were tested and the effects of operating parameters, temperature (43 °C), three different pressures (1 bar, 2 bar, 3 bar) and feed flow rate on the permeate flow rate, protein rejection and lactose permeation were studied.

Findings: Results showed that pressure increase enhances the permeation flow rate which is more sensible at lower pressures. Moreover, high pressures have not been considered suitable considering higher fouling and lower flux recovery. Increasing feed flow rate resulted in higher turbulence on the surface of the membrane and reduces the membrane fouling and enhances the permeation flow rate even though these parameters (pressure and feed flow rate) did not have any significant effect on the protein rejection and lactose permeation. At the best operating conditions, maximum protein rejection was %91.01.

Discussion and Conclusion: considering the findings, it can be concluded that UF process using PES hollow fiber membrane is capable of performing desired separation and purification of whey.

Keywords: whey, hollow fiber membrane, ultrafiltration process, nanostructured Poly-Ether-Sulfone Membrane, Protein.

1- Associate Professor, Thermo-Kinetics and Catalyst Group, Faculty of Chemical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2 -M.Sc., Chemical Engineering, Thermo-Kinetics and Catalyst Group, Faculty of Chemical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

مقدمه

به علت گسترش روزافزون کارخانجات پنیروسازی در کشور و عدم استفاده از آب پنیرو، این فرآورده به محیط زیست تخلیه می شود که به علت بالابودن BOD و COD باعث آلودگی زیست محیطی می گردد. چنانچه در فاضلابها و چاهها ریخته شود، به علت نفوذناپذیر بودن، سبب پرشدن مکانهای یادشده می گردد و اگر به رودخانهها وارد شود، به دلیل دارابودن مواد آلی، اکسیژن محلول را کاهش داده و مرگ و میر آبزیان را به دنبال خواهد داشت. علاوه بر این، واردکردن آب پنیرو به محیط زیست افزون بر آلودگی شدید، باعث هدررفت هزاران تن پروتئین با ارزش بیولوژیکی بالا و لاکتوز و مقادیر قابل توجهی ویتامین و مواد معدنی می شود.

آب پنیرو یک محصول جانبی تهیه پنیرو است که از پنیرو دلمه شده جدا می شود و تقریباً حاوی نیمی از مواد جامد موجود در شیر کامل می باشد. این مواد جامد شامل لاکتوز، مواد معدنی (مثل کلسیم، منیزیم، فسفر و ...)، ویتامین ها، پروتئین و بخشی از چربی شیر است [۱]. در طی تولید یک پوند پنیرو تقریباً ۹ پوند آب پنیرو تولید می شود. امروزه تکنولوژیهای غشایی از جایگاه و کاربرد وسیعی در صنایع لبنی برخوردارند. شاید بهترین کاربرد غشاهای اولترافیلتراسیون در فرآیند آب پنیرو باشد. اولترافیلتراسیون در حقیقت یک فرآیند جداسازی غشایی با استفاده از نیروی فشار می باشد. این فرآیند می تواند جداسازی و تغلیظ موادی با وزن ملکولی بین ۱۰۰۰ تا ۱۰,۰۰۰,۰۰۰ دالتون را انجام دهد [۲]. با استفاده از فرآیند اولترافیلتراسیون می توان به تغلیظ پروتئینهای طبیعی آب پنیرو به منظور تولید پودر پروتئین آب پنیرو با مقادیر متفاوت دست یافت. فرآیندهای سنتی تصفیه آب پنیرو مثل تبخیر و خشک کردن به دست یافتن مواد ارزشمند آن کمکی نمی کند. از این روشها فقط در جهت کاهش حجم آب موجود در آب پنیرو و بالابردن کیفیت نگهداری استفاده می شود. از این رو تلاش برای بهبود نتایج حاصل از اولترافیلتراسیون با بررسی عوامل و شرایط عملیاتی مؤثر بر آن می تواند ارزشمند باشد.

فرآیندهای جداسازی غشایی مزایای قابل توجهی نسبت به رویکردهای رقیب خود برای تغلیظ یا جداسازی در صنایع زیست فناوری یا غذایی دارند، از جمله [۳]:

- نیازی به تغییر حالت یا فاز حلال نیست، به همین دلیل معمولاً به صرفه ترند.
- عملیات به نسبت در دماهای پایین تری صورت می گیرد، پس برای مواد حساس به حرارت مناسب بوده و باعث جلوگیری از کاهش تغییرات در طعم یا مشخصه های کیفی دیگر می شود و از طرفی تخریب و تغییر حالت آنزیمها را به طور قابل توجهی کاهش می دهد.
- درجات بالایی از جداسازی بدون استفاده از فرآیندهای پیچیده انتقال حرارت و تجهیزات تولید آن قابل دست-یابی است.
- جداسازی طیف گسترده ای از اندازهها را که در چندین درجه بزرگی قرار دارند، شامل می شود. از کوچکترین یونها تا گلبولهای چربی و با سلولهای باکتری.

یکی از مهم ترین محدودیت فرآیندهای غشایی عدم توانایی تغلیظ مواد حل شده تا درجه حصول ماده خشک است. درجه تغلیظ توسط فشارهای اسمزی بالا و ویسکوزیته بالا یا شارهای پایین انتقال جرم حاصل در غلظت های بالای ماده حل شده، محدود می شود [۲]. فرآیندهای جداسازی غشایی در بازه وسیعی از صنایع تخمیری، دارویی، الکترونیک، غذایی، نوشیدنی، شیمیایی و خودروسازی کاربرد دارند. توسعه مواد و فناوری و کاهش نسبی هزینه های تجهیزات فرآیندهای غشایی منجر به استفاده وسیع تر و مبتکرانه تر این فناوری در صنایع لبنی شده است.

عملکرد یک غشا با دو فاکتور اصلی تعیین می شود که عبارتند از شار جریان عبوری از غشا و پس دهی^۱ غشا. شار یا شدت تراوش پذیری عبارت است از شدت جریان (حجمی یا جرمی) که در واحد زمان از واحد سطح غشا عبور می نماید. در زمینه جداسازی آب پنیرو پس دهی مربوط به پروتئین و چربی که ذرات

میکروارگانیزم‌ها، همگی موجب انسداد شدید غشا می‌شوند. در تغلیظ شیر، استفاده از میکروفیلتراسیون لوله‌ای به عنوان یک پیش فیلتر، بازده اولترافیلتراسیون را به اندازه ۱۰۰٪ مقدار متوسط افزایش می‌دهد [۱۴]. قراردادن یک مرحله میکروفیلتراسیون قبل از UF آب پنیتر توسط بسیاری از محققان پیشنهاد شده است [۱۱، ۱۳، ۱۵].

در این پژوهش از غشا الیاف توخالی نانوساختار پلی‌اتر سولفون^۱ استفاده شده است. PES یکی از مهم‌ترین پلیمرهایی است که به طور گسترده‌ای در ساخت غشاها مورد استفاده قرار می‌گیرد. غشاهای PES پایداری اکسیداسیون، حرارتی و هیدرولیکی برجسته و همچنین خصوصیات مکانیکی خوبی نشان داده‌اند. از معایب این پلیمر آب گریز بودن آن ذکر شده که در فیلتراسیون غشایی مشکل مهمی می‌باشد، زیرا باعث نیاز به انرژی بالاتر، عمر مفید کوتاه‌تر و عملکرد جداسازی غیرقابل پیش‌بینی می‌شود [۱۶]. از این رو انجام اصلاحاتی برای برطرف کردن این مسأله بسیار مطلوب است. اعتقاد بر این است که برای فرآیندهای صنعتی، غشاهای الیاف توخالی مؤثرتر و ارزان‌تر از غشاهای صفحه تخت هستند، زیرا نسبت سطح به حجم غشاهای الیاف توخالی بزرگ‌تر است و به همین دلیل تعداد کم‌تری از تولیدکنندگان غشاهای صفحه تخت تولید می‌کنند. مدول الیاف توخالی کمترین فضای مرده را ارائه می‌دهد و می‌تواند با شستشوی معکوس مکرر تمیز شود، در نتیجه عمر غشا طولانی‌تری می‌شود و می‌تواند در یک کاربرد مشخص به شکلی طراحی شود که ابعادی مخصوص برای کمینه کردن گرفتگی غشا داشته باشد [۳].

هدف از این پژوهش تعیین پارامترهای عملیاتی موثر بر روی عملکرد غشا الیاف توخالی نانوساختار پلی‌اتر سولفون در تصفیه آب پنیتر است. به این منظور غشاهای تهیه شده در سه فشار ۳ bar، ۲ bar و ۱ bar، دمای ۴۳ °C و سرعت جریان‌های مختلف از نظر درصد پس‌زنی پروتئین، عبور لاکتوز و شار جریان عبوری مورد بررسی قرار گرفتند تا شرایط عملیاتی بهینه به دست آید.

درشت‌تری در بین اجزای دیگر دارند، می‌شود. پژوهشگران بسیاری به بررسی عوامل مختلف مؤثر بر عملکرد غشاهای اولترافیلتراسیون در تصفیه و تغلیظ آب پنیتر پرداخته‌اند [۸-۴]. برخی دیگر استفاده از فرآیندهای چندمرحله‌ای و ترکیب اولترافیلتراسیون با نانوفیلتراسیون، اسمز معکوس و یا کروماتوگرافی تبادل یونی را به منظور جداسازی پروتئین‌های آب پنیتر از یکدیگر و یا دستیابی به لاکتوز با خلوص بالا پیشنهاد داده‌اند [۹-۱۳]. Sarkar و همکارانش [۱۳] با استفاده از مدول اولترافیلتراسیون دیسک چرخان به بررسی اثر پارامترهای عملیاتی مختلف مانند pH محلول، فشار دو سمت غشا و چرخش غشا بر روی شار جریان عبوری از غشا و پس‌زنی غشا پرداختند. در این پژوهش از یک فرآیند دومرحله‌ای استفاده شد که علاوه بر جداسازی پروتئین‌های آب پنیتر از یکدیگر، لاکتوز در جریان عبوری از غشا با حفرات کوچک‌تر بازیابی شد (پروتئین پس زده شده و در بخش باقی مانده بازیابی می‌شود، لاکتوز که اندازه ذرات بسیار کوچک‌تری دارد، عبور کرده و در بخش جریان عبوری از غشا قرار می‌گیرد). این فرآیند با جلوگیری از ورود لاکتوز به محیط زیست و استفاده دوباره از آن نقش مهمی در کاهش آلودگی طبیعت دارد و باعث افزایش صرفه اقتصادی فرآیند می‌شود.

پژوهشی که توسط Rektor و همکارش [۵] انجام یافت، نشان داد که میکروفیلتراسیون با اندازه حفره $0.2 \mu\text{m}$ توانایی پس‌زنی چربی به میزان ۹۸٪ را دارد، زیرا طبق مطالعات علمی انجام گرفته اندازه گلبول‌های چربی بین $20-0.1 \mu\text{m}$ است. در بسیاری از حالات، هزینه استفاده از یک مرحله میکروفیلتراسیون به عنوان پیش تصفیه برای فرآیندهای اولترافیلتراسیون از لحاظ اقتصادی به صرفه نمی‌باشد. اما برخی از خوراک‌ها با توجه به ترکیبات و ماهیت آنها، غشاهای اولترافیلتراسیون را به شدت مسدود می‌کنند که در این صورت پیش تصفیه آنها با میکروفیلتراسیون، امری اجتناب‌ناپذیر است. به عنوان مثال، در فرآیند اولترافیلتراسیون شیر یا آب پنیتر، اجزایی مانند چربی، کازئین، پروتئین‌های منعقد شده و

روش بررسی

آب پنیر

آب پنیر استفاده شده به صورت سنتزی، روزانه دقایقی قبل از آزمایش تهیه شد. برای تهیه خوراک (آب پنیر)، ۶۰ گرم از پودر آب پنیر در ۹۴۰ گرم آب یونزدایی شده با هدایت الکتریکی ۲/۹ میکروزیمنس بر سانتی متر حل شده و خوراک با درصد وزنی ۰.۶٪ ماده جامد تهیه شد. مقادیر اولیه لاکتوز، پروتئین و خاکستر در آب پنیر سنتزی به ترتیب ۰.۷۹٪، ۰.۸٪ و $1 \pm 0.8\%$ بود. از آن جا که پودر آب پنیر چربی زدایی شده بود از محتوای چربی آب پنیر سنتزی صرف نظر شد.

مشخصات غشاها

غشای مورد استفاده برای انجام پژوهش، غشا الیاف توخالی نانوساختار پلی اترسولفون بوده که توسط دستگاه تارساز ساخته شده است. تخلخل، اندازه حفره و زاویه تماس آب با سطح خارجی غشاهای الیاف توخالی تهیه شده (اندازه گیری شده با دستگاه مدل G1, Krüss GmbH, Hamburg, Germany) در جدول ۱ نشان داده شده است. شعاع متوسط حفره‌های غشا با استفاده از شار آب خالص و با معادله Guerout-Elford-Ferry محاسبه شد [۱۷]. تخلخل غشاهای تهیه شده در محدوده ۰/۷۷-۰/۷۱ است. نفوذپذیری غشاهای متخلخل متأثر از اندازه حفره و ساختار غشا می باشد.

جدول ۱- مشخصات غشاهای الیاف توخالی مورد بررسی در این پژوهش.

Table 1- The characteristics of hollow fiber membranes.

غشا	زاویه تماس آب	شعاع حفره (نانومتر)	تخلخل (%)	قطر داخلی (mm)	قطر خارجی (mm)
M ₁	$77/13 \pm 1/28$	۸/۲۹	۷۷	۰/۵۵	۰/۷۵
M ₂	$82/17 \pm 1/98$	۷/۴۳	۷۵	۰/۵	۰/۷۵
M ₃	$83/16 \pm 1/96$	۶/۷۰	۷۱	۰/۵	۰/۸۰

تخلخل غشا

تخلخل غشا (ε) عبارت است از نسبت حجم حفره‌های مجزا/جدا شده به حجم کل غشای متخلخل. تخلخل غشا با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می شود [۱۸].

$$\varepsilon = \frac{(\omega_1 - \omega_2)}{\frac{\rho_w}{(\omega_1 - \omega_2)} + \frac{\omega_2}{\rho_p}} \quad (1)$$

که ε تخلخل غشا، ω_1 وزن غشا تر (بر حسب گرم)، ω_2 وزن غشا خشک (بر حسب گرم)، ρ_p دانسیته پلیمر (بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب) و ρ_w دانسیته آب (بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب) می باشند. برای تهیه غشاهای خشک و غشاهای تر، تعدادی غشا الیاف توخالی در نظر گرفته می شود.

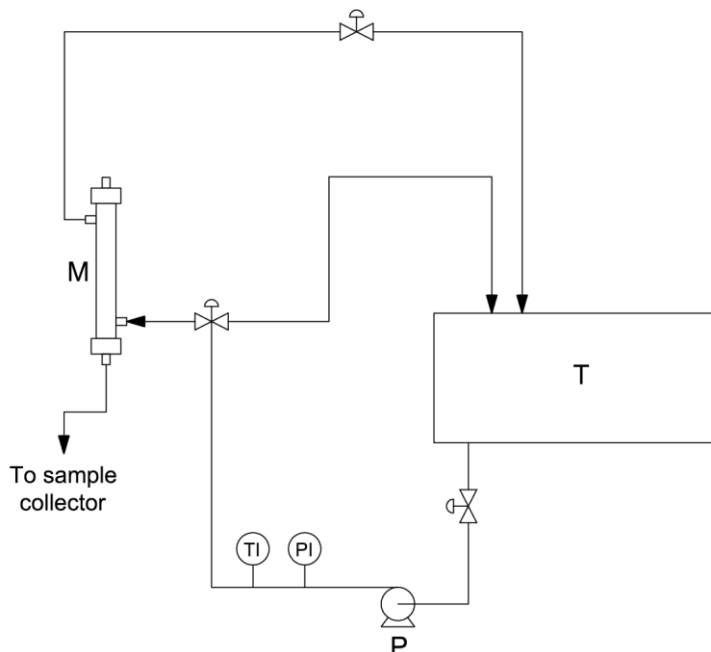
الیاف مشخص را به مدت ۳ روز در متانول و سپس به مدت سه روز در آب قرار می دهیم. قبل از وزن نمودن غشاهای تر، آب باقی مانده در داخل الیاف را با جریان هوا خارج می سازیم. غشاهای تر در آون خلا به مدت ۱۲ ساعت در درجه حرارت ۴۰ درجه سانتی گراد خشک شده و وزن می شوند.

تجهیزات فیلتراسیون

شار جریان عبوری و پس دهی غشاهای نانوساختار الیاف توخالی پلی اترسولفون با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی اولترافیلتراسیون جریان متقاطع در شرایط عملیاتی مختلف اندازه گیری شده است. شماتیک از تجهیزات آزمایشگاهی در شکل ۱ نشان داده شده است. دمای مخزن خوراک (T) در تمام مدت آزمایش تحت کنترل بود. برای جلوگیری از نوسانات جریان بعد از خروج از پمپ، یک محفظه نوسان گیر تعبیه شد

مواردی که برای آنالیز نمونه برداری شد، به مخزن خوراک بازگردانیده شد و سیستم در حالت در گردش کامل قرار داشت.

که از نوسان فشارسنج و آسیب‌های وارد شده به تجهیزات و غشا جلوگیری شود. جریان عبوری از غشا و باقی مانده به غیر از



شکل ۱- شماتیکی از فرآیند اولترافیلتراسیون جریان متقاطع: T (مخزن خوراک)، P (پمپ)، PI (فشارسنج)، TI (دماسنج)، M (ماژول غشایی).

Fig. 1- The schematic of ultrafiltration setup, T: feed tank, P: pump, PI: pressure gauge, TI: temperature sensor, M: membrane module.

روش‌های آنالیز

جذب محلول‌ها توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر UV-visible مدل ChromTech خوانده شد.

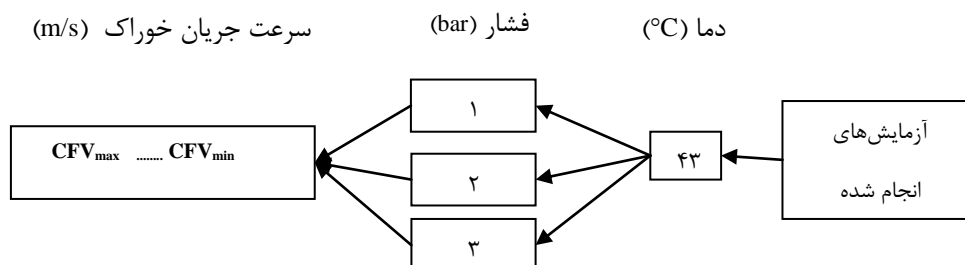
آزمایش‌ها

قبل از انجام آزمایش‌ها بر روی آب پنیر، شار آب خالص به منظور تعیین اندازه حفره غشا و همچنین تعیین میزان گرفتگی توسط آب پنیر اندازه‌گیری شد. آزمایش‌ها با آب پنیر در دمای 43°C و سه فشار ۱ bar، ۲ bar و ۳ bar انجام گرفت. دمای 43°C به دلیل نزدیکی به دمای خروجی آب پنیر از کارخانه انتخاب شد. شکل ۲ شماتیکی از روند انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

برای ارزیابی عملکرد سیستم علاوه بر اندازه‌گیری شار جریان عبوری از غشا، میزان پس‌دهی پروتئین و عبور لاکتوز با تعیین غلظت پروتئین و لاکتوز در جریان عبوری از غشا در هر آزمایش بررسی شد. برای انجام آنالیز مربوط به تعیین غلظت پروتئین از آزمون بردفورد [۱۹] استفاده شد. این آزمون روش رنگ‌سنجی پروتئین بر مبنای تغییر جذب رنگ کوماسی بریلینت بلو جی-۲۵۰^۱ است. برای انجام آنالیز مربوط به لاکتوز از معرف فنل و اسید سولفوریک استفاده شد [۲۰]. با استفاده از فنل و اسید سولفوریک غلیظ، لاکتوز به رنگ قهوه‌ای در می‌آید که شدت آن می‌تواند در طول موج ۴۸۰ نانومتر اندازه‌گیری شود. هر دو آزمون از روش‌های اسپکتروفوتومتریک بوده و

شستشوی معکوس انجام یافت. اگر دمای صحیح در حین فرآیند و شستشو رعایت نشود، آسیب‌هایی ممکن است به غشا وارد شود. این امر مخصوصاً در شرایطی اهمیت دارد که دمای اضافی باعث دناتوره شدن رسوبات شود که پس از آن حذف آن‌ها از غشا بسیار دشوار می‌شود [۲۲]. محلول شیمیایی با استفاده از آب یون‌زدایی شده با هدایت الکتریکی ۲/۹ میکروزیمنس بر سانتی متر، اتیلن‌دی‌آمین‌تترااستیک‌اسید (EDTA) و سدیم‌دودسیل‌سولفات (SDS) و سود صنعتی (NaOH) تهیه شد. محلول شستشو با غلظت: EDTA = 0.01 wt% و SDS = 0.01 wt% و NaOH = 0.01 wt% (سود صنعتی) تهیه شد. از استفاده از محلول اسیدی به منظور جلوگیری از وارد آمدن آسیب به غشا و تجهیزات صرف نظر شد. بعد از اتمام شستشو برای اطمینان از کارآمد بودن فرآیند شست و شو، شار آب خالص اندازه‌گیری شد.

بعد از هر آزمایش غشاها به منظور برطرف کردن گرفتگی‌های بازگشت‌پذیر و بازیابی شار اولیه شستشو داده شدند. در صنایع لبنی عمده موادی که باعث گرفتگی غشا می‌شوند پروتئین‌ها و مواد معدنی (به خصوص فسفات کلسیم) هستند، اگرچه چربی-ها می‌توانند بر لایه‌های به جامانده تاثیرگذار باشند. روش معمول برای حذف پروتئین و چربی جریان گردشی محلول قلیایی است و در ادامه از اسیدشویی برای حذف مواد معدنی استفاده می‌شود. استفاده از آنزیم‌های پروتئولیتیک و مواد شیمیایی جداسازی یون‌ها نیز قابل استفاده است [۲۱]. در این پژوهش برای فرآیند شستشوی غشا ابتدا آب یون‌زدایی شده با دمای 45°C جایگزین آب پنیر شد. سپس غشاها با استفاده از محلول شوینده شیمیایی در دمای 45°C شستشو داده شدند. به منظور خروج تمامی مواد شیمیایی دوباره غشاها با آب یون‌زدایی شده 45°C شستشو داده شدند. همه این مراحل ابتدا به صورت شستشوی مستقیم و سپس به صورت



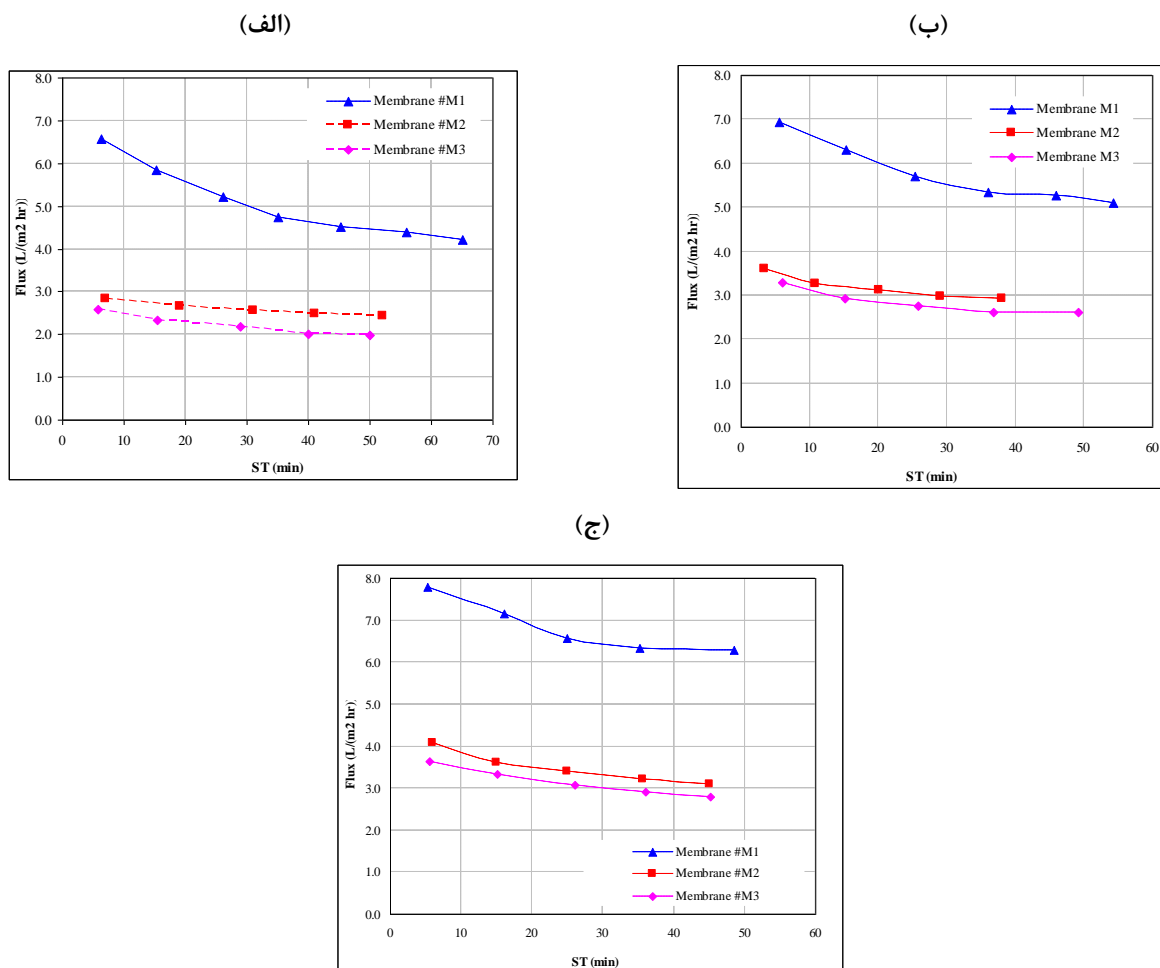
شکل ۲- آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش.

Fig. 2- The flowchart of performed experiments.

یافته ها و بحث

لایه مقاومت بر روی سطح غشا است که در نهایت به حالت پایدار می‌رسد و به یک مقدار ثابت میل می‌کند [۱۳]. محققان دیگری نیز به نتایج مشابهی دست یافته‌اند [۲۶-۲۳،۴]. در شکل ۳ اثر اندازه حفرات بر فلاکس جریان عبوری به خوبی مشهود است. علاوه بر این مشاهده می‌شود که روند تغییرات شار بر حسب زمان پایداری در فشارهای مختلف یکسان بوده و تنها میزان شار تغییر می‌کند. از بین سه غشا مورد بررسی، غشا M₁ بهترین عملکرد را از خود نشان داده است.

شکل ۳ (الف، ب و ج) تغییرات شار آب پنیر را بر حسب زمان پایداری (ST^۱) به ترتیب در در فشارهای ۱ bar، ۲ bar و ۳ bar، دمای ۴۳ °C و سرعت جریان عرضی بیشینه معادل ۰/۱۷۴۵ m/s، ۰/۱۸۳۴ m/s و ۰/۱۹۹۷ m/s برای سه غشا مورد آزمایش به ترتیب M₁، M₂ و M₃ نشان می‌دهد. همان طور که در شکل های یادشده مشخص است، شار با گذشت زمان کاهش یافته که نشان دهنده گرفتگی و پلاریزاسیون غلظتی است. شیب تند اولیه در نمودار به علت ساخته شدن



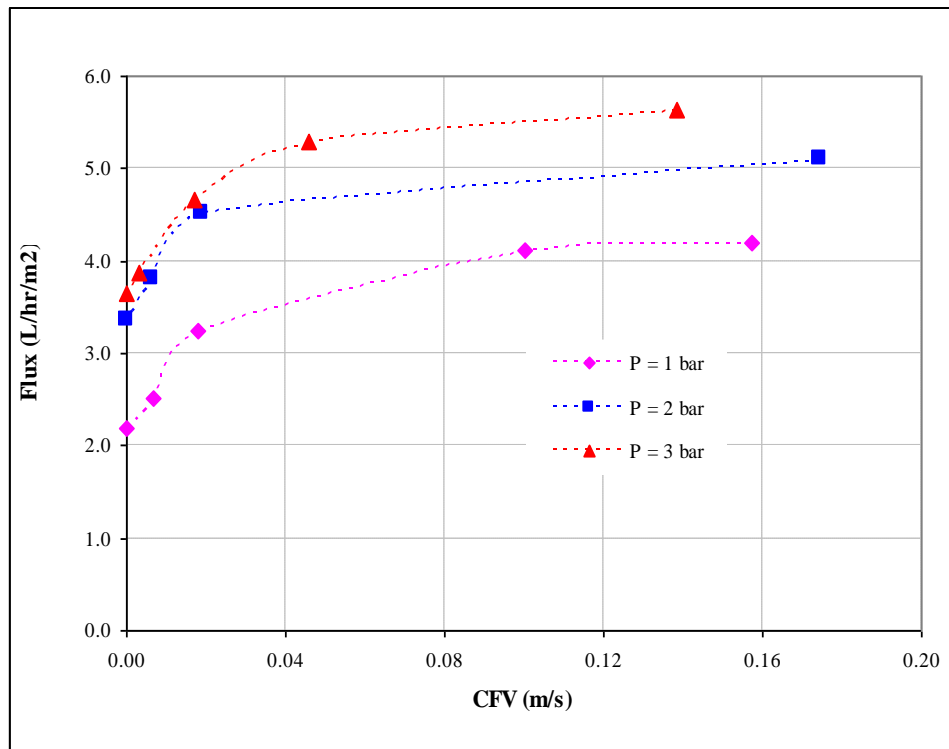
شکل ۳- تغییرات شار جریان عبوری آب پنیر بر حسب زمان پایداری برای غشاهای مختلف. دما: ۴۳ °C. (الف) فشار ۱ bar، (ب) فشار ۲ bar، (ج) فشار ۳ bar.

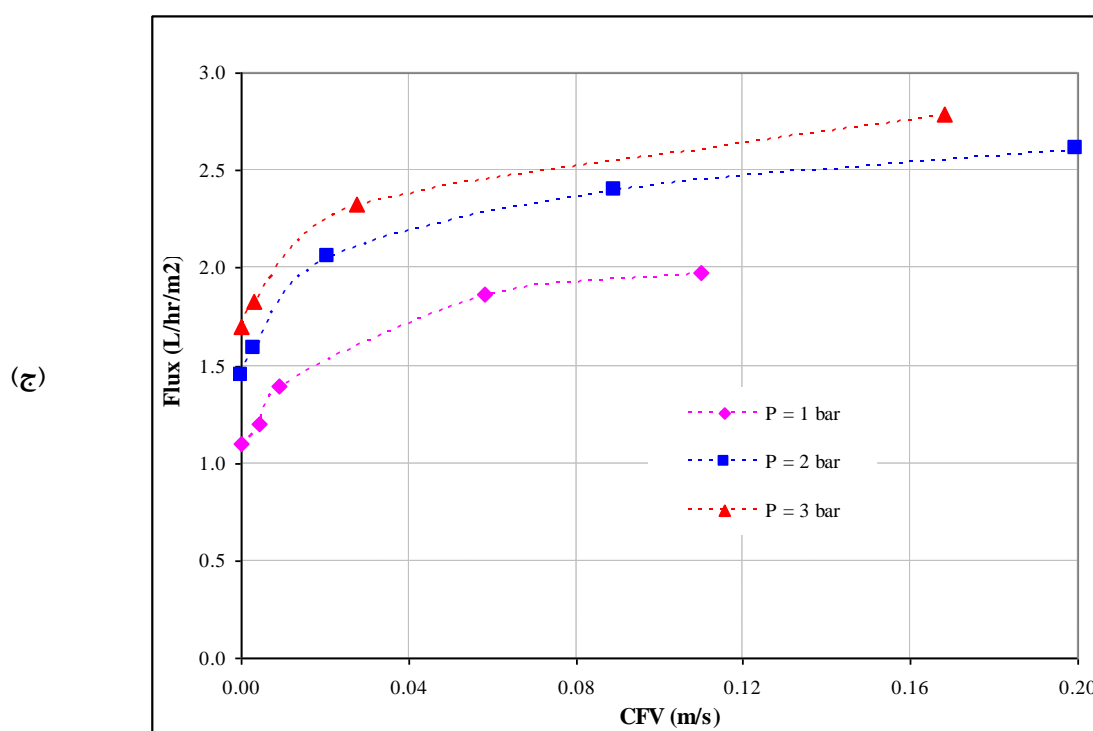
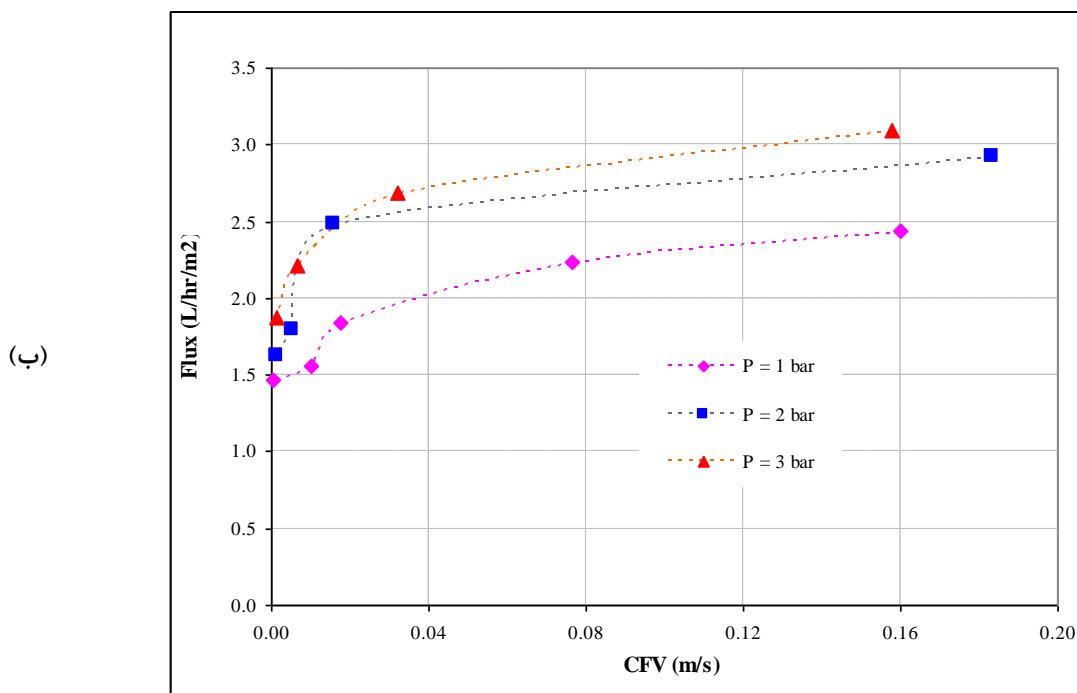
Fig. 3- The plots of whey flux versus the stabilization time for different membranes. T: 43 °C. (a) P = 1 bar, (b) P = 2 bars, (c) P = 3 bars.

کاهش مقاومت لایه نشسته بر روی سطح غشا است. بررسی دیگر محققان نیز روند این نتایج را نشان می‌دهد [۵،۸،۱۳،۲۷]. با کاهش سرعت جریان عرضی خوراک تا نزدیکی صفر، گرفتگی به میزانی افزایش پیدا می‌کند که تأثیر عواملی مانند فشار کم‌رنگ‌تر می‌شود.

تأثیر سرعت جریان عرضی خوراک^۱ (CFV) بر شار جریان عبوری آب پنیر در ۳ فشار ۱ bar، ۲ bar و ۳ bar برای سه غشا مورد آزمایش در شکل ۴ نشان داده شده است. با بررسی نمودار مشخص است که شار جریان عبوری با افزایش سرعت جریان عرضی خوراک افزایش می‌یابد که این امر ناشی از

(الف)





شکل ۴- تغییرات شار جریان عبوری از غشا بر حسب سرعت جریان عرضی خوراک در فشار ۱ bar و ۲ bar و ۳ bar. دما: ۴۳ °C (الف) غشا #M₁، (ب) غشا #M₂، (ج) غشا #M₃.

Fig. 4- The plots of whey flux versus the CFV of feed at 1 bar, 2 bars and 3 bars transmembrane pressure. T: 43 °C. (a) membrane #M₁, (b) membrane #M₂, (c) membrane #M₃.

آب پنیر است، می‌تواند برای بهبود کیفیت پنیر به خط تولید پنیر بازگردد و یا برای جداسازی پروتئین‌ها از یکدیگر می‌توان از یک مرحله اولترافیلتراسیون در ادامه اولترافیلتراسیون قبلی با استفاده از شرایط عملیاتی بهینه و تنظیم pH مناسب استفاده کرد.

نتایج کلی که می‌توان از بررسی پارامترهای عملیاتی به دست آورد بدین شرح است:

- با افزایش فشار، شار افزایش پیدا می‌کند تا جایی که تأثیر منفی لایه پلاریزاسیون غلظتی مانع از افزایش بیشتر شار می‌شود.
- با افزایش سرعت جریان عرضی خوراک شار افزایش می‌یابد. این افزایش سرعت توسط افزایش مصرف انرژی محدود می‌شود.
- با توجه به اندازه حفرات و ساختار غشا تغییر پارامترهای فشار و سرعت جریان عرضی خوراک تأثیر قابل توجهی بر پس زنی پروتئین و عبور لاکتوز نداشت.

مراجع

1. Yorgun, M.S., Balcioglu, I.A., & Saygin, O. (2008). Performance comparison of ultrafiltration, nanofiltration and reverse osmosis on whey treatment. *Desalination, Vol. 229, pp. 204-216.*
2. Cheryan, M. (1998). *Ultrafiltration and microfiltration handbook.* CRC Press.
3. Goulas G. and Grandison A. (2008), *Applications of membrane separation in advanced dairy science and technology*, Blackwell Publishing, pp. 35-75.
4. Li, Y., & Chung, T.S. (2008). Exploration of highly sulfonated polyethersulfone (SPES) as a membrane material with the aid of dual-layer hollow fiber fabrication

در شکل ۴ تأثیر فشار بر شدت جریان عبوری غشا نیز قابل مشاهده است. وابستگی شدت جریان عبوری از غشا به فشار اعمال شده به آسانی قابل درک است، چرا که فشار نیروی محرکه جداسازی است. شار با افزایش فشار افزایش می‌یابد، معمولاً تا یک مقدار محدودکننده که میزان جریان عبوری از غشا به دلیل لایه مرزی یا لایه gel-permeation در سطح غشا، مستقل از فشار می‌شود [۳]. با افزایش فشار لایه کیک تشکیل شده بر روی سطح غشا ضخیم‌تر و محکم‌تر می‌شود، در نتیجه بر روی شار عبوری تأثیر منفی می‌گذارد. ادغام این دو اثر با یکدیگر باعث می‌شود محققان به دنبال یک فشار بهینه برای فرآیند فیلتراسیون باشند. مطالعات دیگر محققان نیز نشان دهنده این امر است [۲۹-۲۶، ۱۳، ۸-۶].

میزان پس زنی پروتئین و لاکتوز با تغییر پارامترهای عملیاتی موردبررسی در این پژوهش (فشار، دما و سرعت جریان عرضی خوراک) تغییر چندانی از خود نشان نداد. حداکثر پس زنی برای غشاهای M_1 ، M_2 و M_3 به ترتیب $0.88/88\%$ ، $0.91/0.1$ و $0.90/17\%$ بود و میزان عبور لاکتوز برای هر سه غشا حدود 100% اندازه‌گیری شد. تغییرات اندک پس زنی با پارامترهای عملیاتی فشار و سرعت جریان عرضی خوراک می‌تواند به این دلیل باشد که اندازه اکثریت پروتئین‌های آب پنیر از بزرگترین حفرات غشا بزرگ‌تر است و میزان اندک پروتئین مشاهده شده در جریان عبوری از غشا مربوط به پروتئین‌های کوچک آب پنیر است که درصد آن‌ها بسیار کم است.

نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش‌ها انجام یافته در این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت با استفاده از غشا الیاف توخالی نانوساختار پلی-اترسولفون می‌توان به جداسازی مناسب ترکیبات آب پنیر دست یافت. جریان عبوری از غشا که عمدتاً حاوی لاکتوز است، می‌تواند برای مصارف بستنی‌سازی، خوراک دام و ... استفاده شود و یا دستیابی به لاکتوز با خلوص بالا که می‌تواند مصرف دارویی داشته باشد با یک مرحله اسمز معکوس در ادامه امکان‌پذیر است. جریان باقی مانده که حاوی پروتئین‌های ارزشمند

- Intensification, Vol. 49, pp. 1137-1143.*
12. Arunkumar A. & Etzel M.R., (2013), Fractionation of α -lactalbumin from β -lactoglobulin using positively charged tangential flow ultrafiltration membranes. *Journal of Separation and Purification Technology, Vol. 105, pp. 121-128.*
 13. Sarkar, P., Ghosh, S., Dutta, S., Sen, D., & Bhattacharjee, C. (2009). Effect of different operating parameters on the recovery of proteins from casein whey using a rotating disc membrane ultrafiltration cell. *Desalination, Vol. 249, pp. 5-11.*
 14. Porter, M. (1990). *Handbook of industrial membrane technology.* William Andrew.
 15. Akbache A., Lamiot É., Moroni O., Turgeon S., Gauthier S., Pouliot Y. (2009), Use of membrane processing to concentrate TGF- β 2 and IGF-I from bovine milk and whey. *Journal of Membrane Science, Vol. 326, pp. 435-440.*
 16. Zhao, C., Xue, J., Ran, F., & Sun, S. (2013). Modification of polyethersulfone membranes—a review of methods. *Progress in Materials Science, Vol. 58, pp. 76-150.*
 17. Yuliwati, E., & Ismail, A.F. (2011). Effect of additives concentration on the surface properties and performance of PVDF ultrafiltration membranes for refinery produced wastewater treatment. *Desalination, Vol. 273, pp. 226-234.*
 18. Yuliwati, E., Ismail, A.F., Matsuura, T., Kassim, M.A., & Abdullah, M.S. (2011). Effect of modified PVDF hollow fiber submerged ultrafiltration membrane for refinery wastewater technology for protein separation. *Journal of Membrane Science, Vol. 309, pp. 45-55.*
 5. Rektor, A., & Vatai, G. (2004). Membrane filtration of Mozzarella whey. *Desalination, Vol. 162, pp. 279-286.*
 6. Baldasso, C., Barros, T.C., & Tessaro, I.C. (2011). Concentration and purification of whey proteins by ultrafiltration. *Desalination, Vol. 278, pp. 381-386.*
 7. Chollangi, A., & Hossain, M.M. (2007). Separation of proteins and lactose from dairy wastewater. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, Vol. 46, pp. 398-404.*
 8. She, Q., Tang, C.Y., Wang, Y.N., & Zhang, Z. (2009). The role of hydrodynamic conditions and solution chemistry on protein fouling during ultrafiltration. *Desalination, Vol. 249, pp. 1079-1087.*
 9. Sangita Bhattacharjee, C.B. (2006), Studies on the fractionation of β -lactoglobulin from casein whey using ultrafiltration and ion-exchange membrane chromatography, *Journal of Membrane Science, Vol. 275, pp. 141-150.*
 10. Cheang, B., & Zydney, A.L. (2004). A two-stage ultrafiltration process for fractionation of whey protein isolate. *Journal of Membrane Science, Vol. 231, pp. 159-167.*
 11. de Souza, R.R., Bergamasco, R., da Costa, S.C., Feng, X., Faria, S.H.B., & Gimenes, M.L. (2010). Recovery and purification of lactose from whey. *Chemical Engineering and Processing: Process*

- grafted PVDF hollow fiber membranes with a stably anti-protein-fouling performance. *Membranes, Vol. 4, pp. 181-199.*
25. Narong, P., & James, A.E. (2008). Efficiency of ultrafiltration in the separation of whey suspensions using a tubular zirconia membrane. *Desalination, Vol. 219, pp. 348-357.*
 26. Carić, M.Đ., Milanović, S.D., Krstić, D.M., & Tekić, M.N. (2000). Fouling of inorganic membranes by adsorption of whey proteins. *Journal of Membrane Science, Vol. 165, pp. 83-88.*
 27. Atra, R., Vatai, G., Bekassy-Molnar, E., & Balint, A. (2005). Investigation of ultra-and nanofiltration for utilization of whey protein and lactose. *Journal of Food Engineering, Vol. 67, pp. 325-332.*
 28. Chiang, B.H., & Cheryan, M. (1986). Ultrafiltration of skim milk in hollow fibers. *Journal of Food Science, Vol. 51, pp. 340-344.*
 29. Breslau, B.R., & Kilcullen, B.M. (1977). Hollow fiber ultrafiltration of cottage cheese whey: Performance study. *Journal of dairy science, Vol. 60, pp. 1379-1386.*
 30. treatment. *Desalination, Vol. 283, pp. 214-220.*
 19. Bradford, M.M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical biochemistry, Vol. 72, pp. 248-254.*
 20. Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P., & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical chemistry, Vol. 28, pp. 350-356.*
 21. Vankelecom, I.F.J. and Gevers, L.E.M. (2005), *Membrane processes in green separation processes*, Wiley-VCH Verlag GmbH, 251-289.
 22. Askew, C.E., Poele, S.T., Skou, F., (2008). *Membrane filtration in cleaning-in-place: dairy, food and beverage operations*. Blackwell Publishing. Third ed., pp. 195-222.
 23. Ramachandra Rao, H.G. (2002). Mechanisms of flux decline during ultrafiltration of dairy products and influence of pH on flux rates of whey and buttermilk. *Desalination, Vol. 144, pp. 319-324.*
 24. Li, Q., Lin, H.H., & Wang, X.L. (2014). Preparation of sulfobetaine-