

بررسی عملکرد نانوفیلتراسیون در حذف یونهای آب پرس تفاله چغندر قند

مصطفی شهیدی نوقابی^{۱*} - سید محمد علی رضوی^۲ - سید محمود موسوی^۳ - محمد الهی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۲/۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۱/۲۵

چکیده

از مهمترین پتانسیل‌های غشاهای نانوفیلتراسیون حذف یون‌ها و پساب‌ها با اهداف مختلف است. از جمله این اهداف می‌توان به سختی زدائی از آب آشامیدنی، حذف یون‌های فلزات سنگین و تصفیه فاضلاب‌ها برای استفاده مجدد از آنها اشاره نمود. در این تحقیق از غشاء نانو فیلتراسیون برای حذف مهمترین یون‌های موجود در آب پرس تفاله چغندر قند (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^-) با هدف استفاده مجدد از آن استفاده شده است. اثر پارامترهای عملیاتی (دما و فشار) و غلظت بر پارامترهای کارایی فرآیند فیلتراسیون غشایی (شار تراوه، گرفتگی و درصد دفع اجزاء) مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که با افزایش دما شار تراوه، گرفتگی افزایش و درصد دفع یون‌ها کاهش می‌یابد و با افزایش اختلاف فشار، شار تراوه، گرفتگی و درصد دفع یون‌ها افزایش می‌یابد. هم‌چنین نتایج حاکی از آن است که افزایش بریکس، افزایش گرفتگی و کاهش شار و درصد دفع را به همراه خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: آب پرس تفاله چغندر، نانوفیلتراسیون، شار، گرفتگی، دفع یون‌ها

مقدمه

مصرف انرژی برای این عمل است (Timmer & Keurentjes, 1999).

یک از خواص مهم غشاهای NF این است که وقتی در تماس با محلول آبی قرار می‌گیرند در نتیجه تفکیک گروه‌های عملکردی سطح و یا جذب اجزاء محلول باردار، بطور جزئی باردار می‌شوند (Rautenbach & Gröschl, 1990; Tay et al., 2002). کارایی جداسازی غشاهای NF شدیداً وابسته به الگوی عملیات، مثل دیافیلتراسیون^۸ (Dutre & Tragardh, 1994) و خصوصیات اجزاء محلول از جمله قطبیت^۹، بار و میزان pH محلول است (Hagmeyer & Gimbel, 1998; Schaep et al., 1998a; Van der Bruggen et al., 1999; Xu, & Lebrun, 1999).

سه پارامتر برای عملیات واحد (نانوفیلتراسیون حیاتی تلقی می‌گردد. تراوش پذیری حلال^{۱۰} یا شار^{۱۱} از میان غشاء، گرفتگی و دفع اجزاء محلول^{۱۲}. شار (J) یا تراوش پذیری (شار به ازاء واحد فشار

نانوفیلتراسیون (NF) غشایی است که ما بین اولترافیلتراسیون (UF) و اسمز معکوس (RO) قرار می‌گیرد. تاریخچه غشاء NF به دهه ۱۹۷۰ بر می‌گردد، زمانی که غشاهای RO با شار بهتر و منطقی‌تر در فشارهای نسبتاً پائین گسترش یافت (Van der Bruggen, & Vandecasteele, 2003; Van der Bruggen et al., 2003). در نیمه دوم دهه ۱۹۸۰، اولین کاربرد نانوفیلتراسیون گزارش شد (Conlon et al., 1989; Eriksson, 1988). در این میان صنایع آب آشامیدنی، اصلی‌ترین مصرف‌کننده NF بود. دورنمای جدید برای تکنولوژی غشایی، استفاده مجدد از آب و کاهش

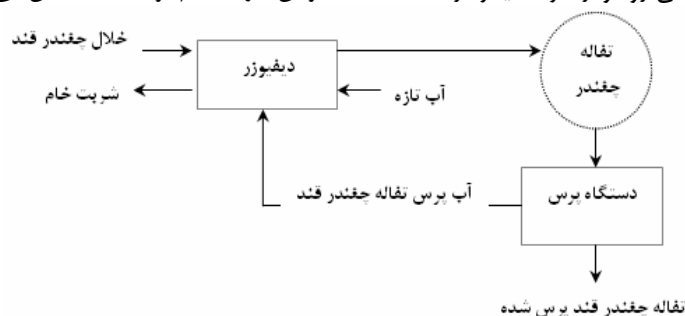
۱- دانشجوی سابق دکتری گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه فردوسی مشهد و استادیار پژوهشکده علوم و صنایع غذایی، مشهد
* - نویسنده مسئول: (Email: Shahidi_mostafa@yahoo.com)
۲ و ۴- استاد و استادیار گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استاد گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

- 8 - Diafiltration
- 9- Polarity
- 10- Solvent permeability
- 11- Flux
- 12- Solute Rejection

- 5 - Nanofiltration
- 6 - Ultrafiltration
- 7 - Revers Osmosis

قابل استحصال در این مرحله از دست می رود و از طرف دیگر درصد خلوص شربت خام تولیدشده کاهش می یابد.



شکل ۲- نحوه تولید آب پرس تفاله چغندر قند و استفاده مجدد از آن در دستگاه دیفیوزر (۶)

بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که فشار و محتوای مواد جامد سوسپانسیونی بالاتر، دفع را افزایش می دهد در حالی که مقادیر دفع، در قدرت یونی بالاتر تا حدودی کمتر است. Afonso و Yafiez در سال ۲۰۰۱ از سیستم غشایی NF برای تصفیه پساب حاصل از تولید خوراک ماهی استفاده نمودند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که NF میزان مواد آلی و نمک موجود در فاضلاب را کاهش می دهد. Wang و همکارانش (۲۰۰۲) جداسازی ساکاریدها را از محلول NaCl با استفاده از غشاء نانوفیلتراسیون (محصول شرکت Dow chemical) مورد مطالعه قرار داد. در این مطالعه آن ها به این نتیجه رسیدند که غلظت NaCl بر دفع گلوکز موثر است، در حالیکه دفع NaCl به وسیله گلوکز تحت تاثیر قرار نمی گیرد. Bargeman و همکاران (۲۰۰۵) نانوفیلتراسیون سیستم های چند جزئی به لحاظ بر همکنش بین ترکیبات باردار و بدون بار و اثر آن بر دفع این ترکیبات را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این پژوهشگران نشان می دهد که حضور یون های نمکی، خصوصاً آن هایی که کمتر توسط غشاء دفع می شوند، منجر به کاهش دفع ترکیبات خنثی (گلوکز) می شود و این کاهش دفع بستگی به نوع غشاء دارد. Mohammad و همکاران (۲۰۱۰)، نانوفیلتراسیون محلول گلوکز حاوی نمک ها را مورد بررسی قرار دادند. به عقیده این محققین درک نانوفیلتراسیون، خصوصاً دفع اجزاء محلول بدون بار، باردار و مخلوط آن ها، در به کارگیری آن در صنایع غذایی بسیار حیاتی است.

مواد و روش ها

در این تحقیق از یک سیستم پایلوت غشایی جریان عرضی NF برای فرآیند نانوفیلتراسیون آب پرس تفاله چغندر قند استفاده شد. همان طور که در شکل ۳ ملاحظه می شود این سیستم غشایی شامل یک تانک تغذیه [۱]، پمپ پیستونی [۲]، دبی سنچ [۳]، مدول غشاء NF^۱ [۴]، دو فشار سنچ عقربه ای [۵ و ۷]، مبدل حرارتی لوله ای [۹]،

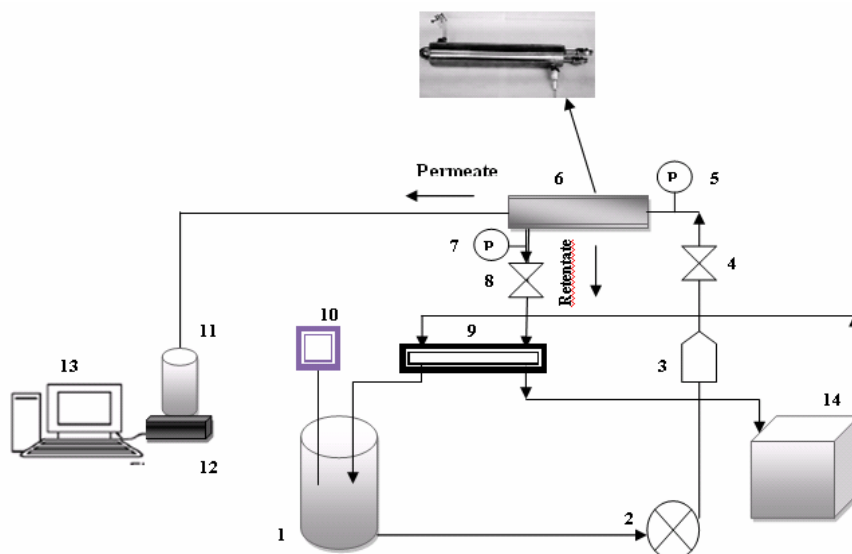
به طور کلی ورود هرگونه ناخالصی به دیفیوزر مطلوب نیست. اثر نامطلوب ورود ناخالصی به مرحله دیفیوزیون از دو دیدگاه حائز اهمیت است. اول اینکه این ناخالصی ها در استخراج ساکارز در دیفیوزر ایجاد اختلال می کنند و دوم اینکه برخی از آنها طی مراحل تصفیه شربت خام حذف نشده و در مرحله کریستالیزاسیون راندمان استحصال را کاهش می دهند. از آنجایی که هدف از این تحقیق حذف این ناخالصی ها است لذا حذف یون ها خصوصاً آنهایی که ضریب ملاس زایی بالا دارند در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است. بررسی منابع نشان می دهد که جریان آب پرس تفاله چغندر قند، چه از دیدگاه شیمیایی و شناخت ترکیبات موجود در آن و چه از دیدگاه تکنولوژی و اثر تصفیه آن بر راندمان کارخانه، چندان مورد توجه قرار نگرفته است. در تائید این موضوع شاید ذکر این نکته که تنها یک مقاله در زمینه تصفیه این آب و آن هم توسط غشاء اسمز معکوس تا کنون انتشار یافته است کفایت می کند. بنابراین نیاز به تحقیق در این زمینه به ویژه برای کشوری هم چون کشور ایران، که هم با کمبود آب مواجه بوده و استفاده مجدد آب در آن از اهمیت ویژه ای برخوردار است، و هم راندمان کارخانه های قند در آن کمتر از کشورهای صنعتی است، کاملاً محسوس است. با این حال تحقیقات گسترده ای در زمینه حذف ترکیبات مختلف و از جمله یون ها توسط نانوفیلتراسیون انجام شده است. به عنوان مثال می توان به بررسی های محققین برای سختی زدائی^۱ از آب، با استفاده از نانوفیلتراسیون اشاره داشت (Bergman, 1995; Schaep *et al.*, 1998b). Schaep و همکاران (۱۹۹۸b) از چند نوع غشاء نانوفیلتراسیون برای حذف سختی از آب استفاده کردند. آنها اعلام کردند که نانوفیلتراسیون بیش از ۹۰ درصد یون های چند ظرفیتی و حدود ۷۰-۶۰ درصد یون های تک ظرفیتی را دفع می کند. Visvanathan و همکاران (۱۹۹۸) اثر حضور یون ها، فشار عملیاتی، خوراک، pH و مواد جامد سوسپانسیونی بر خصوصیات دفع غشاء نانوفیلتراسیون را

ظروف ۲۰ لیتری تخلیه و درون سردخانه زیر صفر در دمای 20°C تا زمان انجام آزمایشات نگهداری گردید. برای انجام هر بار عملیات نانوفیلتراسیون آب پرس تفاله چغندر قند، ابتدا حدود ۲۰-۱۵ لیتر آب پرس تفاله چغندر قند یخ زدایی^۱ شده و دمای آن به دمای مورد نظر برای آن عملیات می‌رسید. در مرحله بعد شربت توسط صافی پارچه‌ای چهار لایه جهت حذف ذرات موجود در آن صاف می‌شد. سپس عملیات نانوفیلتراسیون آب پرس تفاله چغندر قند چغندر در ۵ مرحله زیر انجام می‌شد:

۱- فیلتراسیون آب مقطر از درون غشاء تمیز برای مدت ۱۵-۱۰ دقیقه

دماسنج دیجیتال [۱۰]، دو شیر کنترل جریان [۴ و ۸]، ظرف جمع آوری فاز تراوه [۱۱] یک ترازوی الکترونیکی قابل اتصال به کامپیوتر [۱۲]، کامپیوتر [۱۳] و هیتر برقی [۱۴] برای تنظیم دما محلول می‌باشد. مشخصات فنی سیستم غشایی در جدول ۱ به صورت خلاصه آورده شده است.

در این مطالعه، آب پرس تفاله چغندر قند به عنوان خوراک سیستم پیلوت NF از کارخانه قند آبکوه تهیه شد. به علت کوتاه بودن زمان بهره‌برداری کارخانجات قند، آب پرس تفاله چغندر قند به مقدار مورد نیاز برای کل پروژه خریداری و پس از اختلاط تمامی نمونه‌ها در تانکری با حجم بالا جهت اطمینان از یکنواخت شدن آنها، در



شکل ۳- شماتیک سیستم NF به کار گرفته شده جهت نانوفیلتراسیون آب پرس تفاله چغندر قند^۱

جدول ۱- مشخصات فنی سیستم پیلوتی غشاء نانوفیلتراسیون

نوع غشاء	AFC80
جنس غشاء	فیلم پلی آمید ^۲
سطح موثر غشاء	240 cm^2
قطر منافذ غشاء (۱۲)	0.68 nm
دامنه تحمل pH	۱/۵-۱۰/۵
دامنه تحمل دما	تا 70°C درجه سانتی‌گراد
حداکثر فشار قابل تحمل	۶۰ بار
خصوصیت دفع ظاهری ^۳ در محلول ۵ gr/l سدیم در فشار ۲۰ بار (۱۳)	۸۰٪ (NaCl)
نوع مدول	لوله ای ^۴ ، مدل MIC-RO 240

1- Defrosting & thawing

2 - Polyamide film

3 - Apparent Retention Character

4 - Tubular

درجه سانتی گراد) بر کارایی فرآیند نانوفیلتراسیون آب پرس تفاله چغندر قند (شار تراوه، گرفتگی غشاء و در صد دفع یون های سدیم، پتاسیم، منیزیم، کلسیم، کلر و سولفات) مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

همانطور که قبلا نیز بدان اشاره شد از پارامترهای مهم کارایی یک فرآیند غشایی شار تراوه، گرفتگی و درصد دفع اجزاء مورد نظراست. لذا در این تحقیق این موارد در تصفیه آب پرس تفاله در نظر گرفته شد و در این بخش به نتایج مربوط به آن اشاره می گردد.

اثر پارامترهای عملیاتی بر شار تراوه اثر غلظت

شکل ۴ اثر بریکس بر میزان شار تراوه نانوفیلتراسیون آب پرس تفاله چغندر قند را نشان می دهد. همان طور که از این شکل پیدا است، با افزایش بریکس شار تراوه کاهش می یابد. علت این رویداد این است که با افزایش غلظت، فشار اسمزی در سمت خوراک افزایش یافته و در نتیجه نیرو محرکه برای تراوش یافتن تراوه در عرض غشاء کاهش می یابد، چراکه در این حالت فشار اسمزی در جهت عکس اختلاف فشار عرضی (که توسط پمپ ایجاد می شود) عمل می کند. البته باید توجه داشت که با افزایش غلظت لایه پلاریزاسون غلظت نیز ضخیم تر تشکیل شده که می تواند در برابر عبور تراوه مقاومت نشان دهد. هم چنین با افزایش غلظت، عوال ایجاد گرفتگی در غشاء در نزدیکی سطح آن افزایش یافته و باعث گرفتگی بیشتر غشاء نسبت به غلظت های کمتر می شود و این موضوع نیز در کاهش شار تراوه با افزایش غلظت موثر است. نکته قابل توجه در این شکل این است که در بسیاری از حالات، شار از همان دقایق اولیه تقریباً به حالت پایا رسیده است. البته کاهش شار با زمان به مقدار کمی مشاهده می شود اما این کاهش چندان محسوس نیست.

اثر دما

نتایج حاصل از داده های آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش دمای خوراک ورودی، میزان شار تراوه آب پرس تفاله افزایش می یابد (شکل ۵). این موضوع به دلیل کاهش ویسکوزیته حلال و افزایش ضریب نفوذ حلال در غشاء و تحرک بیشتر زنجیره های پلی مری غشاء در دماهای بالاتر است (Wang et al., 2007). جدول ۲ ویسکوزیته آب پرس تفاله چغندر قند را در بریکس ها و دماهای مختلف نشان می دهد.

۲- فیلتراسیون نمونه آب پرس تفاله، از درون غشاء تمیز برای مدت ۶۰ دقیقه

۳- فیلتراسیون آب مقطر از درون غشاء مسدود شده برای مدت ۱۵-۱۰ دقیقه

۴- سیکل شستشوی در جا^۱ مطابق دستورالعمل شرکت تولید کننده غشاء.

۵- فیلتراسیون آب مقطر از درون غشاء شسته شده برای مدت ۱۵-۱۰ دقیقه.

شار آب مقطر و جریان فاز تراوه آب پرس تفاله چغندر قند بر حسب $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ در فواصل زمانی ۱ دقیقه ای و از طریق ثبت وزن آب مقطر / فاز تراوه توسط یک ترازوی دیجیتالی و سپس جاگذاری مقادیر حاصل در فرمول ۱ بدست می آمد (Decloux et al., 2000):

$$J = (W_2 - W_1) \div (t \times A) \quad (1)$$

W_1 : وزن خوانده شده در زمان t_1 (kg)

W_2 : وزن خوانده شده در زمان t_2 (kg)

t : فاصله زمانی بین خواندن دو وزن W_2, W_1 (s)

A : سطح غشاء (m^2)

هدف از مرحله اول و پنجم تعیین شار آب مقطر (J_w) و کنترل شار روزانه غشاء دستگاه بوده است. با توجه به داده های مرحله دوم، شار تراوه آب پرس تفاله چغندر قند (J_p) بدست می آید. هدف از مرحله سوم تعیین شار آب مقطر در غشاء مسدود شده (J_{WF}) و محاسبه درصد گرفتگی غشاء بر اساس فرمول ۲ بوده است (شهیدی، ۱۳۸۵).

$$\text{Fouling}(\%) = (1 - J_{WF} \div J_w) \times 100 \quad (2)$$

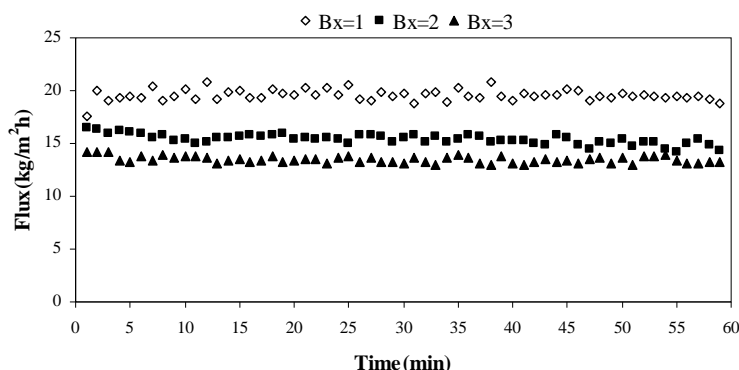
جهت بررسی درصد دفع یون های ملاس زای موجود در آب پرس تفاله چغندر قند، مقادیر یون های سدیم، پتاسیم و قبل و بعد از فرآیند نانوفیلتراسیون با استفاده از دستگاه بتالایزر (مدل Dr. Wolfgang، ساخت شرکت Kernchen، Germany) مرکز بررسی و تحقیقات چغندر قند خراسان رضوی اندازه گیری شد. کلسیم و منیزیم به روش تیتراسیون با EDTA و بر اساس دستورالعمل ICUMSA (Method GS7-19, 1994)، کلراید بر اساس دستورالعمل ICUMSA (Method GS8-11, 1994) و سولفات به روش کدورت سنجی و بر اساس دستورالعمل AOAC (Method 973.57) قبل و بعد از فرآیند نانوفیلتراسیون اندازه گیری شد و با توجه به فرمول ۳ درصد دفع یون های مذکور محاسبه گردید:

$$R = 1 - \frac{C_{m,2}^{ert}}{C_b} \times 100 \quad (3)$$

بطور خلاصه در این پروژه اثر عوامل مختلف فرآیند نانوفیلتراسیون نظیر اختلاف فشار در عرض غشاء (TMP) در ۳ سطح (۱۰، ۱۵ و ۲۰ بار)، دمای فرآیند در ۳ سطح (۲۵، ۴۰ و ۵۵

1- Cleaning-In-Place (CIP)

2- Transmembrane pressure (TMP)



شکل ۴- اثر درصد مواد جامد محلول بر شار تراوه آب پرس تفاله چغندر قند (دما ۵۵ °C و فشار ۱۵ بار)

جدول ۲- ویسکوزیته آب و آب پرس تفاله چغندر (بابریکس های مختلف) در دماهای مختلف

دما (°C)	آب پرس تفاله ($10^{-6}m^2s^{-1}$)			آب ($10^{-6}m^2s^{-1}$)
	بریکس ۱	بریکس ۲	بریکس ۳	
۲۵	۰/۹۰۵	۰/۹۲۸	۱/۰۲۳	۰/۸۸۴
۴۰	۰/۷۱۲	۰/۷۲۴	۰/۷۵۶	۰/۶۵۸
۵۵	۰/۵۶۰	۰/۶۰۵	۰/۶۱۱	۰/۵۱۷

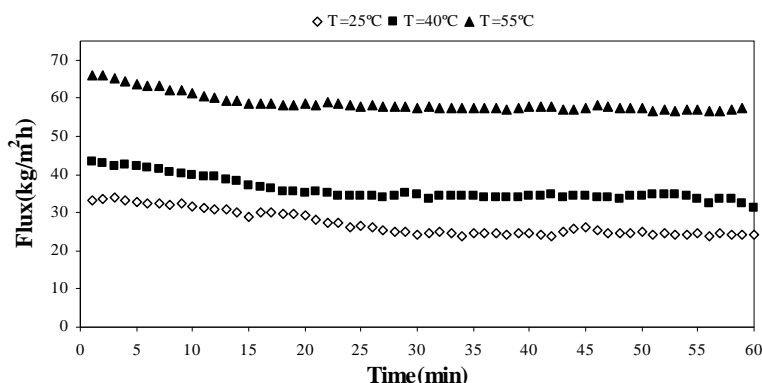
۵۵°C نیز قابل بررسی است.

Kaya و همکاران (۲۰۰۹) نیز نتایج مشابهی در زمینه اثر دما بر شار تراوه گزارش نموده اند. این محققین اثر pH، دما و فشار را بر رفتار شار نانوفیلتراسیون پس‌آب حاصل از CIP کارخانه تولید مواد شوینده مورد مطالعه قرار دادند. دو دمای ۲۵ و ۴۰ درجه در کار این محققین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مطالعات این محققین مویید نتایج حاصل تحقیق اخیر مبنی بر شدیدتر بودن میزان کاهش شار در دماهای بالاتر، نسبت به دماهای پایین تر است.

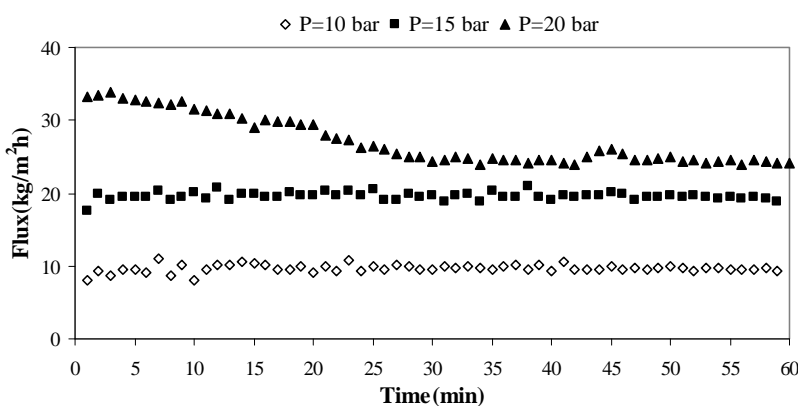
اثر اختلاف فشار

نانوفیلتراسیون جزء غشاءهایی است که نیرو محرکه آن اختلاف فشار عرضی می باشد. لذا با افزایش فشار، در واقع نیرو محرکه عملیات نانوفیلتراسیون افزایش می یابد و انتظار می رود شار تراوه نیز هم زمان با آن افزایش یابد. نتایج آزمایشات نشان داد که همان طور که انتظار می رود با افزایش فشار، شار تراوه نیز بیشتر می شود (شکل ۶). Fersi و Dhahbi (۲۰۰۸) نیز افزایش شار با افزایش فشار در طی نانوفیلتراسیون پس‌آب کارخانه نساجی را گزارش نموده اند. González و همکاران (۲۰۰۸)، مایع تخمیر اسید لاکتیک را به عنوان خوراک سیستم نانوفیلتراسیون AFC80، استفاده نمودند و افزایش خطی شار تراوه را با افزایش فشار گزارش نمودند.

درصد کاهش ویسکوزیته آب پرس تفاله با افزایش دما از ۲۵ به ۴۰ °C در درصد مواد جامد محلول ۱، ۲ و ۳ درصد به ترتیب ۲۱/۳۲، ۲۱/۹۸ و ۲۶/۰۹ درصد و با افزایش دما از ۴۰ به ۵۵ °C در درصد مواد جامد محلول ۱، ۲ و ۳ درصد به ترتیب ۲۱/۳۴، ۱۶/۴۳ و ۱۹/۱۷ درصد است. همین روند در مورد تغییر ویسکوزیته آب با افزایش دما مشاهده می شود. درصد کاهش ویسکوزیته آب با افزایش دما از ۲۵ به ۴۰ °C، ۲۵/۵ درصد و با افزایش دما از ۴۰ به ۵۵ °C، ۲۱/۴۲٪ است. همان طور که در جدول نیز مشاهده می شود در هر سه درصد مواد جامد محلول مورد بررسی، زمانی که دما از ۲۵ به ۴۰ °C افزایش می یابد نسبت به زمانی که دما از ۴۰ به ۵۵ °C می رسد، درصد کاهش ویسکوزیته بیشتر است. به عبارت دیگر اثر افزایش دما در کاهش ویسکوزیته آب در تغییر دما از ۲۵ به ۴۰ °C بیشتر از تغییر دما از ۴۰ به ۵۵ °C است. با این حال در بررسی اثر دما بر شار تراوه (شکل ۵) مشاهده می شود که با افزایش دما از ۴۰ به ۵۵ °C شار تراوه افزایش بیشتری نسبت به افزایش دما از ۲۵ به ۴۰ °C پیدا می کند. میانگین افزایش دما از ۲۵ به ۴۰ °C افزایش شار تراوه آب پرس تفاله حدود ۵۰/۹۱ درصد و با افزایش دما از ۴۰ به ۵۵ °C، افزایش شار تراوه ۵۴/۵۲ درصد است. بنابراین می توان گفت که در اینجا بزرگتر شدن اندازه منافذ در دمای ۵۵ °C در افزایش شار در این دما نقش مهمی ایفا کرده است. البته در این مورد تغییر ضریب نفوذ با افزایش دما از ۲۵ به ۴۰ °C نسبت به افزایش دما از ۴۰ به



شکل ۵- اثر دما بر شار تراوه آب پرس تفاله چغندر قند (درصد مواد جامد محلول ۱ درصد و فشار ۲۰ بار)



شکل ۶- اثر فشار بر شار تراوه آب پرس تفاله چغندر قند (بریکس ۱ و دمای ۲۵ °C)

برای غشاء مورد استفاده در این پایان نامه (AFC80)، پس از اعمال مرحله تر شدن و مرحله فشرده سازی غشاء، در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد و فشار ۱۲ بار حدود $23/5 \text{ L/m}^2\text{h}$ بود. در صورتی که مقدار این شار در تحقیقی که Warczok و همکاران (۲۰۰۴) انجام شد در دما و فشار مشابه حدود $27 \text{ L/m}^2\text{h}$ گزارش شده است. این اختلاف در شار آب مقطر در شرایط یکسان عملیاتی توجه محققان دیگری از جمله Mohammad و همکاران (۲۰۱۰) را نیز به خود جلب کرده است. به نظر می رسد این اختلاف احتمالا به دلیل فشار به کار گرفته شده در فشرده سازی اولیه غشاء است و احتمال می رود در این تحقیق این فشرده سازی در فشار بالاتری انجام گرفته است. در جدول ۳ میزان گرفتگی غشاء در شرایط عملیاتی متفاوت آورده شده است. همان طور که ملاحظه می شود با افزایش دما و فشار گرفتگی غشاء افزایش یافته است. نتایج مطالعات سایر محققین نیز نشان می دهد با افزایش دما و فشار میزان گرفتگی غشاء افزایش یافته است. نتایج مطالعات Kaya و همکارانش در سال ۲۰۰۹ نشان می دهد که

همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود در فشارهای پایین شار تراوه از همان ابتدا به حالت پایا می رسد اما در فشارهای بالاتر شار تراوه زمان بیشتری برای رسیدن به حالت پایا لازم است. Kaya و همکاران (۲۰۰۹) در تصفیه پساب حاصل از شستشوی درجا با استفاده از نانوفیلتراسیون به بررسی اثر فشار بر شار تراوه نیز پرداختند. آن ها شار غشاء FM NP010 را در چهار فشار (۸، ۱۲، ۱۶ و ۲۰ بار) مورد مقایسه قرار دادند. نتایج این تحقیق ایم محققین نیز نشان داد مقادیر کاهش شار در فشارهای پایین تر (۸ و ۱۲ بار) ناچیز و در فشارهای بالاتر (۱۶ و ۲۰ بار) قابل ملاحظه است.

اثر پارامترهای عملیاتی بر گرفتگی

همان طور که در مبحث مواد و روش ها عنوان شد جهت ارزیابی میزان گرفتگی غشاء در طی عملیات نانوفیلتراسیون شار آب مقطر قبل و بعد از انجام عملیات اندازه گیری شد. نکته ای که در بررسی منابع قابل توجه بود این است که شار آب مقطر اندازه گیری شده

مکانیسم دفع الکتروستاتیک کاهش می‌یابد (Schäfer *et al.*, 2000). به همین دلیل است که در برخی از مطالعات محققین که pH محلول خوراک را تغییر داده اند دفع نیز تغییر کرده است. البته همان طور که در شکل ۷ مشخص است میزان تاثیر افزایش غلظت در کاهش درصد دفع در مورد یون های تک ظرفیتی بیشتر است. درصد دفع یون های دو ظرفیتی (سولفات، کلسیم و منیزیم) بیشتر از یون های تک ظرفیتی (کلراید، سدیم و پتاسیم) است. درصد دفع سولفات بیشتر از کلسیم و منیزیم است زیرا دارای بار همانام با غشاء است. با دفع آنیون هایی مثل سولفات برای حفظ تعادل بار، یون های با بار مثبت نیز دفع می‌شوند (اثر دونان). درصد دفع کلر بیشتر از سدیم و درصد دفع سدیم بیشتر از پتاسیم است. به نظر می‌رسد چند عامل در این مورد دخیل باشند. اولین عامل بار یون است. عامل دوم شعاع یون و ضریب نفوذ آنها است. شعاع یون سدیم بیشتر از پتاسیم است اما ضریب نفوذ آن کمتر از پتاسیم است لذا انتظار می‌رود دفع یون سدیم نزدیک به یون پتاسیم باشد. در مورد کلسیم هم شعاع آن بزرگتر از این دو یون است و هم ضریب نفوذ آن کمتر است، لذا با توجه به بار بیشتر آن درصد دفع بالاتر این یون کاملاً قابل انتظار بود. با توجه به شعاع یون و ضریب نفوذ آن تا حدودی می‌توان بیشتر یا کمتر بودن درصد دفع یون ها را نسبت به هم تفسیر نمود. در یک غشاء دارای بار منفی، هر چه بار آنیونی جزء محلول بیش تر باشد، دفع آن توسط غشاء بالاتر خواهد بود که این امر به علت نیروهای دافعه الکتروستاتیک بیش تر بین جزء محلول و غشاء است. به تبع دفع آنیون، بر اساس تعادل دونان دفع کاتیون نیز افزایش می‌یابد.

در تائید نتایج حاصل از این تحقیق Bargeman و همکاران در سال ۲۰۰۵ گزارش کردند دفع NaCl با افزایش غلظت نمک کاهش می‌یابد. Wang و همکاران در سال ۲۰۰۲ به این نتیجه رسیدند که با افزایش غلظت کلرید سدیم، دفع و شار تراوه در فشارهای مختلف، کاهش می‌یابد. Wang و همکاران در سال ۲۰۰۲ اثر غلظت ساکاریدها بر دفع NaCl را بررسی کردند و گزارش نمودند که دفع NaCl توسط غشاء (غشاء مورد استفاده آنها NF45 بود) تقریباً در غلظت های مختلف ساکاریدها ثابت است. این محققین عنوان نمودند که علت این امر احتمالاً این است که ساکاریدها مولکول هایی خنثی هستند، و بنابراین اثری بر ساختار منافذ غشاء نمی‌گذارند و به همین دلیل به طور کلی می‌توان گفت دفع NaCl توسط غشاء NF45، تنها به برهمکنش اکروستاتیک بین یون ها و بارهای غشاء بستگی دارد. البته باید توجه داشت که ترکیبات خنثی با تاثیر بر ویسکوزیته محلول می‌توانند بر درصد دفع اجزاء باردار تاثیر بگذارند. بسته به ساختار منفذ غشاءهای NF، وزن مولکولی اجزاء محلول خنثی قابل جداسازی در آنها در دامنه چند صد تا چند هزار دالتون است (Palmeri *et al.*, 1999).

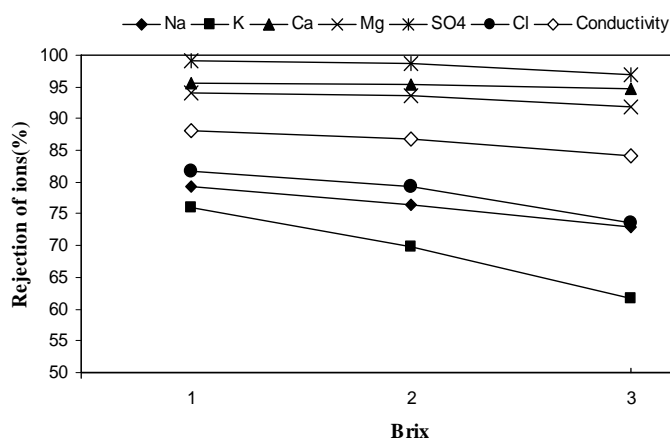
کاهش شار ناشی از گرفتگی در دمای 40°C به طور قابل ملاحظه ای بیش تر از دمای 25°C است. لذا همان طور که نتایج این محقق و تحقیق انجام گرفته نشان می‌دهد با افزایش دما گرفتگی غشاء افزایش می‌یابد و علت این امر احتمالاً اثر دمای بالاتر بر مقدار مواد رسوب کرده در داخل منافذ و روی سطح غشاء است. همان طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود با افزایش فشار گرفتگی غشاء افزایش یافته است. یکی از دلالتی که می‌توان برای افزایش گرفتگی با افزایش فشار متصور شد این است که در هنگام به کارگیری فشارهای بالا، غشاء تا حدودی فشرده می‌شود. این فشرده شدن غشاء ممکن است بر روی شار آب مقطر پس از عملیات فیلتراسیون خوراک اصلی، تاثیر گذاشته و آن را کاهش دهد و بنابراین چون در فرمول تعیین گرفتگی نسبت اختلاف فشار آب مقطر قبل و بعد از فیلتراسیون آب پرس را بر شار آب مقطر قبل از عملیات محاسبه می‌کنیم، این موضوع باعث افزایش اختلاف شار آب مقطر در قبل و بعد از نانوفیلتراسیون شده و تا حدودی باعث افزایش یافتن عدد گزارش شده برای گرفتگی گردد. علاوه بر این می‌توان گفت که فشارهای بالا می‌توانند ذراتی را که قطری معادل منافذ غشاء دارند را با اعمال نیرو وارد منافذ غشاء کنند که این ذرات باعث مسدود شدن منافذ می‌شوند. هم چنین با افزایش فشار، غلظت ترکیبات خوراک در سطح غشاء افزایش می‌یابد (لایه پلاریزاسیون غلظت ضخیم تر می‌شود) و این امر نیز باعث می‌شود ترکیباتی که عامل گرفتگی در غشاء هستند بیشتر در تماس با غشاء قرار گرفته و باعث تشدید گرفتگی گردند. افزایش گرفتگی با افزایش غلظت ترکیبات خوراک ورودی قابل پیش بینی است زیرا هر چه غلظت ترکیباتی که عامل گرفتگی در غشاء هستند بیشتر باشد مسلماً در زمان معین (۶۰ دقیقه فیلتراسیون در این پروژه) میزان گرفتگی غشاء بیشتر خواهد بود. برای روشن تر شدن اثر درصد مواد جامد محلول، دما و فشار بر درصد گرفتگی غشاء نانوفیلتراسیون آب پرس تفاله چغندر قند میانگین گرفتگی در هر مورد به صورت کلی در جدول ۳ نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، به طور کلی گرفتگی غشاء نانوفیلتراسیون AFC80 در عملیات فیلتراسیون آب پرس تفاله چغندر قند چندان زیاد نیست و این به لحاظ صنعتی شدن این فرآیند امتیاز خوبی محسوب می‌شود.

اثر پارامترهای عملیاتی بر درصد دفع یون ها و هدایت الکتریکی اثر غلظت

نتایج حاصل از داده های تجربی نشان داد که با افزایش غلظت آب پرس تفاله، درصد دفع یون های مختلف کاهش می‌یابد (شکل ۷). این امر احتمالاً در نتیجه پوشش یافتن بار^۱ است که در نتیجه آن

جدول ۳- درصد گرفتگی در غلظت ها و شرایط عملیاتی مختلف (هر یک از مقادیر میانگین حداقل ۳ داده است)

گرفتگی (%)	
۷/۷۵	۱
۱۰/۵۷	۲
۱۱/۴۴	۳
درصد مواد جامد محلول (بر حسب بریکس)	
۹/۲۱	۲۵
۹/۷۹	۴۰
۱۰/۷۶	۵۵
دما (° C)	
۹/۲۷	۱۰
۹/۷۴	۱۵
۱۰/۷۵	۲۰
فشار (bar)	



شکل ۷- درصد دفع یون ها و هدایت الکتریکی در طی نانوفیلتراسیون آب پرس تفاله چغندر قند در درصد های مختلف مواد جامد محلول

ها می شود، اما تاثیر آن بر یون سولفات، کلسیم و منیزیم کمتر از کلر، سدیم و پتاسیم است.

در زمینه کاهش درصد دفع یون ها با افزایش دما چند عامل را می توان بر شمرد. یکی از این عوامل این است که با افزایش دما، ویسکوزیته کاهش و ضریب نفوذ جزء محلول افزایش می یابد. از طرفی افزایش دما باعث افزایش قطر منافذ غشاء (خصوصاً غشاء های پلی مری) شده و لذا مقاومت غشاء در برابر عبور جزء محلول کاهش و در نتیجه شار آن جزء افزایش می یابد.

اثر اختلاف فشار عملیاتی

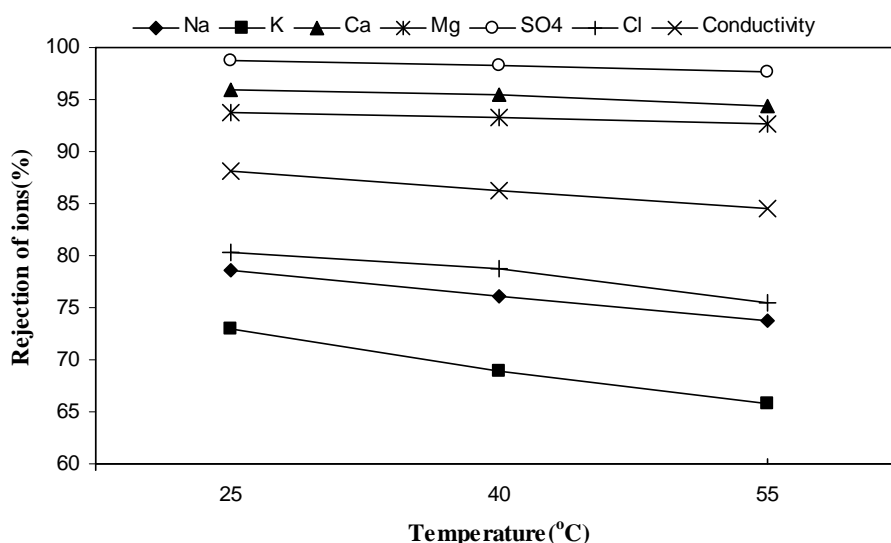
با افزایش فشار عملیاتی درصد دفع یون های آب پرس تفاله چغندر افزایش پیدا کرد (شکل ۹). افزایش فشار معمولاً منجر به افزایش کارایی جداسازی (حذف) در غشاء می شود. البته اثر فشار بر دفع در تمام غشاءها معنی دار نیست.

از طرفی دفع نمک به وسیله این غشاها بر مبنای برهمکنش های الکتروستاتیک بین یون ها در محلول و منافذ باردار غشاء است. لذا در یک محلول واقعی هم چون آب پرس تفاله، که ترکیبات یونی و غیر یونی مختلفی در آن وجود دارد عوامل مختلفی درمیزان درصد دفع اجزاء دخالت خواهند داشت.

Schäfer و همکاران در سال ۲۰۰۴ اثر غلظت کلسیم را بر دفع یا انتقال دیگر گونه های محلول (سدیم و مواد ارگانیک) معنی دار توصیف کرد. اعتقاد این محققین بر این بود که این اثر در نتیجه بیشتر شدن ایجاد کمپلکس و گرفتگی توسط کلسیم در مورد مواد آلی و هم چنین اثر آن بر خنثی سازی (اثر دونان) در مورد سدیم است.

اثر دما

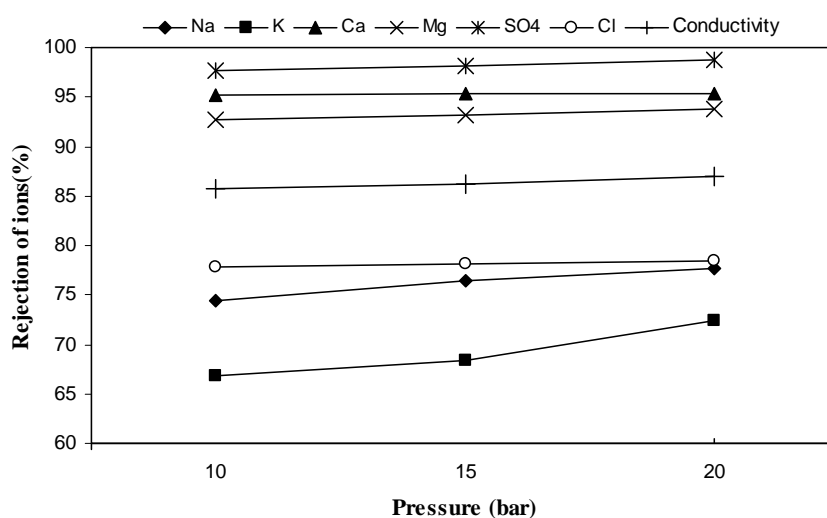
همان طور که در شکل ۸ مشاهده می شود، بالا رفتن دمای خوراک در همه حالات باعث پایین آمدن درصد دفع یون ها و نمک



شکل ۸- درصد دفع یون ها و هدایت الکتریکی در طی نانوفیلتراسیون آب پرس تفاله چغندر قند در دماهای مختلف فرآیند

می شود. از طرف دیگر با افزایش فشار و افزایش شار آب، یون های بیش تری به سمت سطح غشاء انتقال داده می شوند. با افزایش شار تراوه، پلاریزاسیون غلظت نیز تشدید می شود و این مسئله باعث کاهش دفع یون خواهد شد (Seidel *et al.*, 2002). با وجود چنین تفسیرهایی می توان نتیجه گیری کرد که افزایش یا کاهش یافتن درصد دفع جزء محلول بستگی به این دارد که کدام مکانیسم فوق الذکر در آزمایشات تجربی اهمیت بیش تری داشته و کدامیک اهمیت کمتری دارد. واو و همکاران در تفسیر افزایش درصد دفع یون های ایندیوم، اشاره به کم اهمیت تر بودن اثر دوم در آزمایشات خود دارد.

به عنوان مثال Wu و همکاران در سال ۲۰۰۴ به بررسی اثر پارامترهای عملیاتی بر دفع یون ایندیوم در سه نوع غشاء نانوفیلتراسیون (ES10C و ES10، NRT 7450) پرداختند. نتایج این محققین حاکی از آن است که افزایش فشار باعث افزایش دفع در هر سه نوع غشاء می شود اما این افزایش در غشاء ES10C با اهمیت نیست. دانشمندان معتقدند که با افزایش فشار، شار حلال (در اینجا آب) افزایش می یابد. در حالی که شار یون که هم به صورت ممانعت فضایی و هم ممانعت الکتریکی توسط غشاء باز نگه داشته می شود به همان نسبت افزایش نمی یابد. این موضوع باعث کاهش غلظت یون در فاز تراوه (که به آن اثر رقیق شدن می گویند)



شکل ۹- درصد دفع یون ها و هدایت الکتریکی در طی نانوفیلتراسیون آب پرس تفاله چغندر قند در اختلاف فشارهای عرضی مختلف

با بار غشاء فاکتوری موثر در دفع الکترولیت های آنها محسوب می شود. ظرفیت بالاتر یون های همنام، دافعه قوی تری با بار غشاء ایجاد کرده و دفع بیش تر آن الکترولیت را به همراه خواهد داشت. در مورد دو الکترولیت که بارهای مشابه و همنام دارند، جاذبه یون غیرهمنام آن الکترولیت و غشاء فاکتور کنترل کننده ثانوی، برای دفع الکترولیت خواهد بود و هر چه یون غیرهمنام ظرفیت بالاتری داشته باشد، جاذبه قوی تر و در نتیجه دفع الکترولیت کمتر خواهد بود (Wang *et al.*, 2002). Fersi و Dhahbi (۲۰۰۸) افزایش درصد دفع هدایت را با افزایش اختلاف فشار عملیاتی در نانوفیلتراسیون پساب کارخانه نساجی گزارش نمود. آنها گزارش نمودند که با افزایش فشار تا ۹ بار درصد دفع افزایش و پس از آن با افزایش فشار دفع تقریباً ثابت می ماند. هم چنین این محققین مقادیر دفع بالایی برای یون های دو ظرفیتی منیزیم (>۹۵٪) و سولفات (>۹۸٪) گزارش نمودند. آنها دفع یون های تک ظرفیتی را کمتر از یون های دو ظرفیتی گزارش نمودند و علت آن را وزن مولکولی پایین تر این یون ها بیان کردند.

Mohammad و همکاران (۲۰۱۰) نیز نشان دادند که با افزایش فشار دفع NaCl افزایش می یابد. البته نتایج این پژوهشگران حاکی از آن است که اثر فشار بر دفع NaCl در غلظت های پائین نمک، معنی دار نیست. این امر احتمالاً به این علت است که مکانیسم انتقال در فشارهای پائین اساساً بر اساس نفوذ است. نتایج این تحقیق منطبق بر روند مشاهده شده در مطالعات Wang و همکاران (۲۰۰۲) در زمینه اثر فشار بر دفع الکترولیت های آنیونی تک ظرفیتی و دو ظرفیتی بود. این محققین عنوان کردند که درصد دفع برای الکترولیت های دو ظرفیتی بالای ۹۰ درصد است و با افزایش فشار درصد دفع آن ها با شیب کمتری نسبت به الکترولیت های تک ظرفیتی افزایش می یابد. دفع NaCl و KCl تقریباً مشابه گزارش شده است که در این تحقیق دفع سدیم کمی بیش تر از پتاسیم گزارش شده است. اما دفع این دو یون تقریباً نزدیک به هم است و اختلاف چندانی در آن مشاهده نمی شود. این موضوع را می توان از طریق بر همکنش های الکتروستاتیک (به عبارت دیگر جاذبه و دافعه) بین یون های الکترولیت و بار غشاء توضیح داد. غشاء AFC80 در لایه نازک فعال خود در pH حدود ۵/۵-۶ دارای اندکی بار منفی است. در نتیجه دفع یون های هم نام

منابع

- شهیدی نوقابی، م. ۱۳۸۵. به کارگیری اولترافیلتراسیون در کاهش رنگ و بهبود کیفیت شربت رقیق حاصل از چغندر قند، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
- Afonso, M., and Yafiez R., 2001, Nanofiltration of wastewater from the fishmeal industry, *Desalination*, 139: 429.
- AOAC, "Official Methods of Analysis of AOAC INTERNATIONAL(2005) 18th ed, Vol 1. AOAC INTERNATIONAL, Gaithersburg, MD, USA, Official Methods.
- Bergman, R. A., 1995, Membrane softening versus lime softening in Flodda--a cost comparison update. *Desalination*, 102: 11-24.
- Bargeman, G., Vollenbroek, J. M., Straatsma, J., Schroën, C. G. P. H., Boom, R. M., 2005, Nanofiltration of multi-component feeds. Interactions between neutral and charged components and their effect on retention *Journal of Membrane Science* 247: 11-20
- Bogliolo, M., Bottino, A., Capanneli, G., De Petro, M., Servida, A., 1996, Clean water recycle in sugar extraction process: Performance analysis of revers osmosis in treatment of sugar beet press water. *Desalination* 108: 261-271.
- Conlon, W. J., and McClellan, S. A., 1989, Membrane softening: treatment process comes of age, *J. AWWA*, 81(11): 47-51.
- Decloux, M., Tatoud, L., and Mersad, A., 2000 Removal of colorants and polysaccharides from raw cane sugar remelts by ultrafiltration. *Zuckerindustrie*, 125:106-112.
- Dutre, B., and Tragardh, G., 1994, Macrosolute-microsolute separation by ultrafiltration: a review of diafiltration processes and applications, *Desalination* 95: 227-267.
- Eriksson, P., 1988, Nanofiltration extends the range of membrane filtration. *Environ. Prog.*, 7(1): 58-62.
- Fersi, C., and Dhahbi, M., 2008, Treatment of textile plant effluent by ultrafiltration and/or nanofiltration for water reuse. *Desalination* 222, 263-271.
- González, M. I., Alvarez, S., Rieraa, F. A., and Álvarez, R., 2008, Lactic acid recovery from whey ultrafiltrate fermentation broths and artificial solutions by nanofiltration. *Desalination* 228, 84-96.
- Guilbaud, J., Massé, A., Andrès, Y., Combe, F., Laundry, P. J., 2010, Water recycling ginship by direct nanofiltration with tubular membranes. *Resources, Conservation and Recycling*. xxx: xxx-xxx
- Hagmeyer, G., and Gimbel, R., 1998, Modeling the salt rejection of nanofiltration membranes for ternary ion mixtures and for single salts at different pH values, *Desalination* 117: 247-256.
- Her, N., Amy, G., and Jarusutthirak, C., 2000, Seasonal variations of nanofiltration (NF) foulants: Identification and control. *Desalination* 132(1-3): 143-160.

- Huang, R. Y. M., 1991, Pervaporation membrane separation processes, Elsevier, Amsterdam.
- ICUMSA., 2000, International Commission for Uniform Methodes of Sugar Analysis. Methods Book.
- Kaya, Y., Barlas, H., Arayici, S., 2009, Nanofiltration of Cleaning-in-Place (CIP) wastewater in a detergent plant: Effects of pH, temperature and transmembrane pressure on flux behavior. *Separation and Purification Technology*. 65: 117–129.
- Lee, S., and Lee, C. H., 2000, Effect of operating conditions on CaSO₄ scale formation mechanism in nanofiltration for water softening. *Water Res.* 34(15): 3854–3866.
- Mohammad, A. W., Kadir Basha, R., Leo, C. P., 2010, Nanofiltration of glucose solution containing salts: Effects of membrane characteristics, organic component and salts on retention. *Journal of Food Engineering*, 97: 510–518.
- Mulder, M., 1991 Basic principles of membrane technology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Palmeri, J., Blanc, P., Larbot, A., and David, P., 1999, Theory of pressure-driven transport of neutral solutes and ions in porous ceramic nanofiltration membranes, *J. Membr. Sci.* 160: 141–170.
- Rautenbach, R., and Gröschl, A., 1990, Separation potential of nanofiltration membranes, *Desalination* 77: 73-84.
- Schaep, J., Van der Bruggen, B., Vandecasteele, C., and Wilms, D., 1998a, Influence of ion size and charge in nanofiltration, *Separation Purification Technol.* 14: 155–162.
- Schaep, J., Van der Bruggen, B., Uytterhoeven, S., Croux, R., Vandecasteele, C., Wilms, D., Van Houtte, E., and Vanlerberghe, F., 1998b, Removal of hardness from groundwater by nanofiltration, *Desalination*, 119: 295-302.
- Schäfer, A. I., Fane, A. G., and Waite, T., 2000, Fouling effects on rejection in the membrane filtration of natural waters, *Desalination*, 131: 215.
- Seidel, A., Waypa, J., and Elimelech, M., 2002, Role of charge (Donna) exclusion in removal of arsenic from water by a negatively charged porous nanofiltration membrane, *Environ. Eng. Sci.* 18 (2): 105.
- Sombekke, H. D. M., Voorhoeve, D. K., and Hiemstra, P., 1997, Environmental impact assessment of groundwater treatment with nanofiltration, *Desalination*, 113: 293-296.
- Tay, J. H., Liu, J., and Sun, D. D., 2002, Effect of solution physic–chemistry on the charge property of nanofiltration membranes. *Water Research*. 36: 585–598.
- Timmer, J. M. K., 2001, Properties of nanofiltration membranes ; model development and industrial application. Timmer. - Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven.
- Timmer, J. M. K., Keurentjes, J. T. F., 1999, Mogelijkheden van energiebesparing in de industrie door toepassing van membraanfiltratie, nanofiltratie in het bijzonder, report MINT-project 3385.02/04.83 Ontwikkeling van engineering-tools die de implementatie en optimalisatie van nanofiltratieprocessen in de industrie op eenvoudige wijze ondersteunen, NOVEM, Utrecht.
- Van der Bruggen, B., Schaep, J., Wilms, D., and Vandecasteele, C., 1999, Influence of molecular size, polarity and charge on retention of organic molecules by nanofiltration, *J. Membr. Sci.* 156: 29–41.
- Van der Bruggen, B., and Vandecasteele, C., 2002, Distillation vs. membrane filtration: overview of process evolutions in seawater desalination, *Desalination*, 143: 207-218.
- Van der Bruggen, B., and Vandecasteele, C., 2003, Removal of pollutant from surface water and ground water by nanofiltration: overview of possible application in the drinking water industry, *Environ. Pollution*, 435–445.
- Van der Bruggen, B., Hawrijk, I., Cornelissen, E., and Vandecasteele, V., 2003, Direct nanofiltration of surface water using capillary membranes: comparison with flat sheet membranes, *Separ. Purif. Technol.*, 31: 193–201.
- Visvanathan, C., Marsono, B., and Basu, B., 1998, Removal of THMP by nanofiltration: effects of interference parameters, *Water Res.*, 32(12): 3527-3538.
- Vrouwenvelder, H. S., Van Paassen, J. A. M., Folmer, H. C., Hofman, J. A. M. H., Nederlof, M. M., and Van der Kooij, D., 1998, Biofouling of membranes for drinking water production. *Desalination* 118(1–3): 157–166.
- Wang, X. L., Wang, W. N., and Wang, D. X., 2002a, Experimental investigation on separation performance of nanofiltration membranes for inorganic electrolyte solutions. *Desalination*, 145: 115–122.
- Wang, X. L., Zhang, C., and Ouyang, P., 2002b, The possibility of separating saccharides from a NaCl solution by using nanofiltration in diafiltration mode. *Journal of Membrane Science* 204: 271–281.
- Wang, Z., Liu, G., Fan, Z., Yang, X., Wang, J., and Wang, S., 2007, Experimental study on treatment of electroplating wastewater by nanofiltration, *J. Membr. Sci.* 305: 185–195.
- Warczak J., Ferrando, M., López, F., and Güell C., 2004, Concentration of apple and pear juices by nanofiltration at low pressures. *Journal of Food Engineering*. 63: 63–70.
- Waypa, J., Elimelech, M., and Hering, J., 1997, Arsenic removal by RO and NF membranes, *J. AWWA*, 89(10): 102-114.
- Wiesner, M. R., and Chellam, S., 1999, The promise of membrane technologies. *Environ. Sci. Technol.* 33(17): 360A–366A.
- Wu, M., Sun, D. D., and Tay, J. H., 2004, Effect of operating variables on rejection of indium using nanofiltration membranes. *Journal of Membrane Science* 240, 105–111.
- Xu, Y., and Lebrun, R. E., 1999, Investigation of the solute separation by charged nanofiltration membrane: effect of pH, ionic strength and solute type, *J. Membr. Sci.* 158: 93–104.