

فناوریهای نمک زدایی

بخش دوم: مقدمه، مفاهیم بنیادی فرایند اسمز معکوس

در این بخش خواهید خواند:

* فشار اسمزی، محاسبه فشار اسمزی و روابط حاکم بر آن

* دفع و عبور نمک از غشا

* شوری جریان آب تولیدی

* درصد بازیافت (ریکاوری)

* افت فشار در فرایند اسمز معکوس

* قطبیت غلظتی (Concentration Polarization)، پارامترهای موثر و روش های کنترل آن

* دما و اثر آن بر کیفیت محصول تولیدی

* عوامل موثر بر راندمان فرایند اسمز معکوس

* مصرف انرژی

خرداد ۱۴۰۲

شرکت مهندسی فرایند و انرژی فران

تهیه کننده: علیرضا بلوری افشار

ویراستار: مهدیه توحیدی

afshar@faran-water.ir

www.faran-company.com



FARAN Co. Process And Energy Engineering Company

مقدمه:

فرایند اسمز معکوس روشی برای تولید آب شیرین از منابع آب شور است. در این فرایند، جریان ورودی به دو بخش جریان با شوری کم (Permeate) و جریان با شوری زیاد (Concentrate) تقسیم می‌شود. اساس جداسازی در این فرایند فقط بر مبنای نفوذ مولکولی است و هیچ جریان توده‌ای در عمق غشا برقرار نمی‌شود. لذا بر خلاف سایر فرایندهای فیلتراسیون که سرعت جریان توده‌ای با ورود به بستر متخلخل بدلیل کاهش سطح مقطع عبوری جریان، افزایش پیدا می‌کند، در این فرایند، افزایش سرعت جریان توده‌ای رخ نمی‌دهد.

مقدار جریان تولیدی وابستگی مستقیم به فشار اعمال شده (اختلاف فشار ورودی با فشار آب شیرین تولیدی)، سطح مقطع عبوری جریان بر روی غشا و ضریب نفوذ غشا دارد:

$$Q_w = \frac{dV}{dt} = (\Delta P - \Delta \pi) \times K_w \times A \quad (1)$$

که در آن:

$$Q_w: \text{جریان آب شیرین (Permeate) تولیدی } \frac{m^3}{hr}$$

$$V: \text{کل میزان آب شیرین تولیدی } m^3$$

$$t: \text{زمان}$$

$$\Delta P: \text{اختلاف فشار بین جریان خوراک با جریان آب شیرین تولیدی (bar)}$$

$$\Delta \pi: \text{اختلاف فشار اسمزی (bar)}$$

$$K_w: \text{ثابت نفوذ پذیری آب (} m^3/m^2 \cdot S \cdot bar \text{)}$$

$$A: \text{سطح مقطع عبوری آب در غشا (} m^2 \text{)}$$

$$(\Delta P - \Delta \pi): \text{اختلاف پتانسیل فشاری محرکه (bar)}$$

در فناوری غشایی، پارامتر فلاکس عبارت است از نسبت بین مقدار جریان آب شیرین تولیدی و سطح مقطع عبور جریان در غشا:

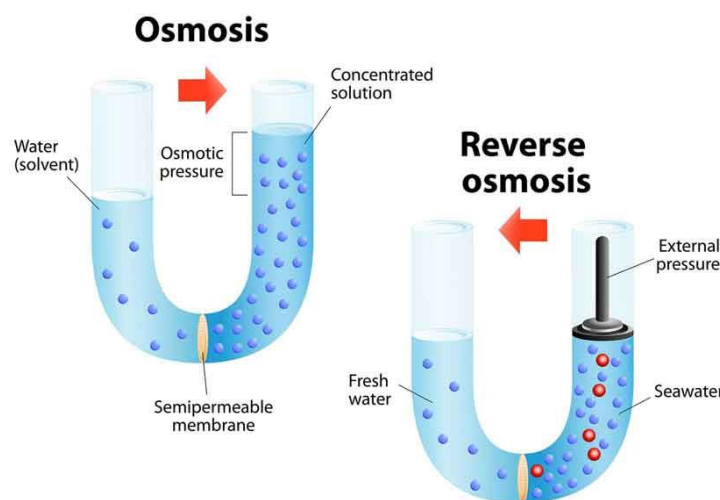
$$J = \frac{Q_w}{A} = \frac{1}{A} \cdot \frac{dV}{dt} = (\Delta P - \Delta \pi) \cdot K_w \quad (2)$$

فشار اسمزی: (Osmotic Pressure)

اسمز طبیعی زمانی رخ می دهد که دو محلول با غلظت های متفاوت توسط یک غشای نیمه تراوا از یکدیگر جدا شوند. فشار اسمزی طبیعی، آب خالص را از طریق غشای نیمه تراوایی که فقط نسبت به آب تراوایی دارد، به درون محلول غلیظ تر هدایت می کند و این فرایند تا آن جا که دو طرف به تعادل برسند ادامه می یابد. مثال ساده ای از این پدیده طبیعی، قرار دادن چند عدد میوه خشک نظیر آلو و یا عناب به یک لیوان آب است. پس از گذشت مدتی مشاهده می شود که آب به درون میوه خشک نفوذ کرده و آن را به شکل طبیعی و تازه خود بر می گرداند.



حال اگر با عاملی خارجی مانند اعمال فشار مکانیکی در طرف غلیظ تر از برقراری این جریان طبیعی جلوگیری شود، می توان انتظار داشت که این بار جریان خالصی از طرف غلیظ تر به طرف رقیق تر و در نتیجه تغلیظ بخش غلیظ تر و ورود آب شیرین به بخش رقیق به وجود آید که به آن اسمز معکوس می گوئیم.



به عبارت دیگر، فرایند اسمز معکوس در واقع اعمال فشاری مکانیکی به آب خام (حاوی شوری) به میزان بیش از فشار اسمزی طبیعی است که نتیجه آن تغلیظ آب خام (تولید شورابه) و تولید جریان آب شیرین (Permeate) از طریق یک غشاء نیمه تراوا است که در حالت تئوری و ایده‌آل فقط نسبت به عبور آب تراوایی دارد. به همین دلیل است که بخشی از فشار خارجی اعمال شده صرف غلبه بر فشار اسمزی طبیعی و نیز صرف افت فشارهای ناشی از عبور جریان از لوله، اتصالات، شیرآلات و غشاها شده و مابقی آن را به عنوان نیروی محرکه تولید آب شیرین باید در نظر گرفت:

$$NDP = \Delta P - \Delta \pi$$

(Net Driving Pressure)

محاسبه فشار اسمزی (Osmotic Pressure Calculation)

هر چه میزان TDS آب بیشتر باشد، فشار اسمزی متناظر با آن بیشتر خواهد شد. در این خصوص، منابع آب خام به دو دسته، آب لب شور (Brackish Water) با TDS کم تر از ۱۰,۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و آب دریا با TDS بیش از ۳۰,۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تقسیم بندی می شوند. فشار اسمزی نمونه آب با TDS حدود ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در حدود ۰,۷ بار و آب دریا با TDS در حدود ۳۵۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در حدود ۲۵ بار است.

در عمل و بنا بر یک قاعده سرانگشتی، هر ۱۴۰۰-۱۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر TDS معادل با ۱ بار فشار اسمزی است. لذا:

$$\pi \approx 0.7 \times 10^{-3} C \quad (3)$$

که در آن C میزان شوری بر حسب میلی‌گرم بر لیتر است.

شرکت معروف Hydraunatics چنین می‌گوید که هر ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر TDS معادل با ۱۱ psi فشار اسمزی است. جهت محاسبه دقیق تر فشار اسمزی، استاندارد ASTM2000 براساس قانون وانت هوف (van't Hoff) معادله زیر را پیشنهاد نموده است:

$$\pi_f = 8.308 \phi (T_f + 273.15) \sum mi \quad (4)$$

که در آن π_f فشار اسمزی بر حسب کیلو باسکال، ϕ ضریب اسمزی که برای آب لب شور (Brackish) برابر با ۰,۹۳ و برای آب دریا ۰,۹۰ در نظر گرفته می شود، T_f دمای جریان خوراک بر حسب درجه سانتی‌گراد و $\sum mi$ مجموع مولالیتته تمام املاح یونی و غیر یونی در نمونه آب است.

روابط مشابهی نیز توسط سازندگان معروف غشا در این خصوص ارائه شده است. به عنوان مثال DOW(Dupont) در سال ۲۰۲۰ رابطه زیر را پیشنهاد نموده است:

$$\pi_f = 1.12(T + 273) \sum mi \quad (5)$$

که در آن π_f فشار اسمزی بر حسب Psi است.

معادله ساده‌تری نیز توسط Dupont به فرم ذیل ارائه شده است که برای غلظت TDS کم‌تر از ۲۰,۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر معتبر است:

$$\pi_{fc} = \frac{C_{fc} \times (T+320)}{491.000} \quad (۶)$$

در TDS بالاتر از ۲۰,۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر:

$$\pi_{fc} = \frac{0.0117 C_{fc} - 34}{14.23} \times \frac{(T+320)}{345} \quad (۷)$$

اندیس fc در روابط فوق به این دلیل درج شده است که در حین فرایند اسمز معکوس، آب خام ورودی در گذر از غشاهای بطور پیوسته تغلیظ می‌شود. در واقع فشار اسمزی با ورود آب خام به غشا، به دلیل افزایش تدریجی TDS تا رسیدن به غلظت شورابه افزایش می‌یابد و لذا fc معنای خوراک - شورابه داشته و در واقع میانگین فشار اسمزی خوراک با شورابه است.

π_{fc} : فشار اسمزی متوسط خوراک - شورابه

C_{fc} : غلظت متوسط تی TDS خوراک - شورابه

T: دما برحسب درجه سانتی‌گراد

جریان آب از لایه غشایی (Water Flow)

در حالت تئوری و ایده آل طبیعت شیمیایی غشا باید به‌گونه‌ای باشد که به‌صورت انتخابی فقط آب را از خود عبور داده و تمایلی به عبور یون‌های املاح (مانند نمک‌ها) و سایر ناخالصی‌ها نداشته باشد. این خاصیت عبور انتخابی می‌تواند ناشی از اتصال ضعیف شیمیایی آب با سطح غشا و یا نفوذ مولکولی آب در لایه غشایی باشد.

ساختار فیزیکی و شیمیایی غشا مانند بار سطحی و میزان تخلخل آن تعیین‌کننده میزان عبور انتخابی آب از غشا در مقایسه با سایر نمک‌های محلول در آن است. در شرایط شار (فلاکس) ثابت، فلاکس اسمز معکوس چنین تعریف می‌شود:

$$J = (\text{Net Driving Pressure}) \times K_w = (\Delta P - \Delta \pi) \times K_w \quad (۸)$$

که در آن:

$$\Delta P = P_F - P_P$$

$$\Delta \pi = \pi_F - \pi_P$$

J: فلاکس آب برحسب $\frac{L}{m^2 \cdot h}$

ΔP : اختلاف فشار هیدرولیکی (فشار خوراک منهای فشار جریان آب تصفیه شده) برحسب (bar)

$\Delta\pi$: اختلاف فشار اسمزی بین جریان خوراک با جریان آب محصول بر حسب (bar)

K_w : ثابت تراوش آب بر حسب $\frac{L}{m^2.h.bar}$

دفع نمک (Salt Rejection)

بنا بر تعریف، غلظت نمک در خوراک ورودی منهای غلظت نمک در محصول تولیدی تقسیم بر غلظت نمک در خوراک ورودی بر حسب درصد، درصد دفع نمک اطلاق می‌شود:

$$SR = \frac{C_f - C_p}{C_f} \times 100 \quad (9)$$

$$SR = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100 \quad (10)$$

که در آن C_f غلظت نمک در خوراک ورودی و C_p غلظت نمک در محصول تولیدی است.

عبور نمک (Salt Passage)

در حالت ایده‌آل (تئوری)، غشای اسمز معکوس تنها نسبت به آب تراوایی دارد و سایر اجزای درون آب ورودی (آنیون‌ها و کاتیون‌های محلول) قادر به عبور از غشا و ورود به محصول تولیدی نیستند ولیکن در عمل مقدار کمی از آنیون‌ها و کاتیون‌ها از غشا عبور نموده و وارد محصول تولیدی می‌شوند. لذا TDS آب تولیدی صفر نخواهد بود. هر چه سایز و بار یون‌ها کوچک‌تر باشد شانس عبور آن از غشا بیشتر است. لذا می‌توان انتظار داشت که اکثر محتوای یونی موجود در آب تولیدی، سدیم و کلراید باشد و یون‌های دو ظرفیتی نظیر سولفات، فسفات، کلسیم و منیزیم شانس بسیار کمتری در عبور از غشا داشته باشند. درصد عبور نمک از غشا عبارت است از نسبت غلظت نمک در محصول تولیدی با غلظت نمک در خوراک ورودی بر حسب درصد:

$$SP = \frac{C_p}{C_f} \times 100 \quad (11)$$

لذا:

$$SP = 100 - SR \quad (12)$$

جریان نمک (Salt Flow)

همان طور که اشاره شد، در عمل، نمک نیز مانند آب از غشا عبور می‌کند ولی میزان آن در مقایسه با آب بسیار کم تر است. عبور نمک از غشا به واسطه نفوذ ملکولی آن از طریق آب و نیز تمایل یون ها به حرکت از پتانسیل شیمیایی بالاتر به پتانسیل شیمیایی کم تر رخ می دهد. اگرچه نفوذ مولکولی پدیده ای بسیار کند است، ولی قابل چشم پوشی نیست و به همین دلیل است که محصول آب شیرین تولیدی عاری از نمک نیست.

میزان شوری آب تولیدی (C_P) وابسته به میزان انتقال آب و نمک از غشا است. به عبارت دیگر هرچه جریان آب عبوری در مقایسه با جریان نمک عبوری از غشا بیشتر باشد، غلظت نمک در محصول تولیدی کم تر خواهد شد:

$$C_P = \frac{Q_S}{Q_W} \quad (13)$$

که در آن Q_S به صورت زیر تعریف می شود:

$$Q_S = \Delta C \times K_S \times A \quad (14)$$

که در آن:

$$\Delta C = C_F - C_P$$

Q_S : شدت جریان عبوری نمک از غشا ($\frac{kg}{s}$)

ΔC : اختلاف غلظت نمک در دو طرف غشا ($\frac{kg}{m^3}$)

K_S : ثابت نفوذپذیری نمک در غشا ($\frac{m^3}{m^2 \cdot s}$)

A : سطح مقطع عبوری جریان در غشا (m^2)

C_F : غلظت نمک در خوراک ورودی ($\frac{mg}{Lit}$)

C_P : غلظت نمک در محصول تولیدی ($\frac{mg}{Lit}$)

نکته مهم: جریان عبوری نمک از غشا وابستگی به فشار اعمال شده به جریان خوراک ورودی نداشته و ثابت است در حالی که جریان آب عبوری از غشا وابستگی مستقیم به فشار خوراک ورودی (اختلاف فشار خوراک با فشار اسمزی) دارد. لذا با اعمال فشار بیشتر به خوراک ورودی و افزایش جریان محصول تولیدی، شوری آب محصول نیز کاهش خواهد یافت.

بنا بر تعریف، فلاکس عبوری نمک (J_S) عبارت است از مقدار نمک عبوری به ازای واحد سطح مقطع غشا و واحد آن $\frac{mg}{m^2.h}$ است. این پارامتر وابسته به اختلاف غلظت نمک در جریان خوراک و جریان محصول تولیدی است:

$$J_S \approx (C_f - C_p) \cdot K_S \quad (15)$$

با توجه به پایین بودن C_p در مقایسه با C_f با تقریب می‌توان چنین نتیجه گرفت:

$$J_S \approx C_f \cdot K_S \quad (16)$$

غشاهای تولیدی سازندگان معتبر نظیر Toray و Dupont,Hydraunatics,CSM,LG معمولاً دو نوع مختلف غشا تولید می‌کنند:

- غشا های آب لب شور با درصد دفع نمک ۹۹,۵ درصد و فشار عملیاتی تا ۴۰ بار
- غشا های آب دریا با درصد دفع نمک ۹۹,۸ درصد و فشار عملیاتی تا ۸۰ بار

به طور کلی بالا بودن درصد دفع نمک (K_S بودن) توأم با پایین بودن K_w (ضریب تراوش آب از غشا) است زیرا بالا بودن درصد دفع نمک به معنای کوچک تر شدن سایز تخلخل غشا است.

به عنوان مثال در مورد غشاهای SWRO مقدار K_S در حدود $0,08 \frac{L}{m^2.h}$ و K_w در حدود $\frac{L}{m^2.h.bar}$ و برای غشا های BWRO مقدار K_S در حدود $1/1 \frac{L}{m^2.h}$ و K_w در حدود $5 \frac{L}{m^2.h.bar}$ است.

شوری جریان محصول تولیدی (Perneate Salinity)

$$C_p = C_{fc}(1 - SR) \quad (17)$$

$$SR = 1 - SP \quad (18)$$

$$C_p = C_{fc} \times SP \quad (19)$$

شوری جریان محصول تولیدی توسط عوامل ذیل قابل کنترل و تنظیم است:

- مدل غشای انتخابی از سازندگان مختلف
- درصد بازیافت (ریکاوری): هرچه ریکاوری کم تر باشد، شوری محصول تولیدی کم تر است.
- فلاکس عبوری از غشا: هر چه فلاکس عبوری از غشا بالاتر باشد، شوری محصول تولیدی کم تر است.

درصد بازیافت (ریکاوری) و فاکتور تغلیظ (Concentration Factor)

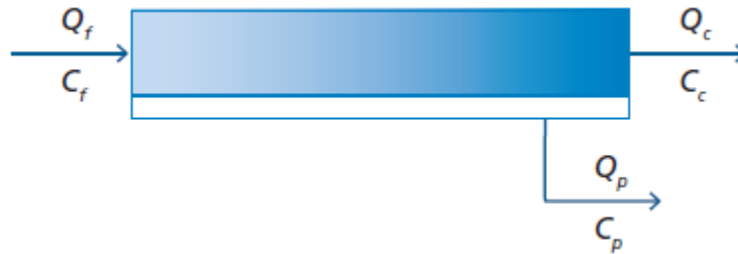
ریکاوری یا درصد بازیافت بنا بر تعریف عبارت از مقدار محصول تولیدی به ازای جریان خوراک ورودی به واحد اسمز معکوس است.

$$R = \frac{Q_p}{Q_f} \times 100$$

انتخاب مقدار ریکاوری بر روی مقدار عبور نمک از غشاء و جریان محصول تولیدی تأثیرگذار است.

با افزایش ریکاوری، مقدار غلظت نمک در طرف خوراک-شورابه افزایش یافته که با بالا رفتن اختلاف پتانسیل شیمیایی نمک، ورود آن به بخش محصول افزایش خواهد یافت (C_P).

افزایش میزان شوری در طرف خوراک-شورابه، افزایش فشار اسمزی و در نتیجه کاهش نیرو محرکه فشاری (NDP) را به دنبال خواهد داشت. لذا محصول تولیدی کاهش یافته و شوری آن نیز افزایش خواهد یافت.



موازنه جرم بر روی واحد اسمز معکوس

$$Q_f = Q_p + Q_c \quad (20)$$

$$Q_f \cdot C_f = Q_p C_p + Q_c \cdot C_c \quad (21)$$

$$C_f = \frac{Q_p}{Q_f} C_p + \frac{Q_c}{Q_f} C_c \quad (22)$$

$$C_f = R C_p + (1 - R) C_c \quad (23)$$

$$R = 1 - \frac{Q_c}{Q_f} \quad (24)$$

فاکتور تغلیظ (Concentration Factor)، CF بنا بر تعریف به نسبت غلظت نمک شورابه به غلظت نمک در جریان خوراک ورودی گفته می‌شود:

$$CF = \frac{C_c}{C_f} \quad (25)$$

با ترکیب و باز نویسی معادلات ۹ با معادله ۲۳ خواهیم داشت:

$$C_F = R C_F (1 - SR) + (1 - R) C_c \quad (26)$$

با ساده سازی به معادله ذیل خواهیم رسید:

$$CF = \frac{1}{1-R} \quad (27)$$

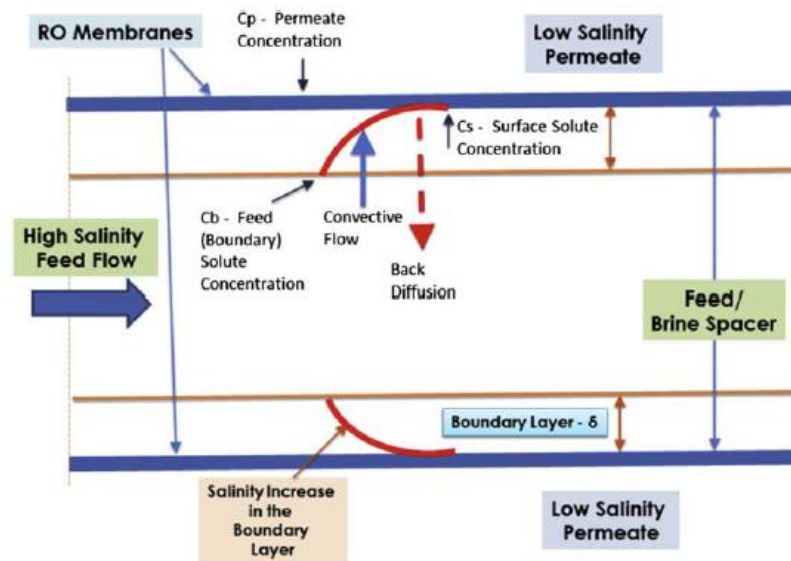
و یا:

$$C_C = \frac{C_f}{1-R} \quad (28)$$

همان طور که انتظار می رود با افزایش میزان ریکاوری غلظت شورابه افزایش پیدا می کند. این افزایش غلظت ممکن است در برخی موارد منجر به فوق اشباع شدن غلظت نمک های کم محلول مانند سولفات کلسیم، کربنات کلسیم، سولفات استرانسیوم و غیره شود که رسوب آن ها بر روی غشا باعث کاهش K_w و در نتیجه کاهش و یا حتی توقف جریان تولید شود. در این شرایط لازم است با روش های پیشگیرانه مانند تنظیم PH و نیز تزریق ضد رسوب مناسب (آنتی اسکالانت) از ترسیب این نمک ها بر روی غشا جلوگیری شود.

پلاریزاسیون (قطبیت) غلظتی (Concentration Polarization)

به ساده ترین بیان، جریان آب از درون غشا مانند جریان درون لوله ساختاری شبیه تئوری لایه مرزی دارد:



جریان در توده سیال از نوع جابجایی (Convective) و در نزدیک به جدار لوله در لایه مرزی از نوع نفوذی (Diffusive) است. در لایه مرزی، جریانی از نوع جا به جایی وجود ندارد. هر چه سرعت درون لوله کمتر باشد، ضخامت لایه مرزی بیشتر است.

حال جریان بر روی سطح غشای اسمز معکوس را در نظر بگیرید. ساختار جریان مشابهی با جریان درون لوله برقرار است. ولی با توجه به عبور آب از غشا، جریانی عمود بر جریان اصلی برقرار می‌شود. از آن جا که جریان عبوری از جداره غشا به صورت نفوذ مولکولی است و سرعت آن در مقایسه با جریان جابجایی به مراتب کمتر است، غلظت املاح در نزدیکی سطح غشا در مقایسه با توده جریان درون المان غشایی افزایش خواهد یافت.

بدلیل این که در نزدیکی سطح غشا، معادلات حاکم بر جریان سیال از نوع نفوذ بوده و هیچ جریان جابجایی توده‌ای (Convective) وجود ندارد، امکان تصور به هم خوردگی و اغتشاش (جریان آشفته) و در نتیجه پخش مؤثر نمک تجمع یافته در نزدیکی غشا وجود ندارد. به این اختلاف غلظت نمک در نزدیکی سطح غشا در مقایسه با غلظت نمک در توده سیال عبوری از المان غشایی، پلاریزاسیون (قطبیت) غلظتی اطلاق می‌شود.

بروز این پدیده به صورت کنترل نشده تبعات منفی قابل توجهی به دنبال خواهد داشت از جمله:

- افزایش مقاومت هیدرولیکی جهت عبور آب از غشا
- افزایش موضعی فشار اسمزی و در نتیجه کاهش نیروی محرکه فشاری جهت تولید آب شیرین (نیرو محرکه فشاری اختلاف بین فشار هیدرولیکی اعمال شده به خوراک و فشار اسمزی است)
- افزایش غلظت نمک در نزدیکی سطح غشا به معنای افزایش پتانسیل شیمیایی نمک جهت نفوذ بیشتر به غشا و ورود آن به جریان آب تولیدی است. (افزایش J_s)

مثالی ساده در این خصوص تأثیر پلاریزاسیون غلظتی بر عملکرد غشا اسمز معکوس و تأثیر آن بر کیفیت آب تولیدی را نشان می‌دهد:

فرض کنید غلظت سیلیکا در توده خوراک ورودی ۱۰ میلی گرم بر لیتر و بدلیل بروز پدیده پلاریزاسیون غلظتی در نزدیکی سطح غشا ۱۱,۵ میلی گرم بر لیتر باشد. اگر درصد دفع نمک غشا ۹۸ درصد باشد، انتظار می‌رود غلظت سیلیکا در محصول تولیدی ۰,۲ میلی گرم بر لیتر باشد. حال آن که، آنچه غشا از سیلیکا به خود می‌بیند، ۱۱,۵ میلی گرم بر لیتر بوده و در نتیجه غلظت سیلیکا در عمل در محصول تولیدی ۰,۲۳ میلی گرم بر لیتر خواهد شد. به عبارت دیگر، علی‌رغم این که درصد واقعی دفع نمک در غشا توسط سازنده ۹۸ درصد اعلام شده است، در عمل درصد ظاهری دفع نمک غشا در حدود ۹۷,۷ درصد خواهد شد.

جهت کمی سازی پدیده پلاریزاسیون غلظتی از فاکتوری بنام بتا (β) استفاده می‌شود. فاکتور β نسبت بین غلظت یک گونه در نزدیکی سطح غشا به غلظت آن در توده سیال است. هرچه میزان β بالاتر باشد، ریسک رسوب گرفتگی بر روی غشا افزایش خواهد یافت. حداکثر قابل پذیرش فاکتور β در فرایند اسمز معکوس ۱,۲-۱ است تا خطر بروز رسوب گرفتگی ناشی از فوق اشباع شدن نمک های کم محلول بر روی سطح غشا کاهش یابد. لازم به ذکر است فاکتور β ارتباطی به ساختار غشا نداشته و می‌بایست در طراحی سیستم اسمز معکوس به آن توجه شود.

با نگاهی دیگر می‌توان چنین توضیح داد که فاکتور β در واقع تابعی است از این که سرعت آب‌گیری از توده جریان ورودی به سیستم در چه اندازه‌ای است؟

اگر سرعت آب‌گیری (تولید آب شیرین، عبور آب از غشا و تولید محصول) زیاد باشد، فاکتور β افزایش خواهد یافت چرا که مقدار قابل توجهی نمک در پشت غشا انباشته خواهد شد.

روش‌های کنترل پدیده پلاریزاسیون غلظتی عبارت‌اند:

- کاهش فلاکس آب عبوری (J): افزایش جریان آب محصول (QP) در یک المان اسمز معکوس، تجمع بیشتر نمک در نزدیکی سطح غشاء را به دنبال خواهد داشت. راه کاهش فلاکس آب عبوری، افزایش تعداد غشا است.
- افزایش جریان خوراک ورودی: افزایش جریان خوراک ورودی در اندازه‌ای که به غشا صدمه وارد نکند، روشی جهت کنترل پدیده پلاریزاسیون غلظتی است. البته افزایش جریان خوراک ورودی، تبعات منفی دیگری نیز نظیر افزایش افت فشار را به دنبال خواهد داشت.
- افزایش جریان شورابه با کاهش میزان ریکاوری

محاسبه فاکتور β از طریق معادلات جریان لایه مرزی و تئوری نفوذ از حوصله این نوشتار خارج است.

رابطه ذیل توسط شرکت Hydraunatics و شرکت Koch بکار گرفته شده است:

$$\beta = K_p \cdot \exp\left(\frac{2R_i}{2 - R_i}\right)$$

که در آن:

β : فاکتور پلاریزاسیون غلظتی

K_p : ثابت وابسته به نوع غشا که توسط سازنده مشخص می‌شود (معمولاً ۰,۹۹)

R_i : مقدار ریکاوری غشای به‌کارگرفته شده

شرکت Dupont نیز در سال ۲۰۲۰ رابطه ذیل را جهت محاسبه فاکتور β پیشنهاد نموده است:

$$\beta = \exp(0.7R_i)$$

که در آن R_i میزان ریکاوری است.

شرکت Dupont میزان ریکواری پیشنهادی هر غشا را براساس کیفیت خوراک ورودی چنین عنوان نموده است:

آب دریا: ۱۰-۱۲ درصد

فاضلاب تصفیه شده و فیلتر شده: ۱۰-۱۲ درصد

آب سطحی پیش تصفیه شده: ۱۵-۱۸ درصد

آب چاه سخت گیری شده: ۱۹-۲۵ درصد

تأثیر دما بر کیفیت آب تولیدی در فرایند اسمز معکوس

دما با تأثیر بر روی K_w بر کیفیت محصول تولیدی تأثیر می‌گذارد. هر چه دما فراتر رود، میزان تراوش آب از غشا افزایش خواهد یافت که دلیل آن کاهش ویسکوزیته آب است. در نتیجه با افزایش دما فشار لازم برای ثابت نگه داشتن فلاکس بر روی غشا و یا تولید دبی مشخصی از محصول (QP) کاهش خواهد یافت:

$$TCF = 1.03^{(t-25)} = \text{ضریب تصحیح دما (در دمای } t)$$

$$K_{wt} = K_{w25} \times 1.03^{(t-25)}$$

به ازای هر درجه سانتی‌گراد افزایش دما از دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، مقدار K_w در حدود ۳ درصد افزایش می‌یابد. از سوی دیگر همین افزایش بر روی K_s نیز رخ خواهد داد:

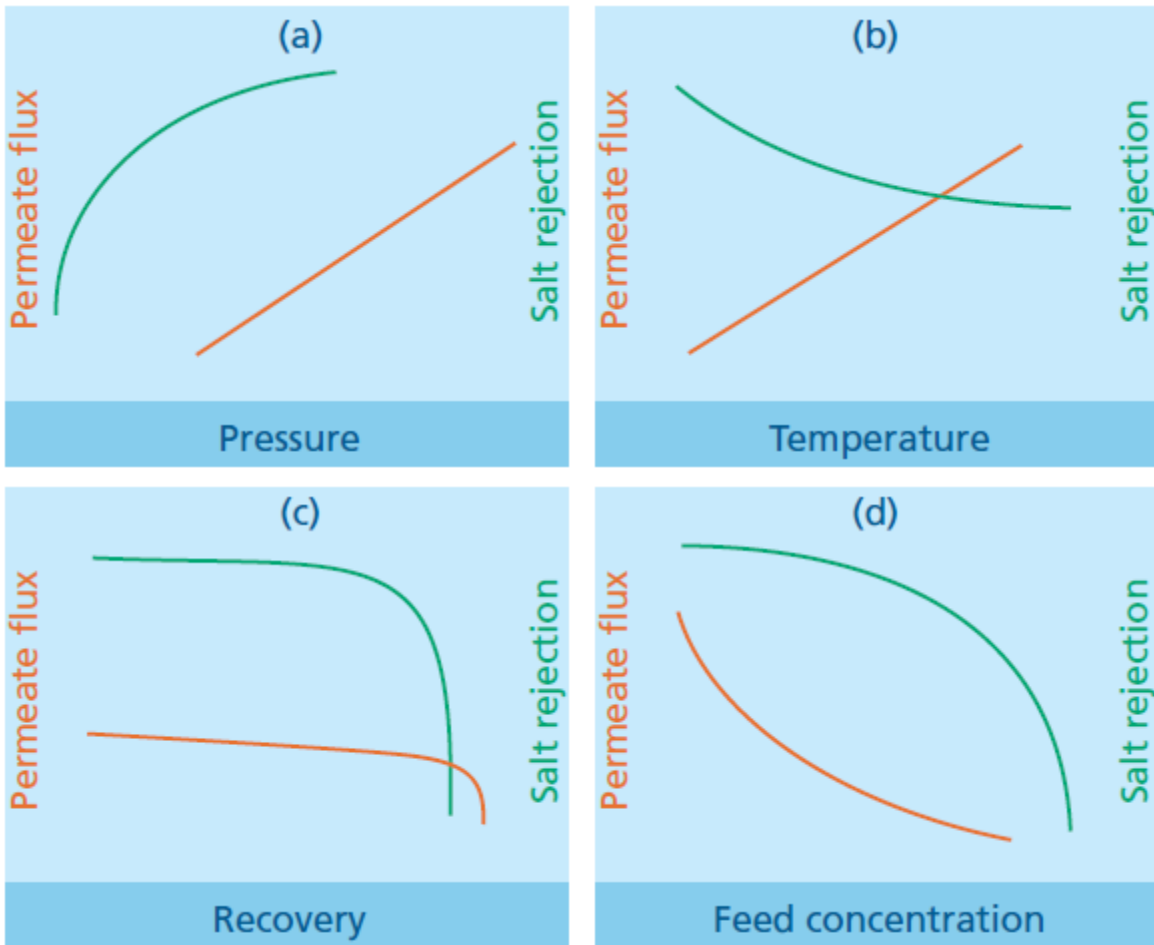
$$K_{st} = K_{s25} \times 1.03^{(t-25)}$$

لذا مقدار گذر نمک از غشا نیز با افزایش دما افزایش خواهد یافت. (SP)

$$C_{pt2} = \frac{C_{pt1}}{TCF} = \frac{C_{pt1}}{1.03^{(t1-t2)}}$$

چند نکته برگرفته از اسناد طراحی Dupont:

- با افزایش فشار جریان خوراک، میزان TDS جریان محصول تولیدی کاهش خواهد یافت.
- با افزایش دما (با ثابت ماندن سایر شرایط)، فلاکس آب عبوری از غشا و نیز درصد عبور نمک از غشا افزایش خواهد یافت. لذا هم دبی جریان محصول و هم شوری آن افزایش خواهد یافت.
- با افزایش میزان ریکواری، فلاکس عبوری از غشا کاهش می‌یابد تا آن جا که بدلیل بروز پلاریزاسیون غلظتی، فشار اسمزی بیش از اندازه بر روی سطح غشا به کل فشار خوراک ورودی غلبه نموده و جریان تولیدی متوقف می‌شود. با افزایش ریکواری درصد دفع نمک نیز کاهش خواهد یافت.



تأثیر فشار، دما، ریکاوری، غلظت خوراک ورودی بر بازدهی فرایند اسمز معکوس

(برگرفته از اسناد طراحی Dupont سال ۲۰۲۰)

مصرف انرژی

از جنبه تئوری، انرژی لازم جهت افزایش فشار آب از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$E = 0.0275 P$$

اگر راندمان پمپ را نیز در نظر بگیریم:

$$E = \frac{0.0275P}{N_{PUMP}}$$

در فرایند اسمز معکوس و نانو فیلتراسیون لازم است فشار کل خوراک ورودی افزایش یابد درحالی که ریکاوری این فرایندها ۱۰۰ درصد نبوده و تنها بخشی از خوراک و محصول تبدیل می‌شود.
لذا:

$$E = \frac{0.0275 P}{N_{pump} \times R}$$

که در آن:

E : مصرف انرژی (کیلووات ساعت به ازای مترمکعب)

P : فشار (بار)

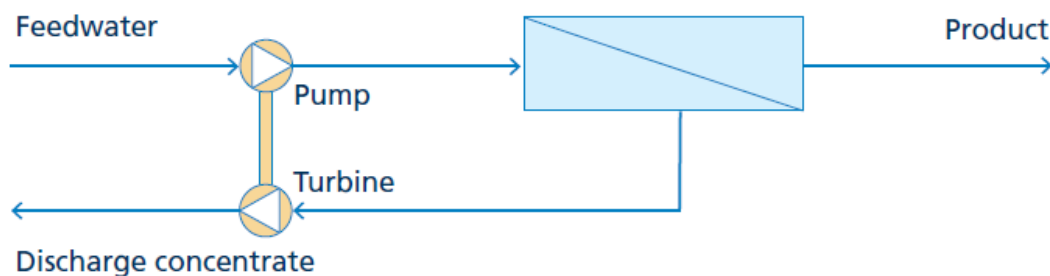
N_{pump} : راندمان توأم پمپ و الکتروموتور

R : ریکاوری فرایند

در جدول ذیل به‌عنوان نمونه انرژی لازم برای غلبه بر فشار اسمزی آب دریا جهت مقایسه آورده شده است:

Recovery, R	Theoretical separation energy 25 °C
0%	0.71 kWh/m ³
25%	0.82 kWh/m ³
50%	0.99 kWh/m ³
75%	1.35 kWh/m ³
100%	3.1 kWh/m ³

در عمل، در آب شیرین کن های SWRO جهت افزایش راندمان مصرف انرژی، فشار موجود در جریان شورابه قبل از تخلیه به محیط توسط تجهیزات بازیابی انرژی جذب شده و صرف افزایش فشار خوراک می‌شود.



در این حالت:

$$E = \frac{0.0275 \cdot P_{feed}}{N_{pump} \cdot R} - \frac{(0.0275(1 - R)P_{conc} \cdot N_{turbine})}{R}$$

که در آن:

$$P_{conc.} = P_{feed} - \Delta P$$

ΔP = افت فشار شورابه در گذر از اسمز معکوس

N_{pump} راندمان الکتروپمپ:

$N_{turbine}$ راندمان توربین بازیابی انرژی:

در عمل مصرف انرژی در آب شیرین کن های BWRO در حدود ۰.۵-۱ کیلووات ساعت به ازای مترمکعب و در آب شیرین کن های SWRO با استفاده از تجهیزات بازیابی انرژی در حدود ۳-۴ کیلو وات ساعت به ازای هر متر مکعب است.

بکارگیری تجهیزات بازیابی انرژی از شورابه از جنبه های ذیل مزیت دارد:

۱. صرفه جویی اقتصادی بدلیل این که دبی جریان شورابه در مقایسه با جریان خوراک کم تر است و در نتیجه هزینه تجهیز انرژی ریکاوری از پمپ خوراک پایین تر است
۲. راندمان عملکرد تجهیز انرژی ریکاوری در عمل بیش از ۹۵ درصد است در حالی که راندمان پمپ فشار قوی خوراک، کم تر از ۹۰ درصد است.