

بررسی تأثیر عوامل مختلف عملیاتی بر لایه قطبش غلظتی در غشاهای سرامیکی

هانیه شکرکار^۱، نوراله کثیری^{۱*}، تورج محمدی^۲

۱- تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، آزمایشگاه تحقیقاتی مهندسی فرایند با کمک کامپیوتر

۲- تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، آزمایشگاه تحقیقاتی فرایندهای جداسازی

پیام نگار: capepub@cape.iust.ac.ir

چکیده

با توجه به استفاده وسیع از غشاهای ریزصاف‌کن در مقیاس صنعتی لزوم مدلسازی فرایندهای غشایی با ابزارهای دقیق امری مهم و اجتناب ناپذیر است. فرایند ریزصاف‌کردن یکی از فرایندهای غشایی است که جهت انواع خاصی از جداسازیها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله تصفیه پساب نفتی توسط غشای سرامیکی مطالعه شده و یک روش تقریبی جدید برای مدلسازی ضخامت لایه قطبش غلظتی (δ_c) ارائه شده است. تأثیر عوامل مختلف مانند اختلاف فشار اعمال شده در دو طرف غشای (P)، سرعت جریان عرضی (CFV)، دما (T)، غلظت روغن در پساب سنتزی (C_F) و مدت صاف کردن (t) بر نمودار غلظت و ضخامت لایه قطبش غلظتی بررسی شده است. در این تحقیق معادله (انتقال - نفوذ) توسط روش المان محدود حل شده است و چنانکه مشاهده خواهد شد پیش بینی مدل تطابق خوبی با رفتار مورد انتظار را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: مدلسازی، ریزصاف‌کردن، قطبش غلظتی، المان محدود

۱- مقدمه

هرچه عمیق‌تر مکانیسمهای جاری در این فرایندها امکان توسعه مدل‌های مکانیسمی از این فرایندها را هر چه بیشتر ممکن می‌سازد. سرعت سیال در سطح غشاء حتی هنگامی که جریان سیال در غشاء متلاطم باشد، کاهش می‌یابد و در واقع در سطح غشاء لایه مرزی با اختلاط نسبتاً ضعیف شکل می‌گیرد و اجزای دفع شده در نزدیکی سطح غشاء انباشته می‌شوند. این انباشتگی در سطح غشاء را قطبش غلظتی می‌نامند. قطبش غلظتی یک پدیده برگشت‌پذیر است بدین معنا که با تغییر عوامل مؤثر بر آن، شدت این پدیده نیز کم یا زیاد می‌شود. این پدیده بیشتر تابع شرایط هیدرودینامیکی سیستم (سیال - غشاء) است. اثر پدیده قطبش غلظتی کاهش شار در لحظات

ریزصاف‌کردن به فرایندهای جداسازی که توسط غشاهای متخلخل برای جداسازی ذرات معلق که دارای قطری در حدود ۰/۱ تا ۱۰ میکرومتر می‌باشند گفته می‌شود. غشاهای ریزصاف‌کردن (MF) یکی از پرمصرف‌ترین غشاهای موجود می‌باشند. از این نوع غشاهای در تصفیه آب آشامیدنی، صنایع داروسازی، صنایع الکترونیکی و صاف‌کردن محلول های خوراکی استفاده می‌شود. توسعه و تعمیق شناخت از فرایندهای غشایی از جمله MF به واسطه نکات مهم موجود در آن از طریق مدل‌سازی و شبیه‌سازی مستلزم دسترسی به مدل‌هایی است که از دقت قابل توجهی برخوردار باشند. شناخت

مدول غشایی استفاده شده از جنس تفلون و به صورت لوله‌ای است. طول این مدول ۳۰ cm است و غشاهای لوله‌ای به کمک دو (O-ring) و دو واشر تفلونی درون سلول غشایی قرار می‌گیرند و آب‌بندی می‌شوند. مدول، سطح مؤثری برابر با ۰/۱۱ متر مربع از غشاء برای عبور جریان محصول ایجاد می‌نماید. جهت ساخت غشای مولیت از کائولن استفاده شده و آنالیز شیمیایی کائولن در جدول (۱) گزارش شده است.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی کائولن استفاده شده

جهت ساخت غشای مولیت

ترکیبات	درصد	فازها	درصد	آنالیز دانه‌بندی	درصد
SiO ₂	۶۱/۶۲	کائولینیت	۶۴	< 32 μ	۱۰۰
TiO ₂	۰/۴۰	کلسیت	۲/۴	< 20 μ	۹۹
Al ₂ O ₃	۲۴-۲۵	کوارتز	۲۷	< 2 μ	۴۵
Fe ₂ O ₃	۰/۴۵-۰/۶۵	سایر	۶/۶		
K ₂ O	۰/۴۰				
Na ₂ O	۰/۵۰				
L.O.I	۹/۵-۱۰				
کل	۱۰۰	کل	۱۰۰		

موادی که برای ساخت پساب سنتزی استفاده شده اند عبارتند از آب مقطر یکبار تقطیر شده، میعانات گازی چاه‌های گاز سراج قه و امولسیون‌ساز (Triton X-100).

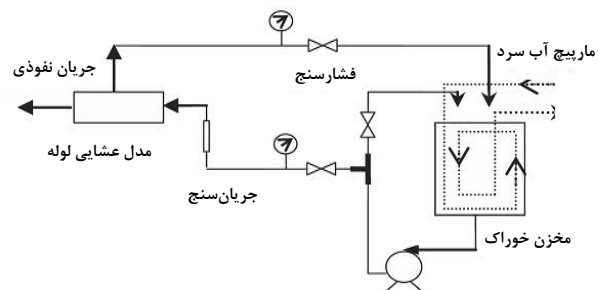
علت استفاده از میعانات گازی سراج قه به عنوان فاز روغنی این بوده است که خصوصیات پساب سنتزی تا حد امکان به پساب واقعی نزدیک باشد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی امولسیون‌ساز در جدول (۲) گزارش شده است.

ابتدایی است و پس از آن در صورت ثابت ماندن شرایط عملیاتی، قطبش غلظتی هیچ تأثیری در کاهش شار تراوشی نخواهد داشت. بنابراین قطبش غلظتی به سرعت به حالت پایدار می‌رسد. پدیده گرفتگی نیز همانند قطبش غلظتی باعث کاهش شار تراوشی از غشاء می‌گردد ولی با این تفاوت که یک پدیده برگشتناپذیر است و کاهش مداومی در میزان شار تراوشی در طول مدت انجام آزمایش مشاهده می‌شود [۱ و ۲].

مدلسازی نیمرخ غلظت در سیال درون غشاء در رابطه با گرفتگی غشاء و استفاده از نتایج این مدل برای بررسی ضخامت لایه تشکیل یافته در سطح غشاء با توجه به شرایط خوراک در شستشوی غشاء امری ضروری است. جداسازی پسابهای نفتی از آب توسط غشاهای ریزصاف‌کن از موارد مهم در صنعت نفت می باشد بنابراین در این تحقیق روشی جدید برای مدلسازی ضخامت لایه قطبش غلظتی از طریق حل معادله (انتقال - نفوذ) توسط روش المان محدود ارائه شده و تاثیر عوامل مختلف مانند اختلاف فشار اعمال شده در دو طرف غشاء، سرعت خطی، دما، غلظت روغن در پساب سنتزی و مدت صاف شدن بر نیمرخ غلظت و ضخامت لایه قطبش غلظتی بررسی شده است. با انجام فرضیات ذکر شده در بخش مدلسازی و اعمال شرایط مرزی و اولیه، معادله (انتقال - نفوذ) حل می شود.

۲- بخش تجربی

در این تحقیق، آزمایشهای فرایند ریزصاف کردن جهت تصفیه پساب های روغنی با غشاهای سرامیکی مولیت انجام شده است. سیستم ریزصاف کردن جهت ارزیابی غشاهای تصفیه پساب‌های روغنی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- سیستم ریزصاف کردن جهت ارزیابی غشاهای تصفیه پساب‌های روغنی

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و شیمیایی امولسیون ساز

Triton X-100

فرمول شیمیایی	(C ₂ H ₄ O) _n C ₁₄ H ₂₂ O
رنگ	زرد روشن
چگالی	۱/۰۷ (g/cm ³)
حالت فیزیکی	مایع
دمای جوش	> ۲۰۰°C
دمای فلش	۱۱۳°C
دمای ذوب	۶ °C
انحلال پذیر	محلول در آب
pH	۹/۷

در این رابطه (J) شار تراوشی و (ΔP) اختلاف فشار در طرفین غشاء است.

شار عبوری از غشاء را می توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$J = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_p)} \quad (2)$$

در این رابطه (μ) گرانروی سیال، (R_m) مقاومت ذاتی غشاء و (R_p) مقاومت لایه قطبش غلظتی است.

چنانچه تنها عامل مقاوم در برابر عبور سیال خود غشاء در نظر گرفته شود، معادله (۲) به صورت زیر نوشته می شود [۴ و ۵]:

$$J = \frac{\Delta P}{\mu(R_m)} \quad (3)$$

تحت بهترین شرایط به کارگیری فرایند، میزان شار تراوشی با گذشت زمان کاهش می یابد. علت این پدیده، قطبش غلظتی ناشی از تراکم مولکولها و ذرات در پشت غشاء است. اعمال فشار باعث تجمع مولکولها در لایه های نزدیک به سطح غشاء می شود، زیرا غشاء در برابر عبور این مولکولها از خود مقاومت نشان می دهد. بنابراین افزایش فشار، موجب افزایش شدید غلظت در این لایه خواهد شد. البته بالا بودن غلظت در این لایه نسبت به توده محلول، خود باعث نفوذ معکوس مولکولها به داخل توده خواهد شد. اما حتی در شرایط پایدار نیز یک لایه مرزی غلظتی وجود دارد که همانند سدی در برابر عبور مولکولها از خود مقاومت نشان می دهد. این پدیده، برگشت پذیر است و با کاهش فشار عملیاتی، ضخامت لایه قطبش و در نتیجه مقاومت آن کاهش می یابد [۱]. پدیده قطبش غلظتی یکی از عوامل مهم کاهش شار تراوشی در غشاء است.

معادله (انتقال - نفوذ) در مختصات استوانه ای به صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial c}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial c}{\partial z} + v_r \frac{\partial c}{\partial r} = D \left(\frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} + \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} \right) + D \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2 c}{\partial \theta^2} \right) + D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

در این تحقیق، پساب های سنتزی به غلظت های (۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۳ و ۴) ساخته شده اند. برای ساخت هر امولسیون با غلظت مشخص، امولسیون ساز به میزان ۱۰٪ فاز روغنی به آرامی در یک لیتر آب مقطر توسط یکنواخت ساز، با سرعت دورانی ۶۰۰۰ rpm حل می شود، سپس میعانات گازی به آرامی طی مدت ۵ دقیقه به آب مقطر افزوده می شود. با توجه به نیاز به تهیه حدود ۸ لیتر پساب سنتزی روغنی در هر آزمایش، ابتدا یک لیتر پساب غلیظ توسط یک همزن با سرعت دورانی ۱۲۰۰ دور بر دقیقه درون آب مقطر رقیق می شود. در آزمایش های انجام شده پساب های روغنی، محدوده تغییرات فشار عملیاتی بین (۱-۴) bar، سرعت جریان عرضی بین (۰/۵-۲) (m/s)، دمای خوراک بین (۲۸۸-۳۱۸) k و غلظت روغن در پساب سنتزی بین (۰/۲۵-۳) (kg/m³) در نظر گرفته شده است. همچنین زمان تصفیه پساب به روش ریزصاف کردن برای هر آزمایش ۲ ساعت است [۳ و ۷].

۳- مدلسازی فرایند

با توجه به اینکه در فرایند ریزصاف کردن نیروی محرکه مورد نیاز جهت انتقال جرم اختلاف فشار می باشد، بنابراین برای یک محلول خاص میزان شار تراوشی از درون غشاء با اختلاف فشار اعمال شده در دو سوی غشاء متناسب است.

$$J \sim \Delta P \quad (1)$$

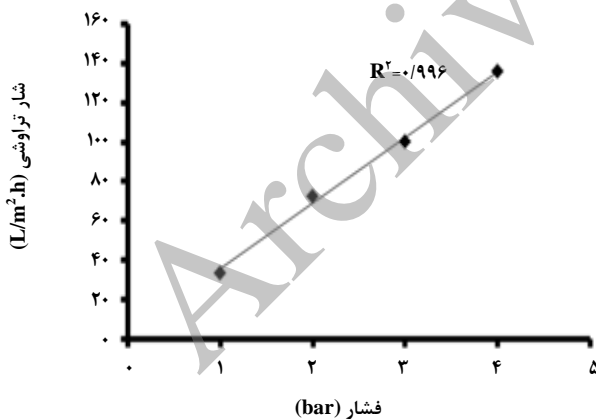
1. Concentration Polarization

برای به دست آوردن رابطه ضریب نفوذ از رابطه (ویلیکی - چانگ)^۱ استفاده می‌شود که این رابطه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$D = \frac{117.3 \times 10^{-18} (\phi M_B)^{0.5} T}{\mu v_A^{0.6}} \quad (7)$$

در این رابطه ϕ ضریب تجمع مولکولی حلال، M_B جرم مولکولی حلال (g/mol)، T درجه حرارت (k)، μ گرانیوی محلول (kg/m.s) و v_A حجم مولکولی جزء حل شده در نقطه جوش طبیعی (m³/kmol) می‌باشد [۶].

آب مقطر هیچگونه مقاومتی در مسیر تراوش غشاء ایجاد نمی‌کند بنابراین بین افزایش فشار و تغییرات شار رابطه مستقیم و خطی وجود دارد. در این آزمایش‌ها، دمای آب مقطر ۲۵°C و سرعت جریان عرضی ۱ (m/s) است. برای به دست آوردن مقاومت غشاء تغییرات شار تراوشی آب مقطر با فشار عملیاتی اندازه گیری می‌شود. همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، روند تغییرات شار تراوشی آب مقطر با فشار، صعودی و خطی است و مربع ضریب همبستگی خطی تقریباً برابر یک است ($R_2 \approx 1$).



شکل ۲- شار تراوشی آب مقطر از غشاهای مولیت با فشار عملیاتی

با استفاده از نمودار بالا و رابطه $J = \frac{\Delta P}{\mu R_m}$ مقدار عبارت μR_m برابر $0.293 \frac{\text{bar.m}^2.\text{hr}}{\text{L}}$ می‌باشد. در این رابطه (μ) گرانیوی سیال و

1. Wilke-Chang

این معادله با در نظر گرفتن فرضیات زیر حل می‌شود:

۱. $(\partial c / \partial z)$ در مقابل $(\partial c / \partial r)$ قابل صرف نظر کردن است. گرادینان غلظت در جهت حرکت سیال به دلیل بالا بودن عدد رینولدز و عدد اشمیت قابل صرف نظر کردن است)

$$\frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = 0 \quad \frac{\partial c}{\partial z} = 0$$

۲. نفوذ محوری در حجم کنترل به علت عدد پکلت بزرگ در سیستم غشاء قابل صرف نظر کردن است. ($Pe = UL/D$) که U سرعت سیال ورودی، L طول غشاء و D ضریب نفوذ می‌باشد.

$$\frac{\partial c}{\partial \theta} = 0$$

۳. گرادینان غلظت در جهت و در جهت حرکت سیال قابل صرف نظر کردن است.

بنابراین شکل نهایی معادله به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_r \frac{\partial c}{\partial r} = D \left(\frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} + \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} \right) \quad (5)$$

شرایط مرزی و اولیه به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{aligned} \text{IC: } & t=0 \quad C=C_f \\ \text{BC: } & r=0 \quad \frac{\partial c}{\partial r} = 0 \quad \text{and } r=R \quad J = D \frac{\partial c}{\partial r} \end{aligned} \quad (6)$$

در مرز مشترک دو ناحیه (دو طرف دیواره غشاء) بایستی شرط پایستگی متغیرهای میدان جریان برقرار باشد. در دیواره غشاء ($r=R$) تنها سرعت در جهت شعاعی وجود دارد و بنابراین مؤلفه شعاعی سرعت باید در دو ناحیه برابر باشد.

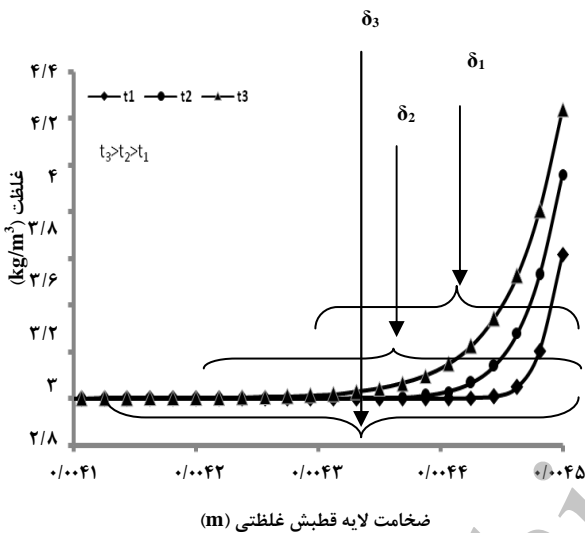
در محور غشاء سرعت جریان در جهت شعاعی برابر با صفر است در حالی که این سرعت در دیواره غشاء حداکثر مقدار خود را دارد.

بنابراین v_r به صورت تابع $J (r/R)^n$ در نظر گرفته می‌شود. تغییر مقادیر n بین بازه صفر تا چهار تفاوت زیادی در نتایج به وجود نمی‌آورد، بنابراین $n=1$ در نظر گرفته شده است.

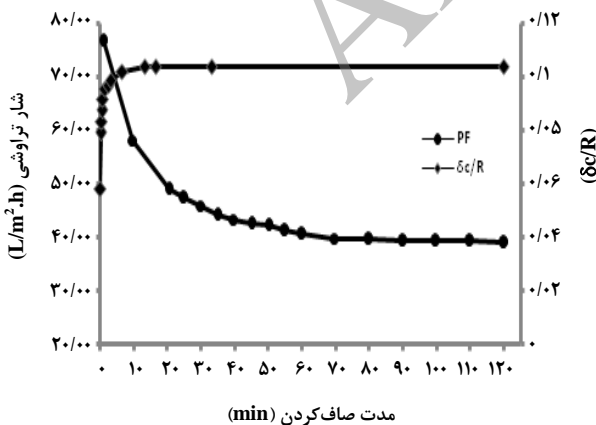
۴- تأثیر پارامترهای مختلف بر نمودار غلظت و ضخامت لایه قطبش غلظتی

۴-۱ بررسی اثر سرعت جریان عرضی

سرعت جریان عرضی سیال عبوری از سطح غشاء باعث افزایش شار تراوشی می‌شود. این تأثیر معمولاً از طریق کاهش میزان گرفتگی غشاء با اغتشاش ایجاد شده توسط سیال انجام می‌شود [۷ و ۴]. اثر سرعت جریان عرضی در شرایط غلظت روغن برابر $1 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ ، دمای 298 K و فشار 3 bar حاصل از نتایج مدلسازی بر نمودار غلظت و ضخامت لایه قطبش غلظتی به صورت زیر گزارش می‌شود.



شکل ۳- نمودارهای غلظت در شعاع غشاء در سه زمان صاف کردن مختلف



شکل ۴- شار حاصل از نتایج آزمایشگاهی (PF) و رشد لایه قطبش غلظتی حاصل از مدلسازی با مدت صاف شدن

(R_m) مقاومت ذاتی غشاء است [۷]. میزان شار تراوشی از میان غشاء با اختلاف فشار اعمال شده در دو سوی غشاء به همراه در نظر گرفتن تشکیل لایه قطبش غلظتی به صورت معادله (۲) است. با استفاده از درون یابی داده‌های آزمایشگاهی، شار تراوشی بر اساس پارامترهای مذکور معادله μR_p به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\mu R_p = 2.24 \times 10^5 (\Delta P)^{3.97} C_F^{1.063} T^{-3.54} V_{in}^{-0.9} \frac{\text{bar.m}^2.\text{hr}}{L} \quad (8)$$

در نتیجه با جایگذاری مقادیر μR_m و μR_p در معادله دارسی عبارت کلی برای شار به صورت زیر بیان می‌شود:

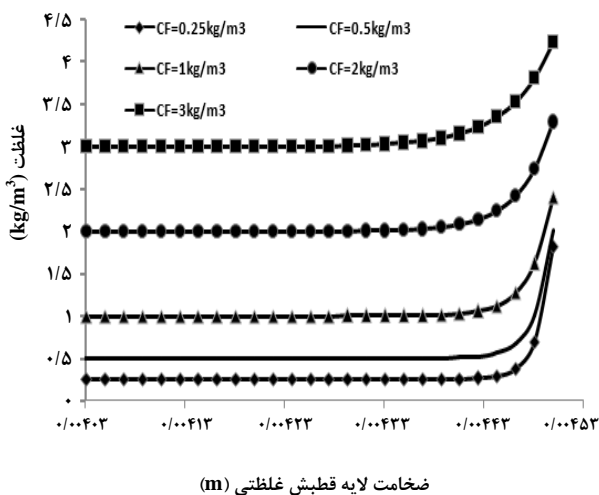
$$J = \frac{\Delta P}{0.0293 + 2.24 \times 10^5 (\Delta P)^{3.97} C_F^{1.063} T^{-3.54} V_{in}^{-0.9}} \frac{L}{\text{bar.m}^2.\text{hr}} \quad (9)$$

معادله شار در ابعاد احاد اصلی به صورت زیر است:

$$J = \frac{\Delta P}{0.0293 + 2.24 \times 10^5 (\Delta P)^{3.97} C_F^{1.063} T^{-3.54} V_{in}^{-0.9}} \frac{L}{\text{bar.m}^2.\text{hr}} \quad (10)$$

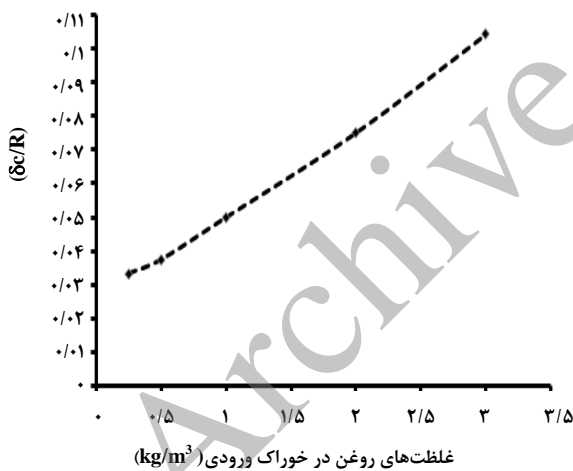
با انجام فرضیات ذکر شده و اعمال شرایط مرزی و اولیه معادله (انتقال - نفوذ) از طریق روش المان محدود حل می‌شود. نمودارهای غلظت به دست آمده در حالت سرعت برابر $1/5 \text{ (m/s)}$ ، دما 308 K و فشار 3 bar و غلظت روغن در پساب $3 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ و در سه زمان مختلف به صورت زیر گزارش می‌شود. با گذشت زمان شار تراوشی کاهش، و ضخامت لایه قطبش غلظتی افزایش می‌یابد و بعد از مدتی ضخامت لایه قطبش غلظتی به حالت یکنواخت و پایدار می‌رسد [۴]. این رفتار در شکل (۴) نشان داده شده است.

۰/۵، ۱، ۲ و ۳ تهیه شده‌اند و نتایج در شرایط سرعت (m/s) ۱/۵، دمای ۳۰۸ K و فشار ۳ bar بررسی شده است.



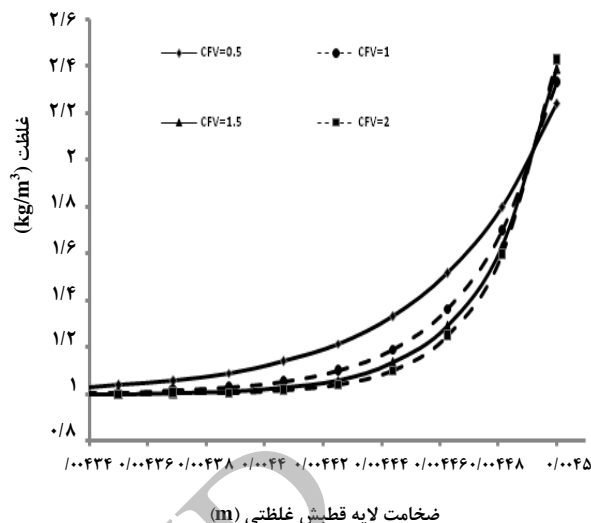
ضخامت لایه قطبش غلظتی (m)

شکل ۷- نمودار غلظت در راستای شعاع غشاء با غلظت روغن در خوراک ورودی در حالت پایا



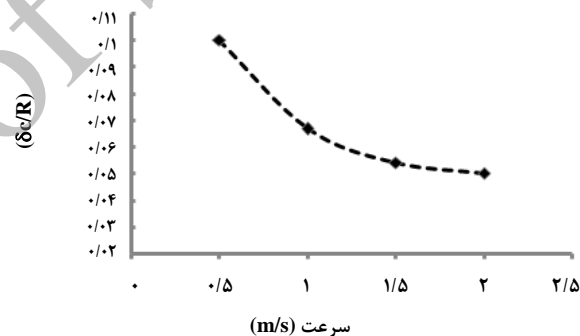
شکل ۸- ضخامت لایه قطبش غلظتی با غلظت روغن در خوراک ورودی

همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت روغن در پساب، قطرات روغن به یکدیگر می‌چسبند و گرفتگی به دلیل تشکیل لایه ژل مانند روی سطح غشاء افزایش می‌یابد، بنابراین شار تراوشی از غشاء کاهش می‌یابد. با افزایش غلظت روغن در پساب سنتزی، درصد گرفتگی غشاء و ضخامت لایه قطبش غلظتی افزایش یافته است [۱۶-۱۳].



ضخامت لایه قطبش غلظتی (m)

شکل ۵- نمودار غلظت در راستای شعاع غشاء در سرعت‌های مختلف خوراک ورودی در حالت پایا



شکل ۶- ضخامت لایه قطبش غلظتی با سرعت خطی خوراک

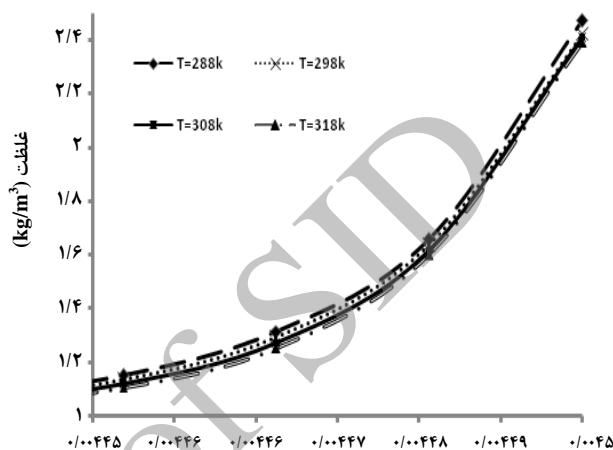
همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، افزایش سرعت جریان عرضی، ضریب انتقال جرم در لایه قطبش غلظتی را افزایش می‌دهد و سبب افزایش میزان اختلاط در نزدیکی سطح غشاء می‌شود [۱۲-۸]. بنابراین افزایش سرعت جریان عرضی باعث کاهش تجمع اجزای موجود در خوراک در لایه ژل شده و سبب می‌شود که مواد تجمع کرده بر روی سطح غشاء به درون توده مایع باز گردد و ضخامت لایه قطبش غلظتی کاهش یابد.

۲-۴ بررسی اثر غلظت پساب سنتزی

جهت بررسی تأثیر غلظت روغن بر نمودار غلظت و ضخامت لایه قطبش غلظتی، پساب‌های سنتزی با غلظت‌های (kg/m³) ۰/۲۵،

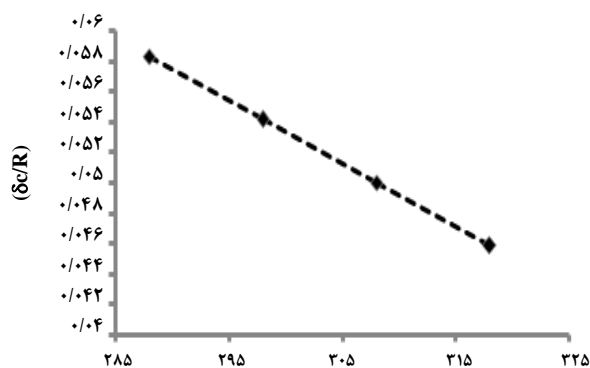
۳-۴ بررسی اثر دمای خوراک

از عوامل مهمی که روی شار تراوشی در فرایند ریزصاف کردن تأثیر بسیاری دارد، دمای خوراک است. برای بررسی اثر دمای خوراک ورودی در شرایط غلظت روغن برابر $1 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ ، سرعت $1/5 \text{ (m/s)}$ و فشار 3 bar ، نتایج حاصل از مدلسازی نمودار غلظت و ضخامت لایه قطبش غلظتی به صورت زیر گزارش می‌شود.



ضخامت لایه قطبش غلظتی (m)

شکل ۹- نمودار غلظت در راستای شعاع غشاء با دمای خوراک ورودی در حالت پایا



دمای خوراک ورودی (K)

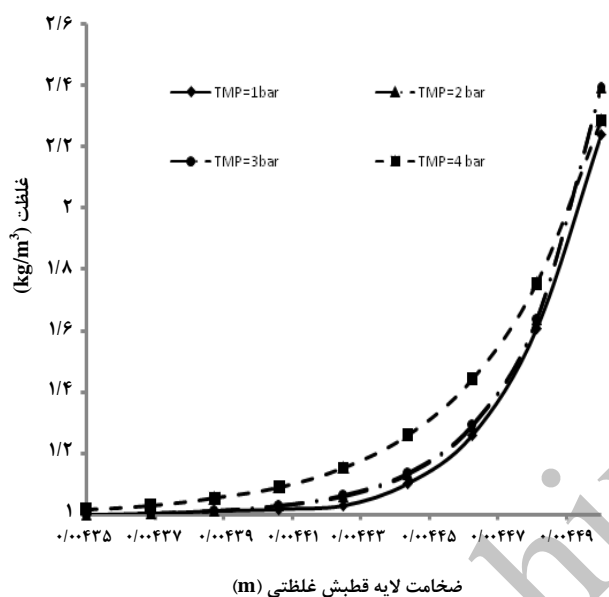
شکل ۱۰- ضخامت لایه قطبش غلظتی با دمای خوراک ورودی

افزایش دمای خوراک موجب کاهش گرانروی و افزایش نفوذپذیری حلال و ماده حل شونده می‌شود [۱۷ و ۱۵ و ۱۳ و ۱۱]. بنابراین انتظار

می‌رود با افزایش دمای خوراک، شار تراوشی افزایش، و درصد گرفتگی غشاء و ضخامت لایه قطبش غلظتی کاهش یابد.

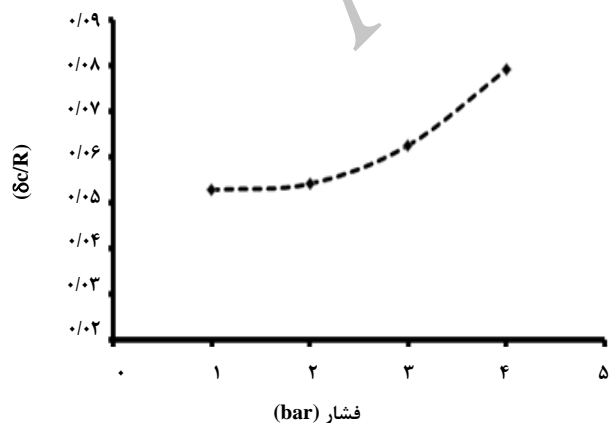
۴-۴ بررسی اثر فشار عملیاتی

افزایش فشار دارای اثر دوگانه ای است از یک سو باعث افزایش شار تراوشی شده و از سوی دیگر منجر به فشرده شدن رسوبات بر روی سطح غشاء و در نتیجه گرفتگی سریع‌تر حفره‌ها می‌گردد [۱۸ و ۱۷]. اثر فشار در شرایط غلظت روغن برابر $1 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ ، سرعت $1/5 \text{ (m/s)}$ و دمای 298 K حاصل از نتایج مدلسازی بر نمودار غلظت و ضخامت لایه قطبش غلظتی به صورت زیر گزارش می‌شود.



ضخامت لایه قطبش غلظتی (m)

شکل ۱۱- نمودار غلظت در راستای شعاع غشاء با فشار در حالت پایا



شکل ۱۲- ضخامت لایه قطبش غلظتی با فشار

- [۵] مدائنی. س، "غشاء و فرایندهای غشائی"، کرمانشاه، انتشارات طاق بستان، ویرایش ۱، ۲۰-۸۰، (۱۳۸۱).
- [6] Treybal. R, "Mass Transfer Operations", McGraw-Hill, New York, 3rd ed, 30-80. (1980).
- [۷] عباسی. م، "تصفیه پساب های نفتی به روش ریزصاف کردن توسط غشای سرامیکی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران (۱۳۸۸).
- [8] Lia. Y.S, Yana. L, Xiang. C.B, Hong. L.J, "Treatment of oily wastewater by organic-inorganic composite tubular ultrafiltration (UF) membranes", *Desalination* 196, 76-83, (2006).
- [9] Chakrabarty. B, Ghoshal. A.K, Purkait. M.K "Ultrafiltration of stable oil-in-water emulsion by polysulfone membrane", *Journal of Membrane Science* 325, 427-437, (2008).
- [10] Mallada. R, Menendez. M, "Inorganic membranes synthesis, characterization and applications", *Membrane Science and Technology Series, Volume 13*, 177-215, (2008).
- [11] Mohammadi. T, Esmaelifar. A, "Wastewater of a vegetable oil factory by a hybrid ultrafiltration-activated carbon process", *J. Membr. Sci.* 254, 129-137, (2005).
- [12] Mohammadi. T, Esmaelifar. A, " Wastewater treatment using ultrafiltration at a vegetable oil factory", *Desalination* 166 329-33, (2004).
- [13] Tomaszewska. M, Orecki, Karakulski. K, "Treatment of bilge water using a combination of ultrafiltration and reverse osmosis", *Desalination* 185, 203-212, (2005).
- [14] Kuca. M, Szaniawska. D, "Application of microfiltration and ceramic membranes for treatment of salted aqueous effluents from fish processing", *Desalination* 241, 227-235, (2009).
- [15] Abbasi. M, Mirfendereski. M, Nikbakht.M, Golshenas. M, T. Mohammadi. T, "Performance study of mullite and mullite-alumina ceramic MF membranes for oily wastewaters treatment", *Desalination* 259, 169-178, (2010).
- [16] Elmaleh. S, Ghaffor. N, "Cross-flow ultrafiltration of hydrocarbon and biological solid mixed suspensions", *J. Membr. Sci.* 118, 111 (1996).
- [17] Ohya. H, Kim. J.J, Chinen. A, Alihara. M, Semonova. S.I, Negishi. Y, Mori. O, Yasuda. M, "Effect of pore size on separation of microfiltration of oily water using porous glass tubular membrane", *J. Membr. Sci.* 145, 1 (1998).

همانطور که در شکل مشاهده می شود با افزایش فشار، ضخامت لایه قطبش غلظتی افزایش می یابد. در فشارهای پایین، با افزایش فشار شار تراوشی شروع به افزایش شدید می کند اما با افزایش فشار از ۲ bar به بعد، افزایش شار تراوشی بسیار ناچیز می شود و درصد گرفتگی غشاء و ضخامت لایه قطبش غلظتی سریع تر افزایش می یابد.

۵- نتیجه گیری

انباشتگی اجزای دفع شده در نزدیکی سطح غشاء را قطبش غلظتی می نامند که عواقب جدی در فرایندهای غشایی بر جای می گذارد. مدلسازی نمودار غلظت درون غشاء در رابطه با گرفتگی غشاء امری لازم است. در این تحقیق از طریق حل معادله (انتقال - نفوذ) توسط روش المان محدود، ضخامت لایه قطبش غلظتی بررسی شده و تأثیر عوامل مختلف مانند اختلاف فشار اعمال شده در دو طرف غشاء، سرعت جریان عرضی، دما، غلظت روغن در پساب سنتزی و زمان مورد بررسی قرار گرفته است. چنانکه مشاهده شد نتایج حاصل از مدلسازی تطابق بسیار خوبی با رفتار مورد انتظار دارد. با افزایش سرعت جریان عرضی و افزایش دمای خوراک ضخامت لایه قطبش غلظتی کاهش و با افزایش غلظت روغن در پساب سنتزی و افزایش فشار، ضخامت لایه قطبش غلظتی افزایش می یابد.

مراجع

- [1] Wagner. J, "Membrane Filtration Handbook", 2nd Edition, Revision 2, Osmonics, 8-15, (2001).
- [2] Nunes. S.P, Peinemann. K.V, "Membrane Technology in the Chemical Industry", Wiley-VCH Verlag GmbH, 15-29, (2001).
- [3] Abbasi. M, Salahi. A, Mirfendereski. M, Mohammadi. T, Pak. A, "Dimensional analysis of permeation flux for microfiltration of oily wastewaters using mullite ceramic membranes", *Desalination* 252 113-119, (2010).
- [4] Mulder. M, "Basic principles of membrane technology", Kluwer Academic publishers, 2nd ed. 1-21, 450-480. (1997).