

بررسی اثر دمای فرآیند بر کارایی اولترافیلتراسیون شیر

سید محمد علی رضوی^۱

چکیده

در این تحقیق اثر تغییرات دما در سه سطح ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی گراد بر رفتار دینامیکی شار تراویده، مقاومت هیدرولیکی کل و درصد دفع اجزاء محلول شیر (پروتئین، چربی، لاکتوز، املاح و مواد جامد کل) مورد بررسی قرار گرفته است. برای انجام آزمایشات از یک سیستم پایلوتی اولترافیلتراسیون مجهز به مدول مارپیچ حلزونی با غشاء پلی سولفن آمید استفاده شده است. استراتژی عملی سه مرحله‌ای بر مبنای مدل سه پارامتری مقاومت متوالی (لایه مرزی - جذب سطحی) برای تعیین انواع مقاومت‌های هیدرولیکی به کار گرفته شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که در هر یک از سطوح دمای فرآیند، شار تراویده با گذشت زمان عملیات، به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد، اما مقادیر شار اولیه و شار کاذب پایدار تنها در دامنه دمایی ۳۰-۴۰°C افزایش یافته و افزایش بیشتر دما تاثیر چندانی بر شارها نمی‌گذارد. مقاومت هیدرولیکی کل در همه سطوح دما با گذشت زمان فرآیند، افزایش نشان داد. همچنین با افزایش دمای فرآیند، مقاومت‌های هیدرولیکی کل و گرفتگی برگشت‌ناپذیر افزایش، مقاومت گرفتگی برگشت‌پذیر کاهش و مقاومت هیدرولیکی غشاء بدون تغییر باقی ماند. داده‌ها در مورد درصد دفع ترکیبات شیر موید این مطلب است که درصد دفع پروتئین و چربی در هر سطح از دمای فرآیند، با گذشت زمان عملیات تقریباً ثابت می‌باشد، اما درصد دفع لاکتوز، املاح و مواد جامد کل شیر به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. در ضمن نتایج ثابت نمود که تغییرات دما تاثیر معنی‌داری بر درصد دفع هر یک از ترکیبات شیر در انتهای عملیات اولترافیلتراسیون شیر ندارد.

واژه‌های کلیدی: اولترافیلتراسیون، دفع، دمای فرآیند، شار، شیر، کارایی، گرفتگی غشاء.

مقدمه^۱

شار تراویده (فاز عبوری از درون غشاء)^۲، میزان گرفتگی^۳ و درصد دفع^۴ اجزاء محلول دارد. غشاء (جنس و اندازه منافذ)، پارامترهای هیدرودینامیکی فرآیند (فشار، دما و سرعت جریان خوراک) و خصوصیات فیزیکوشیمیایی سیال (غلظت اجزاء محلول و pH) از مهمترین عوامل تعیین‌کننده الگوی شار جریان تراویده، میزان و نوع گرفتگی و غلظت اجزاء در فازهای ناتراویده (فاز تغلیظ شونده توسط غشاء)^۵ و تراویده هستند (۱، ۲ و ۱۷). مهمترین محدودیت کاربرد عملی فرآیندهای اولترافیلتراسیون کاهش کارایی غشاء به دلیل پدیده‌های پلاریزاسیون غلظت^۶ و گرفتگی است، زیرا در چند دقیقه اول فرآیند، موجب کاهش شدید شار جریان تراویده،

اولترافیلتراسیون^۲ متداولترین فرآیند غشایی در صنایع غذایی، به خصوص در صنایع لبنی برای تغلیظ شیر و آب پنیر است (۱). این فرآیند اولین بار در سال ۱۹۶۷ برای تغلیظ شیر در فرآیند تولید پنیر به کار رفت و از آن زمان تاکنون به طور فزاینده‌ای در صنایع فرآورده‌های لبنی گسترش یافته است (۱۴). فرآیند غشایی سیالات لبنی، موجب کاهش هزینه‌های عملیاتی ناشی از مصرف برق و بخار، بهبود ظرفیت و کارایی فرآیند کارخانه و افزایش کیفیت محصول می‌گردد (۱، ۶ و ۱۴). راندمان و هزینه یک فرآیند غشایی بستگی به

تاریخ پذیرش: ۸۵/۳/۲۷

۱- گروه علوم و صنایع غذایی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد.

E-mail: s.razavi@um.ac.ir

3. Permeate

4. Fouling

5. Rejection

6. Retentate.

7. Concentration polarization

2. Ultrafiltration (UF)

کاهش شار و کنترل کارایی غشاء در مراحل مختلف فرآیند اولترافیلتراسیون شیر ارزیابی شود.

مقاومت های هیدرولیکی

انتقال آب تمیز از درون غشاء در اثر جریان ویسکوز صورت می گیرد. مقاومت هیدرولیکی (ذاتی) غشاء^۴ را می توان به کمک قانون دارسی^۵ توصیف کرد (۱):

$$R_m = \frac{\Delta P_T}{\mu_w J_w} \quad [1]$$

که ΔP_T اختلاف فشار در عرض غشاء (kPa)، μ_w ویسکوزیته آب (Pa.s) و R_m مقاومت ذاتی غشاء (m^{-1}) است. ΔP_T در اولترافیلتراسیون جریان عرضی^۶ از رابطه رابطه زیر به دست می آید:

$$\Delta P_T = \frac{P_i + P_o}{2} - P_p \quad [2]$$

که P_i و P_o به ترتیب فشار های محلول ورودی به غشاء و خروجی از غشاء و P_p فشار تراویده است. مقاومت هیدرولیکی کل (R_T) نسبت به جریان تراویده با فرض ناچیز بودن فشار اسمزی از طریق مدل مقاومت متوالی (یا مدل لایه مرزی- جذب سطحی)^۷ این چنین بیان می شود (۱، ۶ و ۱۱):

$$R_T = \frac{\Delta P_T}{\mu_p J_p} \quad [3]$$

که J_p شار تراویده ($kg/m^2.s$) و μ_p ویسکوزیته تراویده (Pa.s) است. مقاومت هیدرولیکی کل، مجموع مقاومت ذاتی غشاء R_m و مقاومت گرفتگی کل^۸ است، یعنی:

$$R_T = R_m + R_F \quad [4]$$

$$R_F = \frac{\Delta P_T}{\mu_p J_p} - R_m \quad [5]$$

مقاومت گرفتگی کل (R_F) بر طبق مدل مقاومت متوالی از دو جزء مقاومت ناشی از پلاریزاسیون غلظت (یا

توسعه گرفتگی و تغییر میزان دفع اجزاء محلول خوراک می شوند. به علاوه گرفتگی عمر کاری غشاء را کاهش داده و هزینه های تمیز کردن و شستشو را افزایش می دهد. در واقع به منظور احیای کارایی فرآیند اولترافیلتراسیون ناگزیر به حذف کامل گرفتگی غشاء (برگشت پذیر و برگشت ناپذیر) می باشیم. چنین عملیاتی در صنعت، روزانه ۲-۳ ساعت از کل زمان ۶-۸ ساعت تولید را به خود اختصاص می دهد (۱، ۲، ۶ و ۱۳). در طی فرآیند اولترافیلتراسیون شیر پس چرخ، شار تراویده در اثر افزایش سرعت جریان عرضی یا اختلاف فشار در عرض غشاء^۱ (ΔP_T) بهبود می یابد (۲، ۶، ۸، ۱۶ و ۱۸). این موضوع نشان می دهد که شار و گرفتگی به کمک عوامل هیدرودینامیکی قابل کنترل هستند. تاکنون اطلاعات محدودی در خصوص اثر شرایط هیدرودینامیکی بر رفتار شار، گرفتگی و خصوصیات بازداری در طی فرآیند اولترافیلتراسیون شیر انتشار یافته است. مطالعات قبلی عمدتاً در باره بررسی اثرات شرایط هیدرودینامیکی بر کارایی اولترافیلتراسیون شیر (غالباً شار تراویده به عنوان شاخص سرعت فیلتراسیون) تحت شرایط پایدار^۲ متمرکز شده است (۲، ۵، ۶، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۱۸)، در حالی که برای مقاصد طراحی و مدلسازی یک فرآیند جدید و یا تجزیه و تحلیل فرآیند موجود، اطلاعات به دست آمده تحت شرایط ناپایدار مفید و قابل استفاده هستند، بنابراین هدف از این تحقیق بررسی اثر تغییرات دمای فرآیند بر رفتار دینامیکی شار تراویده، مقاومت هیدرولیکی کل^۳ (به عنوان شاخص گرفتگی) و درصد دفع اجزاء محلول در طی اولترافیلتراسیون شیر پس چرخ و تجزیه و تحلیل دقیق نتایج تجربی با تاکید بر شاخص های مختلف کارایی فرآیند اولترافیلتراسیون می باشد، به گونه ای که براساس نتایج این مقاله امکان تشخیص مکانیسم های

4. Intrinsic or hydraulic membrane resistance
5. Darcy's law
6. Cross flow
7. Resistance-in-series (boundary layer-adsorption)
8. Overall fouling resistance

1. Transmembrane pressure
2. Steady state
3. Total hydraulic resistance

در این تحقیق از یک سیستم اولترافیلتراسیون غشایی پایلوتی ساخت شرکت بیوکن^۵ روسیه استفاده شد. این سیستم مجهز به تانک خوراک، پمپ سانتریفوژی، دبی سنج، مدول اولترافیلتراسیون از نوع مارپیچ حلزونی^۶، مبدل حرارتی لوله‌ای، دو فشارسنج عقربه‌ای، دو شیر جریان، یک دماسنج دیجیتالی و یک ترازوی الکترونیکی قابل اتصال به کامپیوتر و چاپگر بود (شکل ۱). غشاء مورد استفاده در سیستم از جنس پلی سولفون آمید^۷ و اندازه منافذ (MWC0) آن ۲۰ کیلو دالتون بوده است. جریان تراویده پس از خروج از غشاء درون یک ظرف (که روی ترازوی الکترونیکی قرار دارد) ریخته و تغییرات دینامیکی شار در فواصل زمانی ۳۰ ثانیه از طریق ترازو به چاپگر یا کامپیوتر منتقل می‌شود، در حالی که جریان ناتراویده پس از عبور از مبدل حرارتی به تانک خوراک برمی‌گردد. برای اینکه عملیات در دمایی معینی صورت بگیرد و هم چنین از تغییرات دما در طی عملیات جلوگیری به عمل آید، دمایی جریان توسط دماسنج دیجیتالی کنترل شده و از طریق مبدل حرارتی در حد مورد نظر تنظیم می‌گردد.

نمونه های شیر پس چرخ از طریق بازسازی شیر-خشک بدون چربی با آب مقطر ۵۰°C تهیه می‌شد تا این که ترکیب شیمیایی نمونه‌ها در آزمایشات مختلف ثابت باشد. به طور متوسط نمونه‌ها دارای ۰/۱ درصد چربی، ۲/۸۵ درصد پروتئین، ۴/۷۲ درصد لاکتوز، ۰/۷۶ درصد مواد معدنی، ۸/۴۵ درصد مواد جامد کل و pH برابر ۶/۵۸ بودند. در این تحقیق، برای بررسی اثر دمایی فرآیند بر رفتار دینامیکی شار تراویده، مقاومت هیدرولیکی کل و درصد دفع اجزاء محلول (پروتئین، چربی، لاکتوز، املاح و مواد جامد خشک کل)، دما در ۳ سطح ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. آزمایشها در اختلاف فشار ۱۵۲ کیلو پاسکال، سرعت

گرفتگی برگشت پذیر، $(R_{if})^1$ و مقاومت ناشی از جذب سطحی (یا گرفتگی برگشت ناپذیر، $(R_{if})^2$) تشکیل شده است. مقاومت های گرفتگی از طریق روابط زیر به دست می‌آیند:

$$R_{if} = \frac{\Delta P_T}{\mu_{wf} J_{wf}} - R_m \quad [۶]$$

$$R_{rf} = R_F - R_{if} \quad [۷]$$

که J_{wf} و μ_{wf} به ترتیب ویسکوزیته و شار آب تمیز از درون غشاء گرفته (یا مسدود شده) می‌باشند. براساس معادلات فوق می‌توان دریافت که عواملی نظیر اختلاف فشار، ویسکوزیته تراویده، مقاومت‌های گرفتگی در کاهش شار تراویده (J_p) نسبت به شار آب تمیز (J_w) دخالت دارند. برای بررسی میزان نقش هر یک از مقاومت‌ها در کاهش شار محلول می‌توان شار نسبی (J_r) و کاهش شار نسبی کل $(J_{rt})^4$ را براساس معادلات معادلات زیر تعریف کرد:

$$J_r = \frac{J_p}{J_w} = \frac{1}{1 + R'} \quad [۸]$$

که:

$$R' = \frac{R_{if} + R_{rf}}{R_m} \quad [۹]$$

بنابراین کاهش شار نسبی کل (J_{rt}) عبارت است از:

$$J_{rt} = 1 - J_r = \frac{R'}{1 + R'} \quad [۱۰]$$

اگر مقاومت ناشی از پلاریزاسیون غلظت و جذب سطحی وجود نداشته باشد، در آن صورت $J_{rt}=0$ یعنی هیچ‌گونه کاهش شاری نسبت به آب خالص مشاهده نشده است، اما وقتی که $J_{rt} \rightarrow 1$ ، یعنی کاهش شار بسیار بزرگ است و گرفتگی شدیداً توسعه یافته است.

مواد و روش‌ها

5. Biocon Company
6. Spiral wound UF module
7. Polysulfone amide
8. Molecular Weight Cut Off

1. Reversible fouling
2. Irreversible fouling
3. Relative flux
4. Total relative flux decline

شد. ویسکوزیته (بر حسب پاسکال- ثانیه) و دانسیته (بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب) به ترتیب توسط ویسکومتر لوله موینه U شکل استوالد^۲ و پیکنومتر^۳ ۲۵ میلی لیتری در سه تکرار برای آب مقطر مرحله اول، تراویده شیر و آب مقطر مرحله سوم در دمای عملیات مربوطه اندازه گیری شد. pH نمونه های شیر، تراویده، ناتراویده، آب مقطر و محلول های شستشو در طی هر بار آزمایش در دمای ۲۵ °C توسط pH متر جن وی^۴ مدل ۳۰۱۰ بدست آمد (۱۵). درصد دفع ظاهری^۵ اجزاء محلول (پروتئین، چربی، لاکتوز، املاح و مواد جامد خشک کل) در طی عملیات از رابطه زیر محاسبه شد (۱):

$$R_{obs} = 1 - \frac{C_p}{C_b} \quad [11]$$

که در آن C_p غلظت جزء محلول در تراویده و C_b غلظت جزء محلول در خوراک (یا ناتراویده) است.

نتایج و بحث

نتایج تجربی نشان می دهند که در هر یک از سطوح دمای فرآیند، مقدار شار تراویده با گذشت زمان عملیات، به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد (شکل ۲). مقدار شار اولیه^۶ در دمای ۳۰ °C نسبت به دو دمای ۴۰ °C و ۵۰ °C در حدود ۱۵ درصد پایین تر به دست آمد، اگر چه بین شار در دمای ۴۰ °C و ۵۰ °C تفاوت چندانی دیده نمی شود. یعنی این که با افزایش دماهای پایین تا ۴۰ °C مقدار شار اولیه افزایش می یابد، اما افزایش بیشتر دما تأثیر چندانی بر افزایش شار ندارد. در این تحقیق، شار اولیه به طور متوسط به ازای افزایش هر یک درجه سانتی گراد دما به مقدار ۰/۶۵ درصد افزایش یافته است.

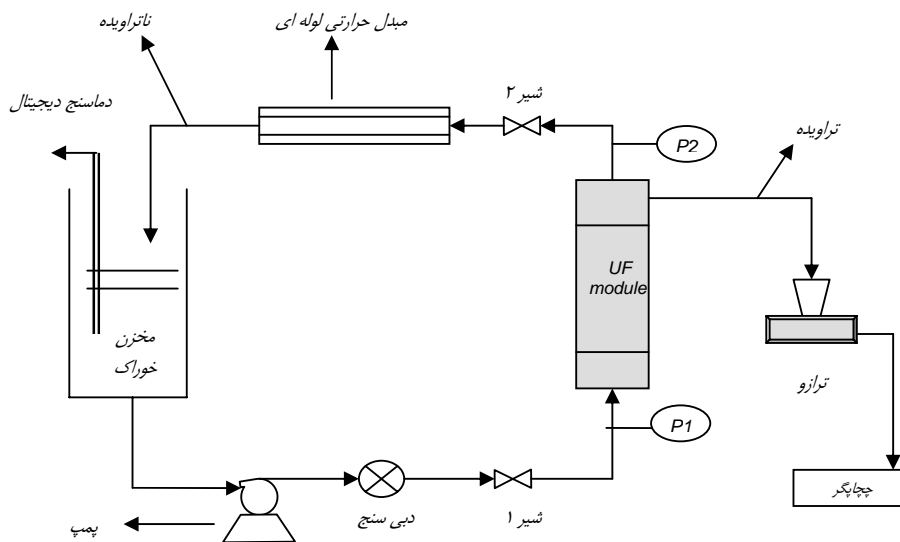
جریان ۱۵ لیتر بر دقیقه و غلظت خوراک ثابت انجام شد. هر بار عملیات اولترافیلتراسیون شیر در ۴ مرحله به شرح ذیل انجام گرفت:

- ۱- فیلتراسیون آب مقطر از درون غشاء تمیز
- ۲- فیلتراسیون شیر پس چرخ از درون غشاء تمیز
- ۳- فیلتراسیون آب مقطر از درون غشاء مسدود شده
- ۴- سیکل شستشو طبق راهنمای سازنده سیستم غشایی هدف از مرحله اول، تعیین شار آب خالص (J_w) و محاسبه مقاومت ذاتی غشاء (R_m) براساس معادله ۱ بوده است. براساس داده های مرحله دوم، شار شیر (J_p) به دست می آمد و براساس معادله ۳ مقاومت کل غشاء (R_T) تعیین می گردید. در مرحله سوم، ابتدا آب مقطر با سرعت بالا و فشار پایین وارد مدار می شد تا لایه ژلی روی سطح غشاء سریعاً برطرف گردد و سپس در شرایط عملیاتی مورد نظر، شار آب در غشاء مسدود شده (J_{wf}) ثبت می شد. در این مرحله براساس معادلات ۴ تا ۷ مقاومت های گرفتگی برگشت پذیر (R_{rf}) و گرفتگی برگشت ناپذیر (R_{if}) محاسبه می گردید. در مرحله چهارم، به منظور برطرف کردن گرفتگی غشاء و رساندن شار آب خالص به حالت شروع هر بار عملیات، سیکل شستشو به صورت کامل صورت می گرفت. شایان ذکر است که اختلاف شار آب مقطر ابتدا و انتهای هر بار عملیات اولترافیلتراسیون نباید بیشتر از ۵-۳ درصد می بود، در غیر این صورت گرفتگی غشاء برطرف نشده و سیکل شستشو تکرار می گردید.

درصد وزنی پروتئین، چربی، لاکتوز، املاح و مواد جامد خشک بدون چربی نمونه های شیر پس چرخ، تراویده و ناتراویده در فواصل زمانی ۳، ۱۵ و ۳۰ دقیقه در هر بار عملیات با استفاده از دستگاه لاکتواستار ساخت شرکت فانک ژربر^۱ در ۳-۵ تکرار اندازه گیری

2. Ostwald U- tube capillary viscometer
3. Pycnometer
4. Jenway
5. Observed rejection
6. Initial flux.

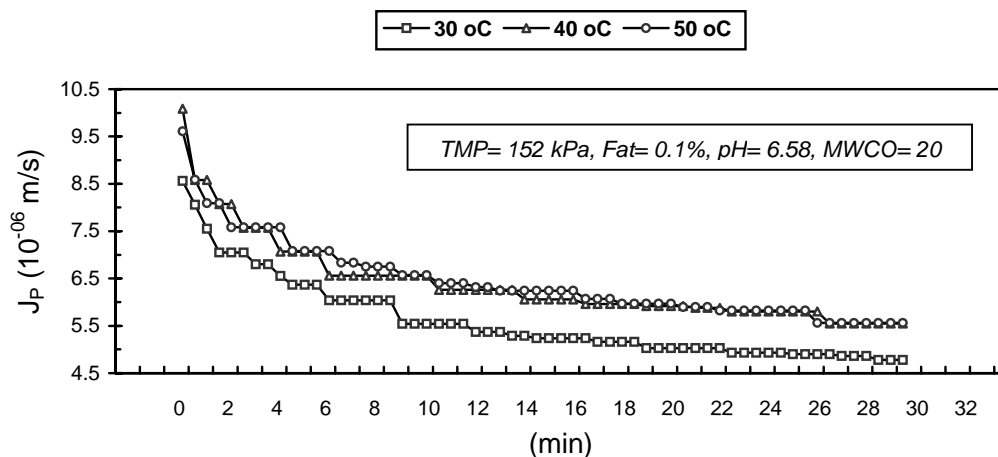
1. Lactostar, Funke Gerber Company



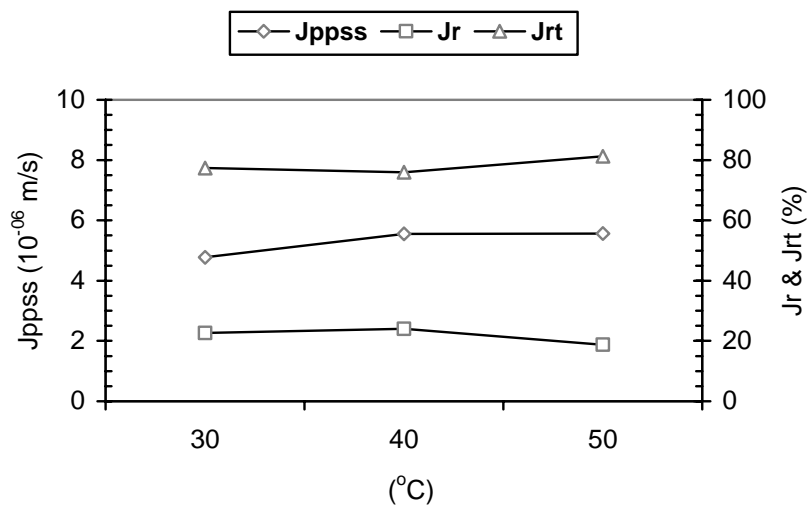
شکل (۳) نشان می‌دهد که شار کاذب پایدار با افزایش دما از 30°C تا 40°C به مقدار ۱۶ درصد افزایش می‌یابد، اما در دامنه دمای $40-50^{\circ}\text{C}$ تقریباً ثابت باقی می‌ماند. به طور متوسط نرخ افزایش شار کاذب پایدار به ازای افزایش هر یک درجه دمای فرآیند در حدود $0/81$ درصد می‌باشد. هم چنین می‌توان دریافت که کاهش شار تراویده نسبت به شار آب (شار نسبی، J_r) در محدود دمای $30-40^{\circ}\text{C}$ تقریباً ثابت است، اما با افزایش دمای فرآیند، شار تراویده نسبت به شار آب بیشتر کاهش می‌یابد، به عبارت دیگر کاهش شار نسبی کل (J_{π}) بیشتر شده ($0/77$ -- $0/81$) و احتمالاً درصد گرفتگی در دمای 50°C شدیدتر از سایر دماها خواهد بود. یادآوری می‌شود که هر چه J_{π} به یک نزدیک باشد، گرفتگی نیز بیشتر است. تعدادی از محققان نشان دادند که افزایش دمای فرآیند باعث افزایش شار تراویده می‌شود (۲، ۵، ۷ و ۱۸).

با ملاحظه شکل ۲ می‌توان دریافت که نرخ کاهش شار^۱ برای منحنی مربوط به دمای 30°C بیشتر از دو دمای دیگر است. به نظر می‌رسد که نرخ کاهش شار پس از حدود ۱۰ دقیقه فرآیند در مورد همه منحنی‌ها تقریباً ثابت شده و به شار در حالت پایدار^۲ نزدیک می‌شود. این شار را که در واقع معیاری مشابه شار پایدار است، شار نسبتاً پایدار یا شار کاذب پایدار^۳ می‌نامند (۱). در این تحقیق شار تراویده در انتهای هر بار عملیات به عنوان شار کاذب پایدار در نظر گرفته شده است. در بعضی منابع از معیار شار تراویده متوسط^۴ برای مقایسه شارها در فرآیندهای مختلف استفاده شده است، اگر چه برای طراحی فرآیندهای غشایی همواره رفتار دینامیکی شار (شار اولیه، نرخ کاهش شار و شار نهایی) مورد نیاز است و اطلاعاتی نظیر شار متوسط و شار پایدار که توسط بعضی مدل‌های فیزیکی قابل استخراج است، کافی برای این موضوع نیست (۲، ۵ و ۶).

1. Flux decline rate.
2. Steady state flux (JPSS).
3. Relative steady state flux (J_{prss}) or pseudo - steady state flux (J_{ppss})
4. Average permeate flux



(T)

 (J_p-t)  (J_{rt}) (J_r) (J_{ppss})

بطور متوسط ۰/۵ درصد به ازای هر یک درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد (۴).

پروپیل مقاومت هیدرولیکی کل به زمان (R_T-t) فرآیند اولترافیلتراسیون شیر نشان می‌دهد که R_T در همه سطوح دمای فرآیند، با گذشت زمان عملیات، افزایش می‌یابد (شکل ۴). در ضمن می‌توان دریافت که افزایش دمای فرآیند نیز موجب افزایش R_T در کل زمان عملیات

پومپی (۱۲) نتیجه گرفت که شار تراویده در دمای 50°C تا ۴ برابر بزرگتر از دمای 5°C است. کاپاسیمالیس و زال (۱۰) نیز نشان داد که شار تراویده در دمای 50°C بیشتر از دمای 15°C است. چریان و چیانگ (۲) نشان داد که نرخ کاهش شار در دمای 40°C نسبت به دو دمای 50°C و 60°C بزرگتر است و شار در دمای 60°C سریعتر به حالت نسبتاً پایدار می‌رسد (۲). اکثر و زوتولا (۴) نیز نشان داد که با افزایش دمای فرآیند شار اولیه بطور متوسط ۲/۷ درصد و شار کاذب پایدار

مقاومت گرفتگی برگشت‌پذیر R_{rf} یا مقاومت پلاریزاسیون غلظت] تا حدودی بزرگتر از مقاومت گرفتگی برگشت‌ناپذیر R_{if} یا مقاومت گرفتگی ناشی از جذب سطحی] است. اما با افزایش دمای فرآیند، R_{rf} کاهش و R_{if} افزایش یافته است، به طوری که در دمای 50°C گرفتگی کل عمدتاً ناشی از گرفتگی برگشت‌ناپذیر بوده و مقاومت ناشی از پلاریزاسیون غلظت تقریباً معادل مقاومت هیدرولیکی غشاء شده است. هر چه R_{if} بزرگتر باشد، نشان دهنده وجود یک لایه رسوب مستحکم‌تر بر سطح غشاء است که به راحتی توسط شستشو برطرف نمی‌شود (۱۸).

تانگ و همکاران (۱۹) گزارش نمود که رسوب روی سطح غشاء دو قسمت دارد: یک لایه شل و نرم که به راحتی با آب شستشو برطرف می‌گردد و یک لایه سفت که قویاً به سطح غشاء چسبیده و برای جدا کردن آن شوینده خاص مورد نیاز است. اکثر و زوتولا (۴) نشان داد که در دماهای پایین (20°C) حدود ۸۵-۷۰ درصد کاهش شار تراویده شیر پس چرخ مربوط به مقاومت پلاریزاسیون غلظت و تنها ۳۰-۱۵ درصد آن ناشی از گرفتگی است، اما در دماهای بالاتر (50°C) پلاریزاسیون غلظت کاهش یافته و سهم گرفتگی بزرگتر می‌شود. او چنین توضیح داد که در دمای پایین تر مقادیر انرژی اکتیواسیون (E_a) مولکول‌ها کوچکتر است، لذا جذب اجزاء محلول احتمالاً به دلیل پیوندهای ضعیف نظیر پیوند هیدروژنی یا تقابل‌های آگریز بر سطح غشاء صورت می‌گیرد و واکنش‌های شیمیایی در طی تشکیل لایه پلاریزاسیون غلظت یا لایه ژلی دخالت ندارند. در دماهای بالاتر، انرژی مولکول‌های سیال بیشتر است، در نتیجه اولاً ثابت‌های نفوذ اجزاء محلول شیر بزرگتر می‌شود، لذا شار با بالا رفتن دما افزایش می‌یابد، ثانیاً امکان تشکیل پیوندهای قوی‌تر مولکولها با یکدیگر و با

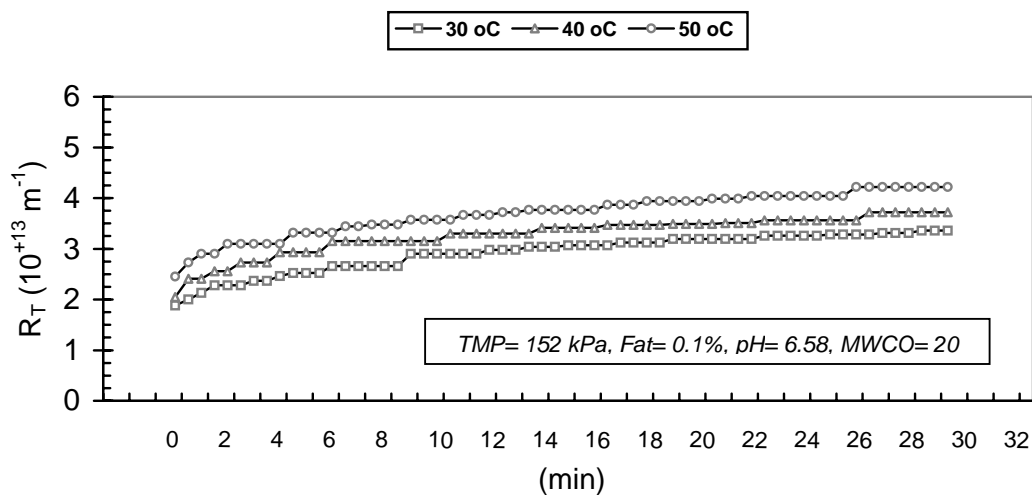
گردیده است. بنابراین گرفتگی غشاء علیرغم ثابت بودن شار تراویده در دو دمای 40°C و 50°C بیشتر شده است. شیب منحنی‌ها در دقایق اولیه فرآیند بسیار بزرگتر از دقایق بعدی است. این موضوع مبین افت شدید شار در ابتدای فرآیند است. رامچاندار (۱۴) دریافت که در سیستم‌های با مقدار پروتئین کم (نظیر انواع آب پنیر) شار به دلیل جذب تدریجی پروتئین‌های آب پنیر به سطح غشاء و مسدود شدن منافذ با رسوب فسفات کلسیم کاهش می‌یابد. بنابراین مشاهده می‌شود که گرفتگی غشاء در طول عملیات با شیب رو به رشدی افزایش می‌یابد. اما در سیستم‌هایی که حاوی درصد بالای پروتئین (نظیر شیر پس چرخ، شیر کامل، پساب کره) می‌باشند، تشکیل لایه پلاریزاسیون غلظت ناشی از پروتئین‌های شیر در چند ثانیه اول فرآیند، شار اولیه را به سرعت کاهش می‌دهد، اما با ادامه فرآیند، گرفتگی در اثر جذب و رسوب پروتئین‌های آب پنیر و فسفات کلسیم افزایش می‌یابد، لذا گرفتگی با شیب کمتری نسبت به شروع فرآیند افزایش خواهد یافت و در بسیاری مواد هم تأثیری بر شار جریان تراویده در زمان‌های پس از تثبیت شار نمی‌گذارد. در نهایت نتیجه‌گیری می‌کند که در سیستم‌های آب پنیری گرفتگی به تنهایی، شار جریان را کنترل می‌کند، اما در سیستم‌های شیری شار عمدتاً تحت تأثیر پلاریزاسیون غلظت و تا حدی گرفتگی ناشی از جذب سطحی است.

برای درک بهتر اثر دمای فرآیند بر شار و گرفتگی باید سهم هر یک از انواع مقاومت‌ها در پدیده گرفتگی مشخص شود. همان‌طور که نتایج حاصل از تاثیر تغییرات دما بر مقاومت‌های هیدرولیکی فرآیند اولترافیلتراسیون شیر (شکل ۵) نشان می‌دهد، مقاومت هیدرولیکی غشاء در دماهای مختلف ثابت است، یعنی این که گرفتگی به طور کامل در انتهای سیکل شستشوی هر بار عملیات بر طرف شده است. در دمای 30°C سهم

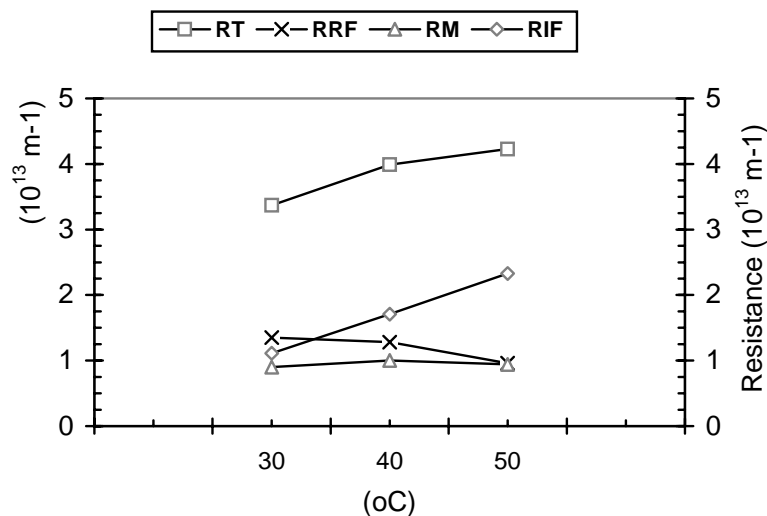
از زمان فرآیند توصیف نمایند، اما قادر به توضیح دلایل چنین رفتارهای پیچیده کارایی فرآیند اولترافیلتراسیون شیر نبودند. هدف از این بخش تفسیر این نتایج با تاکید بر درصد دفع اجزاء محلول شیر (پروتئین، چربی، لاکتوز، املاح و مواد جامد کل) می‌باشد.

غشاء در لایه مجاور سطح غشاء فراهم می‌گردد، بنابراین مقاومت گرفتگی نیز با افزایش دما بزرگتر می‌شود.

تاکنون نتایج بدست آمده توانستند الگوی شار و رفتار گرفتگی فرآیند اولترافیلتراسیون شیر را به عنوان تابعی



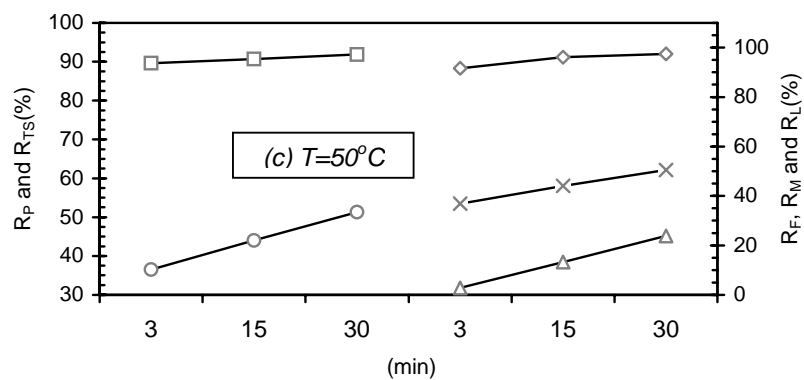
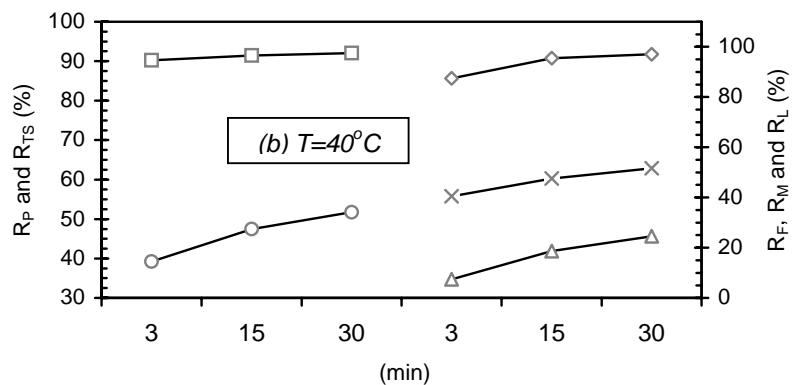
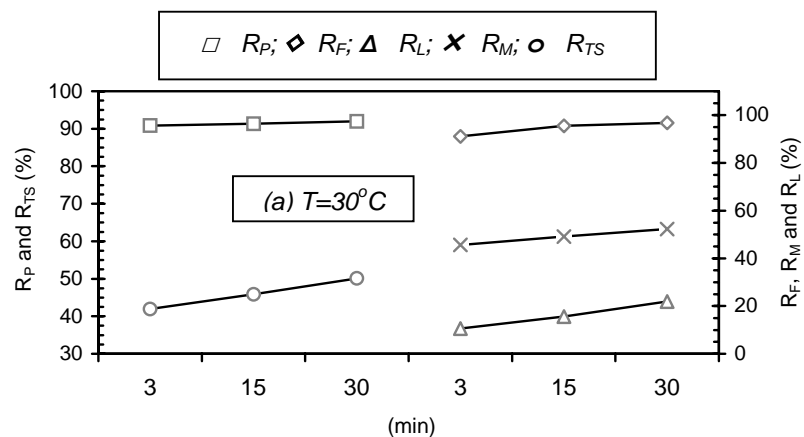
(T)

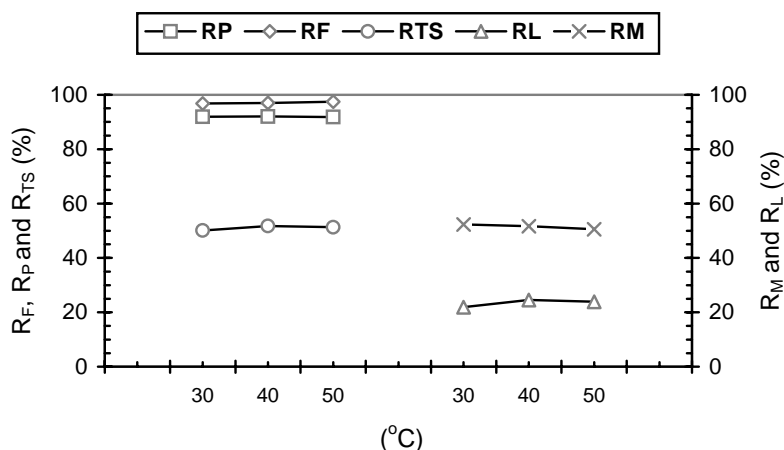
 $(R_T - t)$ 

احتمالاً دلیل کاهش مقاومت برگشت پذیر با افزایش دما نیز بهبود میزان نفوذ برگشتی^۱ اجزاء محلول و کاهش ضخامت لایه پلاریزاسیون غلظت است.

تاکنون در مورد اثر دما بر میزان بازداری ترکیبات شیر نتایج ضد و نقیضی گزارش شده است. پومپی (۱۲) نتیجه گرفت که در دمای 5°C میزان بازداری اجزاء محلول نسبت به 50°C بیشتر است و اتلاف پروتئین به درون جریان تراویده نیز ناچیز می باشد. کاپاسیمالیس و زال (۱۰) نشان داد که مواد جامد کل تراویده در دمای 45°C بیشتر از 15°C است، یعنی با افزایش دما میزان عبور ترکیبات محلول به درون تراویده افزایش می یابد. کوتاک (۷) بیان نمود که دما اثر معنی داری بر درصد دفع چربی، پروتئین و املاح در سطح یک درصد خطا نمی گذارد. اکنر و زوتولا (۳) عنوان نمود که دماهای پایین تر بازداری ترکیبات شیر (پروتئین، لاکتوز و املاح) را بهبود می بخشد. هم چنین دما اثر معنی داری بر مقادیر پروتئین، لاکتوز و املاح در تراویده دارد و در دماهای بالاتر مواد جامد تراویده بیشتر افزایش می یابد.

داده های تجربی درصد دفع ترکیبات شیر نشان می دهد که درصد دفع پروتئین (R_p) و چربی (R_f) در هر سطح از دمای فرآیند با گذشت زمان تقریباً ثابت بوده، اما درصد دفع سایر ترکیبات شیر نظیر لاکتوز (R_L)، مواد معدنی (R_M) و درصد دفع مواد جامد کل شیر (R_{TS}) به طور قابل ملاحظه ای با زمان افزایش یافته است (شکل ۶). همچنین می توان دریافت که در هر دمایی بیش از ۹۰ درصد پروتئین و چربی شیر توسط غشاء باز نگهداشته شده اند، اما به طور متوسط در حدود ۱۵ درصد لاکتوز و ۴۵ درصد مواد معدنی از درون حفرات غشاء عبور کرده اند، اگر چه با گذشت زمان درصد عبور آنها کاهش یافته است. با ملاحظه این نتایج به خوبی درک می شود که کاهش ناگهانی شار در چند دقیقه اول فرآیند به دلیل تشکیل لایه پلاریزاسیون غلظت ناشی از پروتئین های مسیلی (کازئین) و چربی شیر است، اما توسعه گرفتگی و کاهش تدریجی شار در ادامه فرآیند نتیجه جذب اجزاء محلول (لاکتوز و املاح) به سطح غشاء و درون منافذ آن است (شکل های ۲ و ۴). نتایج اثر تغییرات دما بر درصد دفع هر یک از ترکیبات شیر در انتهای عملیات اولترافیلتراسیون مؤید این مطلب است که دمای فرآیند تأثیری بر درصد دفع پروتئین و چربی شیر ندارد، اما درصد دفع مواد معدنی و لاکتوز با افزایش دما از ۳۰ تا ۵۰ درجه سانتی گراد به طور جزئی کاهش یافته است (شکل ۷). به نظر می رسد علت افزایش جزئی درصد عبور اجزاء محلول کوچک بزرگتر شدن ضریب نفوذ آنها با افزایش دما باشد. اما نتایج این تحقیق نشان می دهد که افزایش گرفتگی برگشت ناپذیر با دما بستگی به درصد دفع اجزاء محلول شیر ندارد، بلکه احتمالاً امکان تشکیل پیوند های قوی تر بین مولکول ها در لایه مجاور سطح غشاء و نیز مولکول ها با غشاء و در نتیجه جذب سطحی شدید تر باشد (شکل ۵). در ضمن





منابع مورد استفاده

- 1- Cheryan, M. 1998. Ultrafiltration and microfiltration handbook. 2nd. Edition. Technomic publishing Com., Lancaster, USA.
- 2- Cheryan, M. and B.H. Chiang. 1986. Performance and fouling behavior of hollow fiber and spiral wound ultrafiltration module processing milk. Engineering and Food, 1: 191-197.
- 3- Eckner, K.F. and E.A. Zottola. 1993. Effects of temperature and pH during membrane concentration of skim milk on fouling and cleaning efficiency. Milchwissenschaft, 48(4), 187-191.
- 4- Eckner, K.F. and E.A. Zottola. 1992. Partitioning of skim milk components as a function of pH, acidulant and temperature during membrane processing. Journal of Dairy Science, 75(8), 2092-2097.
- 5- Fenton, M.R.I. 1972. Concentration and fractionation of skim milk by reverse osmosis and ultrafiltration. Journal of Dairy Science, 55(11), 1561-1566.
- 6- Grandison, A.S., W. Youravong, and M.J. Lewis. 2000. Hydrodynamic factors affecting flux and fouling during ultrafiltration of skimmed milk. Lait, 80, 165-174.
- 7- Kautake, M. 1992. Flux decline during ultrafiltration of liquid dairy products, Reports of Research Milk Products Laboratory, No.97, 67-151, Japan.
- 8- Kautake, M., H. Nabetani, and I. Matsuno. 1986. Influence of operation parameters on permeate flux in ultrafiltration of milks. Technical Research Institute, Snow Brand Milk Products Co. Ltd., Report No. 83, 67-81.
- 9- Kautake, M., I. Matsuno, H. Nabetani, and M. Nakajima. 1992. Classification of resistance to permeation caused by fouling during ultrafiltration of whey and skim milk. Bioscience, Biotechnology and Biochemistry, 56(5): 697-700.

- 10- Kapasimalis, D.J. and R.R. Zall. 1981. Ultrafiltration of skim milk at refrigerated temperature. *Journal of Dairy Science*, 64(10), 1945-1950.
- 11- Myong, K. Ko. and J. Pellegrino. 1992. Determination of osmotic pressure and fouling resistances and their effects on performance of ultrafiltration membrane. *Journal of Membrane Science*, 74, 141-157.
- 12- Pompei, C. 1973. Skim milk protein recovery and purification by ultrafiltration, Influence of temperature on permeation rate and retention. *Journal of Food Science*, 38(5): 867-870.
- 13- Ramachandar, R.H.G. 2002. Mechanisms of flux decline during ultrafiltration of dairy products and influence of pH on flux rates of whey and buttermilk. *Desalination*, 144, 319-324.
- 14- Rosenberg, M. 1995. Current and future applications for membrane processes in the dairy industry. *Trends in Food Science & Technology*, 6: 12-19.
- 15- Roy, N.K. and D.C. Sen. 1994. *Textbook of practical dairy chemistry*. Kalyani Publishers Co., Ludhiana, India.
- 16- Setti, D. and C. Peri. 1976. Whey and skim milk ultrafiltration. 2. Parameters affecting permeation rate in skimmilk ultrafiltration, *Milchwissenschaft*, 31(8): 466-469.
- 17- Suki, A. 1985. Flux decline in protein ultrafiltration. *Journal of Membrane Science*, 21: 269-282.
- 18- Thompson, S.J. and J.M. deMan. 1975. Concentration and fractionation of milk by ultrafiltration. *Canadian Institute of Food Science and Technology*, 82(2): 113-116.
- 19- Tong, P.S., D.M. Barbano, and M.A. Rudan. 1988. Characterization of proteinaceous membrane foulants and flux decline during early stages of whole milk ultrafiltration. *Journal of Dairy Science*, 71(3): 604-612.

Effect of Process Temperature on Milk Ultrafiltration Performance

Seyed M.A. Razavi¹

Abstract

The effect of process temperature (T) at three levels (30, 40 & 50 °C) on dynamic behaviour of permeate flux (J_p), total hydraulic resistance (R_T) and milk solutes rejection (protein, R_p ; fat, R_f ; lactose, R_L ; minerals, R_M and total solids, R_{TS}) have been studied. Experiments were carried out using a pilot plant UF membrane system equipped to a spiral wound module and a polysulfoneamide membrane. A three-stage strategy based on an resistance-in-series model (boundary layer-adsorption) was used to determine the different hydraulic resistances. The results showed that the J_p decreases greatly with increasing process time (t), both initial flux and pseudo steady state flux only increase between 30-40 °C and further increasing of T had no effect on fluxes. R_T increased during operation at all levels of T. Also increasing T led to increasing both R_T and irreversible fouling resistance, but reversible fouling resistance decreased and membrane hydraulic resistance did not change. The milk solutes rejection results showed that the R_p and R_f at each value of T was constant with t, whereas the R_L , R_M and R_{TS} increased significantly with t at the corresponding T. Meanwhile increasing T had no significant effect on the rejection of each solute at the end of operation

Key Words: Flux, Fouling, Milk, Performance, Rejection, Temperature, Ultrafiltration.