الباب الرابع

أنظمة التناضح العكسي

Reverse Osmosis Systems

مقدمة :

كما ذكرنا في الباب الأول من هذه الدراسة فإن المنظومة مكونة من أربعة مكونات أساسية هي مرحلة المعالجة الأولية ، مضخة الضغط العالي ، منظومة أو وحدة الأغشية و المعالجة النهائية ، و في هذا الباب سنعرض الأنواع المختلفة لمرحلة التناضح العكسي (نظام الأغشية) بتصاميمها المختلفة و المعادلات الأساسية التي يصمم على أساسها النظام و تأثيرها على عمليات التصميم و التشغيل اللاحق للنظام و ماهي المعلومات اللازم جمعها قبل البدء بالتصميم كمدخل لفهم ميكانيزم العملية .

1- معادلات النقل الأساسية لنظام التناضح العكسي :

عند تركيب أي نظام للتناضح العكسي فإنه ينبغي اختبار كلاً من تدفق الجريان و رفض الأملاح و الاستعادة في مجمع الأغشية (Membrane Asesembly) و ذلك تحت درجات الحرارة المختلفة ، الضغوط ، و ملوحة مياه التغذية .

1-1- تدفق ماء التغذية (Water Flux) :

تعرف المعادلة التالية تدفق أو جريان المياه :

$$J_1 = K_1(\Delta P - \Delta \pi) \qquad 1$$

$$K_1 = K_w \frac{A}{\tau} \qquad 2$$

$$\pi = 1.21\, T \sum Mi \qquad 3$$

حيث :

J_1 : تدفق الماء (m3 / m2 / sec)

ΔP اختلاف الضغط الهيدروليكي عبر الغشاء (atm)

$\Delta \pi$ اختلاف الضغط التناضحي عبر الغشاء (atm)

K_1 : معامل نقل الماء النقي و بمعنى آخر : تدفق الماء خلال الغشاء لكل وحدة من قوة الدفع

(m3 / m2 / sec atm)

K_w : معامل نفاذية الغشاء للماء

A : منطقة الغشاء (m)

τ : سماكة الغشاء (m)

T : درجة حرارة ماء التغذية (K كالوري)

Mi : مولارية المواد الأيونية و غير الأيونية .

K_1 يعطى من قبل مصنعي الأغشية أو قد يمكن إيجاده بحل المعادلة في شروط الاختبار القياسية و هو يعتمد على خصائص الغشاء المستخدم ، درجة الحرارة ، النظام والتركيب الكيميائي للمحلول الملحي .

1-2- تدفق الأملاح (Salt Flux) :

إن تدفق الأملاح مؤشر لتأثير الغشاء و مدى فعاليته في إزالة الأملاح من الماء ، إن جريان الأملاح هو المفتاح لدرجة حرارة النظام و تركيب الأملاح لذا فإن ملكية الغشاء نفسه و بشكل غير مباشر متعلقة بضغط التغذية (Feed Pressure) .

إن اختلاف تركيز الأملاح عبر الغشاء يحسب من المعادلات التالية :

$$J_2 = K_2 \Delta C \qquad 4$$

$$\Delta C = Cf - Cp \qquad 5$$

حيث :

J 2 : تدفق الملح (كغ / م2 / ثانية)

K2 : معامل نقل الملح (م / ثانية)

Cf : تركيز الملح في ماء التغذية (كغ/ م3)

Cp : تركيز الملح في المنتج (كغ / م3)

عندما يكون الجريان من خلال غشاء التناضح العكسي أعلى من تدفق الملح عندها يتراكم الملح على سطح الغشاء على الجانب المتكيف مع الضغط من الغشاء أو المضغوط من الغشاء . و هذه الظاهرة تدعى بظاهرة استقطاب التركيز (Concentration Polarization) .

إن الزيادة في استقطاب التركيز لها تأثيران هما :

١ -زيادة الضغط التناضحي و إنقاص تدفق الماء عبر الغشاء .

٢ -زيادة القوة الدافعة نتيجة اختلاف التركيز عبر الغشاء و التي تقلل من إمكانية وجهد الدفع و تزيد من اجتياز الأملاح و تعطي منتجاً ذو نوعية سيئة .

و كل هذه التأثيرات تزيد من كلف رأس المال و الكلف الرئيسية و معدات و تجهيزات الطاقة اللازمة لكل وحدة من الماء العذب المنتج من النظام .

1-3- رفض الأملاح (Salt Rejection) :

يعبر رفض الأملاح عن فعالية الغشاء لإزالة الأملاح من الماء و يمكن أن يحسب من العلاقة التالية :

رفض الأملاح % = [1 – (تركيز الناتج / تركيز التغذية)] ×100

$$\%Salt\ rejection=(1-\frac{Product\ concentration}{Feed\ concentration})'100\% \qquad 6$$

أي :

رفض الأملاح % = [1 – (TDS للمنتج / TDS للتغذية)] × 100

$$\%\ Salt\ rejection=(1-\frac{Product\ TDS}{Feed\ TDS})'100\%$$

و بالتالي :

رفض الأملاح % = 1 – مرور الأملاح %

$$\%\ Salt\ rejection=1-\%\ Salt\ \ passage$$

و يعتمد مرور الأملاح على العديد من العوامل منها :

1- درجة الحرارة .

2- تركيب ماء التغذية .

3- ضغط التشغيل .

4- نوع الغشاء و المواد المصنع منها .

5- المعالجة الابتدائية .

إن مرور الأملاح و حزم هبوط الضغط دليلان على تلوث وفساد الأغشية .

1-4- الاستعادة (Recovery) :

إن معدل الاستعادة لنظام التناضح العكسي يعطى بالعلاقة التالية :

الاستعادة % = (تدفق المنتج / تدفق التغذية) × 100

$$\text{Recovery(R)}=\frac{\text{Qp}}{\text{Qf}}*100\% \qquad 7$$

حيث :

QP : تدفق المنتج (m3 / d)

Qf : تدفق التغذية (m3 / d)

و الاستعادة محددة من قبل ملوحة مياه التغذية فعلى سبيل المثال استعادة وحدات مياه البحر تتفاوت بين (20 – 35 %) .

إن زيادة الاستعادة ترفع من تركيز المحلول الملحي المطرود و الضغط الإسموزي و هكذا تقلل من تدفق النافذ و تزيد من مجموع الأملاح الذائبة الكلية ال (TDS) في الماء المنتج و يمكن أن نزيد الاستعادة بزيادة عدد الصفوف في النظام .

إن معادلات النقل أعلاه تؤدي لنتائج مهمة و هي :

1- J_1 متناسب مع ΔP

2- J 2 متناسب مع ΔC ومستقل عن الضغط الطبق .

3- الزيادة في ضغط التشغيل تزيد من تدفق الماء بدون تغيير تدفق الملح .

2- المتغيرات التشغيلية للنظام (Operational Variables) :

عندما يستخدم نظام التناضح العكسي على مستوى تجاري من المهم تدقيق الأداء بشكل دوري له فمع مرور الوقت يتدهور أداء الغشاء بشكل مستمر بسبب تركز الضغط و التلوث أو الفساد للغشاء و هذا يسبب تغييرات في بارامترات التشغيل للنظام و بالتالي هبوط في أداء الوحدة و بناء عليه فغن بيانات المراقبة خطوة مهمة في تحسين أداء وحدة التناضح العكسي و متغيرات التشغيل الهامة في عمليات التحلية بالتناضح العكسي هي كالتالي :

2-1- تدفق النافذ (Permeate Flux) :

في حالة مياه تغذية ذات ملوحة معطاة فإن نسبة تدفق التغذية تؤثر في معدل إنتاج الوحدة ، استعادة المياه ، و عدد النماذج المستخدمة .

إن نسبة الإنتاج المنخفضة حسب مواصفات التصميم يمكن أن تكون إشارة لتلوث الأغشية و ضررها و كل مرحلة في نظام التناضح العكسي مصممة للعمل باستعادات محددة و التي هي – كما ذكرنا – نسبة تدفق الماء المنتج إلى تدفق التغذية . و إذا كانت الاستعادة أعلى من مواصفات التصميم المقترحة فإن تركيز المحلول الملحي الناتج و الضغط التناضحي سيزدادان و بالتالي يؤدي ذلك إلى إنقاص تدفق النافذ و زيادة تركيز الأملاح المنحلة في الماء المنتج .

عندما يتم الحفاظ على تدفق ماء تغذية ثابت خلال التشغيل فإن تدفق المنتج يجب أن تتم السيطرة و التحكم به و ذلك للحفاظ على استعادة ثابتة للنظام أثناء التشغيل .

2-2- ناقلية النافذ (Permeate Conductivity) :

كما هو معروف فإن الهدف الرئيسي لعملية التناضح العكسي هو إنتاج ماء ذو محتوى منخفض من مجموع المواد الصلبة المنحلة الكلية (TDS) و إذا كان قياس قيمة ال (TDS) لا يتم بسهولة بظروف التحكم المخبرية فمن الممكن للعامل أو المشغل أن يستخدم الناقلية لتقدير نوعية الماء المنتج .

إن مراقبة ناقلية المنتج ضرورية لإنتاج ماء ذو نوعية جيدة و أي زيادة تدريجية أو مفاجئة في ناقلية الناتج هي عبارة عن إشارات و دلائل للتلوث أو التلف الميكانيكي في نموذج الغشاء على التوالي .

إن كلاً من تدفق النافذ و الناقلية متأثرتان بوساطة العوامل الثلاثة التالية :

١ -الأس الهيدروجيني (PH) .

٢ -درجة الحرارة (Temperature) .

٣ -الضغط (Pressure) .

1 – PH :

إن تعديل قيمة الأس الهيدروجيني هي الخطوات الرئيسية في عمليات المعالجة الابتدائية قبل نظام التناضح العكسي و ينبغي مراقبة قيمة (PH) ماء التغذية و السيطرة عليها للأسباب التالية :

- لمنع تشكل قشور و ترسبات القلوية (كربونات الكالسيوم) .
- لزيادة عمر أغشيةِ أسيتات السيللوز بحمايتها من الانحطاط الذي تتعرض له بسبب التميه وهذا التميه هو رد فعل اسيتات السيللوز تجاه الماء لإنتاج كحول و حمض و يعتمد هذا التميه على كل من قيمة PH و درجة الحرارة و تحدث نسبة التميه الدنيا في قيمة PH من (5 – 4.5) .
- لتحسين رفض الأملاح .

2- درجة الحرارة :

درجة الحرارة لها تأثير هام على أداء النظام و الأغشية للأسباب التالية :

- قيمة العامل K_1 في المعادلتين (1,2) تعتمد على درجة حرارة النظام حيث أن زيادة درجة حرارة مياه التغذية ستسبب زيادة في تدفق الماء .
- تؤثر درجة حرارة ماء التغذية على تدفق الماء في الطريق الآخر فإذا كان تشغيل نظام (RO) يتم تحت الشروط المثالية و النموذجية بدون تلوث أوترسبات على الأغشية فإن تدفق الماء سيهبط مع مرور الوقت بسبب ظاهرة الضغط (Compaction Phenomena) و عامل تصحيح الضغط (CCF) يمكن إيجاده من المعادلة التالية :

$$CCF = t \wedge m \qquad 8$$

حيث :

t : زمن التشغيل .

m : الأس السالب الذي تعتمد قيمته على الغشاء ، ضغط التشغيل ، و درجة الحرارة من أجل الغشاء الموجود تحت ضغط تشغيل محدد فإن قيمة (m) تكون أعلى في درجة حرارة أعلى و هذا يعني خسارة أكبر في الضغط و تدفق ماء أقل .

3- الضغط :

المعادلتان (1و2) تظهران بأن تدفق الماء من خلال الغشاء متناسب مباشرة مع هبوط الضغط عبر الغشاء ، عندما يكون الضغط في جانب النافذ ثابتاً فإن تدفق الماء يكون متعلقاً بشكل مباشر مع ضغط التغذية إضافة إلى ذلك فإن تدفق الأملاح هو مفتاح لدرجة حرارة النظام و التركيب الكيميائي للمحلول الملحي و هو بشكل غير مباشر متعلق بضغط التغذية . في ضغط التشغيل المنخفض تنفذ كمية أقل من الماء عبر الغشاء بينما تدفق الأملاح يبقى نفسه ، أما في ضغوط التشغيل الأعلى تنفذ كمية أكبر من الماء عبر الغشاء عند نفس معدل تدفق الأملاح .

ضغط التغذية المرتفع ربما يسبب ضغط الغشاء و الذي ينقص تدفق الماء بعد التشغيل لوقت معين كما هو موضح في المعادلتين (1,2) .

3- عامل تصحيح درجة الحرارة و ضغط التغذية :

كما ذكرنا سابقاً فإن أداء عناصر أغشية التناضح العكسي متأثر بعاملين أساسيين و هما :

١ -درجة حرارة مياه التغذية .

٢ -الضغط المطبق من قبل المضخات على العنصر .

و هذان العاملان يجب أن يؤخذا بعين الحسبان قبل مقارنة أو تقييم أداء عناصر الأغشية لنظام التناضح العكسي .

3-1- تصحيح درجة الحرارة :

وصلنا إلى أن :

درجة الحرارة هي إحدى العناصر الهامة في أداء عناصر أغشية التناضح العكسي حيث يجب أن نلاحظ التالي :

1- درجة الحرارة الأعلى تؤدي إلى تدفق أعلى للماء المنتج و العكس صحيح .

2- ارتفاع درجة الحرارة يقلل من الضغط التشغيلي .

3- يزيد نسبة الأملاح النافذة .

و بالتالي لإيجاد معدل التدفق النافذ عبر الغشاء ينبغي اتباع التعليمات التالية:

1- إيجاد عامل تصحيح درجة الحرارة (TCF) من القائمة التي في الأسفل .

2- تقسيم التدفق النافذ على عامل تصحيح درجة الحرارة المعطاة و الذي يؤخذ من الجدول التالي و النتيجة تعطينا التدفق النافذ في درجة الحرارة المطلوبة .

جدول (1) قيم عوامل تصحيح درجة الحرارة تبعاً لدرجة حرارة ماء التغذية

Feed Water Temperature		Correction Factor
°C	°F	
5	41.0	2.58
6	42.8	2.38
7	44.6	2.22
8	46.4	2.11
9	48.2	2.00
10	50.0	1.89
11	51.8	1.78
12	53.6	1.68
13	55.4	1.61
14	57.2	1.54
15	59.0	1.47
16	60.8	1.39
17	62.6	1.34

Feed Water Temperature		Correction Factor
°C	°F	
18	64.4	1.29
19	66.2	1.24
20	68.0	1.19
21	69.8	1.15
22	71.6	1.11
23	73.4	1.09
24	75.2	1.04
25	77.0	1.00
26	78.8	0.97
27	80.6	0.94
28	82.4	0.91
29	84.2	0.88
30	86.0	0.85

مثال : من أجل تدفق نافذ للأغشية ذات الطبقة الفيلمية الرقيقة = 1800 غالون / يوم و بدرجة حرارة (77) فهرنهايت ماهو معدل التدفق النافذ في الدرجة (59) فهرنهايت ؟

الحل : نلاحظ من الجدول السابق أن عامل تصحيح درجة الحرارة من أجل (59) درجة فهرنهايت يساوي (1.47) و بالتالي يكون التدفق النافذ من أجل هذه الدرجة (1800/1.47) = 1224 غالون / يوم .

3-2- تصحيح ضغط التغذية :

إن الضغط الصافي الأعلى المطبق على عناصر الأغشية (ضغط التشغيل الأعلى) يؤدي إلى زيادة التدفق النافذ عبر الغشاء ، و الضغط الإسموزي لماء التغذية يمكن حسابه بالطريقة التجريبية التالية :

Osmotic pressure (PSI) = Total dissolved solids (TDS) ÷ 100

أي: 9 الضغط الإسموزي (رطل / بوصة مربعة) = الأملاح الكلية الذائبة /100

و من اجل تقدير أثر الضغط الصافي نتبع هذه الخطوات :

1- نقوم بحساب الضغط الصافي لأي غشاء من العلاقة التالية :

$$P_r = (\text{Rate Pressure}) - (\text{Osmotic pressure of test solution})$$

10 الضغط الصافي = الضغط المطبق – الضغط الإسموزي لمحلول التجربة

2- نقوم بحساب الضغط الصافي عند التشغيل (تحت ظروف التشغيل) :

$$(P_{op}) = (\text{Average applied pressure}) - (\text{average osmotic pressure of the feed water})$$

10 الضغط الصافي عند التشغيل = الضغط المطبق الوسطي– الضغط الإسموزي الوسطي لماء التغذية

٣ -و بالتالي يكون التدفق النافذ المتوقع في حالة التشغيلمساوياً إلى :

11 [التدفق النافذ المطبق × (P_{op})] / (P_r)

مثال : من أجل أغشية فيلمية رقيقة ذات (40 * 4) عنصر غشاء تم استعمال 2000 ppm من محلول كلوريد الصوديوم ذي الضغط 225 psi و في درجة حرارة 77 فهرنهايت معدل التدفق النافذ 1800 غالون في اليوم ، ما هو معدل التدفق النافذ في الضغط 150 psi مع ملوحة لماء التغذية قدرها 1000 و ذلك في الدرجة 59 فهرنهايت .

الحل : من المثال السابق لعامل تصحيح درجة الحرارة نجد أن معدل التدفق النافذ في الدرجة59 فهرنهايت يساوي 1224 gpd (غالون / يوم) و باستعمال الخطوات المذكورة السابقة فإن الضغط الصافي يكون :

[1224 x (150 –10)] / [(225- 20)] = [1224 x (140)] / (205)= 835.9 gpd

4- القياسات المؤثرة على العملية :

إن فعالية وحدات التناضح العكسي RO مميزة بنسبة الرفض أو نسبة الرفض المئوية ، إن هذه النسبة بالمائة للمواد الملوثة و الأملاح التي لا يمكن لها العبور عبر عناصر الأغشية أو المرفوضة من قبل الأغشية وبعض نسب الرفض المثالية للملوثات موجودة في الجدول الذي في الأسفل و هي نسب الرفض للمواد الملوثة تحت شروط التصميم .

جدول (2) نسب الرفض النموذجية القياسية للملوثات الشائعة.

الملوثات	معدل أو نسب الرفض	
	الاختبارات المساعدة	الاختبارات الحقلية
النترات Nitrates	83 - 92%	** - 92%
الأجسام المنحلة الكلية Total Dissolved Solids	95 - 99%	60 - 99%
الكبريتات Sulfates	90 - 98%	60 - 98%
الصوديوم Sodium	87 - 93%	60 - 93%

** : هذه القيم لوحدات التناضح المحافظ عليها بشكل جيد و بصورة ملائمة أما الوحدات الفقيرة أو التي لا تعمل بصورة ملائمة فإنها لن تكون فعالة في إزالة الملوثات وفي أسوأ الأحوال قد لا تزيل أي ملوث .

و يحتوي الماء على أكثر من نوع واحد من الملوثات ونسبة الرفض لكل ملوث قد تكون منخفض بالنسبة لبعض الملوثات مقارنة بالأخرى ، أي كما في الجدول السابق نلاحظ الاختلافات في معدل أو نسبة الرفض وعلى سبيل المثال أظهرت الحالات التي كان فيها محتوى المياه من TDS عالياً أو الكبريتات المترافقة مع النترات كبيراً أنه لا يتم أي تخفيض لمستويات النترات بعد المعالجة (النترات المستخدمة في هذا المثال تشير إلى نتروجين النترات أو No3-N) .

إن نسب الرفض من الضروري أن تكون عالية بما فيه الكفاية لتفيض مستوى التلوث في المياه المعالجة للتراكيز المطلوبة الآمنة و لتحديد النسب المرفوضة المطلوبة فإنه من الضروري أن نأخذ بعين الاعتبار التراكيز الأولية للملوثات في المياه فعلى سبيل المثال إذا كان الماء يحتوي على نترات بتركيز20mg/l فإن نسبة الرفض في وحدة التناضح العكسي تكون 85% و هذا يعني أن ال 15% الباقية ستخفض المستوى إلى 3mg /l (أي 20 مرة 0.15 = 3) .

الماء ذو المحتوى العالي من النترات (حوالي100 mg/l) سيبقى قرب أو فوق مستويات المعايير القياسية للصحة بعد معالجة الماء و مستويات النترات العالية هذه الغير متوقعة في مثل هذه الحالة ستدل على مشاكل واضحة و التي تتطلب معالجة و تحقيق لمستوياتها الطبيعية ، و توصي منظمات الصحة الدولية بأن التصاميم الخاصة التي تستعمل تقنيات التناضح العكسي ينبغي أن تأخذ بعين الاعتبار أن مستويات No3-N لا تزيد عن 40mg/l .

5- تقييم الأداء المتكامل لعملية التناضح العكسي :

ينبغي التحكم بالآليات و التقنيات التي تسيطر على عملية التناضح العكسي (و بشكل خاص وعاء الضغط الذي يحوي ست نماذج من الأغشية الموحدة في السلسلة) تحت ظروف التشغيل المختلفة . وسوف نوضح فيما يلي التوازن الترموديناميكي و الذي يفرض العديد من الأمور على أداء عملية التناضح العكسي المتكاملة ، وهذه الموازنة تظهر من خلال الزيادة الواضحة في الضغط الإسموزي في أقنية أغشية التناضح العكسي (وذلك بسبب ظاهرة تراكم الأملاح ضمن أقنية الأغشية أو نتيجة إنتاج النافذ) . إن سلوك العملية الشاملة للتناضح العكسي من خلال هذه الموازنة التي تعمل على تقييد أداء العملية مختلفة كثيراً عن تلك العمليات التي يتم السيطرة عليها و تقييمها بالاعتماد على الانتقال الكتلي و شروط عمليات التناضح العكسي للتبديل من نظام الانتقال الكتلي للتوازن الديناميكي الحراري (thermodynamically) أو الترموديناميكي سنطرحها وفق التالي :

5-1- مقدمة :

أغشية التناضح العكسي القديمة التي استخدمت لأغراض إزالة الأملاح كانت توصف بمعدل نفاذية منخفضة جداً (المعادلة رقم 12) وهذه الميزة فرضت غرضاً أساسياً و هدفاً لتصميم أغشية تزيد من معدل انتقال الكتلة (الماء النافذ) و ليتم جمعها مع بعضها البعض لزيادة منطقة السطح ، وفي أغلب التطبيقات استخدمت أكثر من ست نماذج من الأغشية في السلسلة و محمولة داخل وعاء للضغط وقد اتضح أنه من الضروري عمل ذلك بهدف زيادة استعادة الماء بشكل معقول و أكثر فعالية .

و بوصول مواد الأغشية الجديدة و التعديلات على السطوح زادت نفاذية أغشية التناضح العكسي بشكل ملحوظ وذلك في العقدين الأخيرين (المعادلتان 13 و 15) و بامتلاك مثل هذه الأغشية النافذة جداً كان من المتوقع أن معدل إنتاج الماء لكل وحدة من منطقة الأغشية سيزداد بشكل ملحوظ لكن الأمر كان مخيباً للآمال إذ أن معدل التدفق النافذ لوعاء الضغط الطويل كان عملياً بدون تغيير .

المعادلة 16 تم اقتراحها حديثاً ووضحت أن انتقال الكتلة لوحده غير كافي لوصف أداء العملية المتكاملة للتناضح العكسي ، وفي التقييم تبين أن معدل الجريان و التدفق النافذ الوسطي كان منحرفاً بشكل ملحوظ عن المخطط المعتمد على ضغط الغشاء الناقل للكتلة وهذا الأمر بين أنه من الضروري تقييد التوازن الترموديناميكي و الذي من الممكن أن يستخدم للتحكم بآلية العملية المتكاملة و الشاملة للتناضح العكسي ومن خلال تقييد أو حصر التوازن الترموديناميكي نعني أن الضغط الإسموزي للمحلول يزداد بشكل ملحوظ باتجاه خط سير السائل نحو قناة التناضح العكسي ، وتحت ظروف التشغيل الخاصة فإن التقييد الديناميكي الحراري يمكن أخيراً أن يضبط أداء عملية التناضح العكسي الكاملة .

في هذه الدراسة نبين أن هذه العملية المذكورة سابقاً هي العامل المحدد لأداء عمليات التناضح العكسي المتكاملة و عمليات التناضح العكسي تحت ظروف التشغيل الشائعة . و معادلات التحكم التي سنوردها تكون من خلال التوازن الكتلي و التوازن الديناميكي الحراري (الترموديناميكي) .

و بالاعتماد على النتائج تم توضيح ميزات نظام التناضح العكسي الذي يعمل في نظام ضبط الكتلة و معنى عمليات التناضح العكسي المتكاملة .

5-2- التطوير النظري :

مثل أكثر عمليات الصرف الصناعي و الكيميائيفإن نظام التناضح العكسي يمكن التحكم به إما من خلال (انتقال الكتلة) أو (التوازن الديناميكي الحراري) في القسم التالي المعادلات التوضيحية التالية التي تستخدم في تقييم أداء عمليات التناضح العكسي و التي تم تطويرها من أجل هذين الأمرين و هما التحكم بانتقال الكتلة و حالات التوازن الديناميكي الحراري المحددة و معدلات الاستعادة للماء من عمليات التناضح العكسي ستستخدم كبارامترات أساسية لتقييم الأداء في الاشتقاقات التالية . التدفق النافذ عبر الغشاء يمكن حسابه مباشرة من الاستعادة .

5-2-1- عمليات التناضح العكسي المتحكم بها عن طريق انتقال الكتلة :

Mass transfer-controlled RO process

إن أداء عملية التناضح العكسي المتكاملة عادة يتم تصويرها من خلال معدل الاستعادة للماء و التي تعبر عنها المعادلة التالية كما ذكرنا سابقاً :

$$r_c = \frac{Q_p}{Q_f} = 1 - \frac{Q_r}{Q_f} \qquad 12$$

حيث :

Qp : معدل التدفق النافذ (m3/s)

Qf : معدل تدفق التغذية (m3/s)

Qr : معدل التدفق الباقي (المركز) (m3/s)

و التدفق النافذ يمكن أن يحسب من العلاقة التالية :

$$v = \frac{\Delta p - \Delta \pi}{R_m} \qquad 13$$

حيث :

Rm : مقاومة الغشاء (Pa . s / m)

Δp : ضغط الغشاء الناقل (Pa)

$\Delta \pi$: فرق الضغط الإسموزي بين النافذ و التغذية (Pa)

ومن أجل قناة التناضح العكسي ذات الطول L و الارتفاع H مع سرعة تدفق لماء التغذية u_0 فإن نسبة تدفق التغذية (لكل وحدة عرض) Qf تعطى كالتالي :

$$Q_f = u_0 H \qquad 14$$

بينما معدل التدفق النافذ (لكل وحدة عرض) يحسب من العلاقة التالية :

$$Q_p = Lv = L\frac{\Delta p - \Delta \pi}{R_m} \qquad 15$$

حيث :

L : طول قناة الغشاء (m)

v **: سرعة التدفق النافذ (m / s)**

و تعطى الاستعادة لهذه العملية بالعلاقة التالية :

$$r_c = \frac{L}{u_0 H} \frac{\Delta p - \Delta \pi}{R_m} \qquad 16$$

هذه المعادلة تعطى في حالة انتقال الكتلة المحدود ، حيث أن الاستعادة لعمليات التناضح العكسي متناسبة مع طول الفلتر (L) و الضغط الفعال (الصافي) $\Delta p - \Delta \pi$ **وعل أية حال فإنه متناسب عكسياً مع نسبة تدفق التغذية Qf و مقاومة الغشاء Rm وبالتعريف معامل الترشيح F يعطى كالتالي :**

$$F = \frac{L}{u_0 H R_m} \qquad 17$$

حيث F ب (Pa ^ -1)

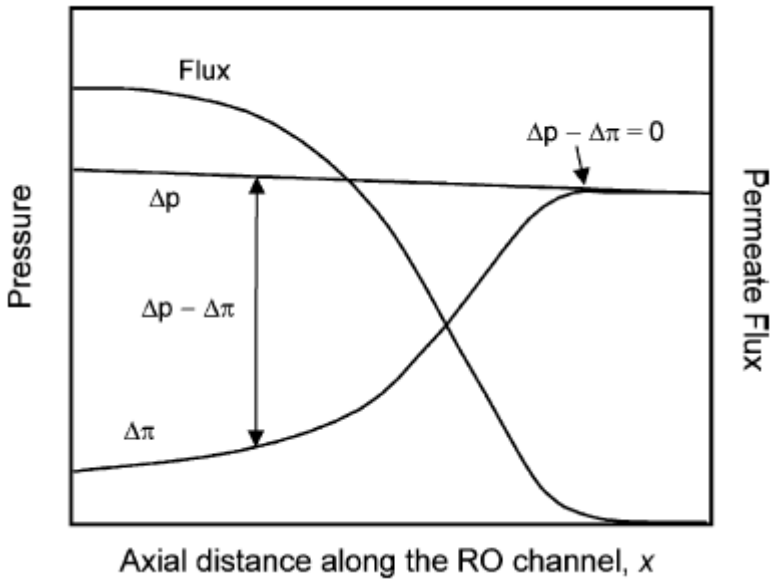
و بالتالي تكون الاستعادة من أجل عمليات التناضح العكسي المحددة بالانتقل الكتلي كالتالي :

$$r_c = F(\Delta p - \Delta \pi) \qquad 18$$

تبين المعادلة السابقة أن معدل الاستعادة يتقاطع مع الضغط الصافي (الفعال) وكذلك مع معامل الترشيح و الذي يعطينا في النهاية ميلاً مستقيماً للمنحني البياني و ينبغي ملاحظة أن المعادلة18 تكون صحيحة فقط عندما يكون الفرق بين الضغط الإسموزي أصغر من ضغط غشاء النقل ، و هذه المعادلة تشكل القاعدة المعتمد عليها في مخطط الاستعادة (أو التدفق النافذ) في الضغط الصافي لعمليات التناضح العكسي المحددة بالانتقال الكتلي .

5-2-2- عمليات التناضح العكسي المتحكم بها من خلال الديناميك الحراري :

من أجل عمليات التناضح العكسي ذات الضغط المحدد و المعطى و إذا كان طول قناة الغشاء كافياً فإن نظام الأغشية يمكن أن يصل إلى حالة التوازن الترموديناميكي و هذه الظاهرة موضحة بالمخطط التالي :



مخطط (1) مخطط توضيحي للتقييد بالديناميك الحراري لعمليات التناضح العكسي المعتمدة على استعادة الماء و التدفق النافذ على طول قناة الغشاء (وعاء الضغط) عند ضغوط مختلفة للنظام

وكما هو واضح فإن الضغط الصافي الأعلى يحدث في مدخل القناة . عندما يتدفق ماء التغذية من خلال القناة و يتم إنتاج الماء النافذ فإن الضغط الصافي الموضعي يتناقص بسبب الزيادة في الضغط الإسموزي ، وفي نفس النقطة على طول قناة الغشاء فإن الضغط الإسموزي يمكن أن يصبح مساوياً لضغط غشاء النقل (Transmembrane Pressure). إن تدفق الماء النافذ الظاهر من خلال المنحني يظهر أن الجريان أو التدفق على طول القناة يتناقص عندما يتناقص الضغط الصافي. و يتناقص التدفق النافذ إلى الصفر عند النقطة التي يصبح عندها الضغط الصافي مساوياً للصفر والاستعادة في مثل هذه الحالة مسيطر عليها من خلال التوازن الديناميكي الحراري (thermodynamic) في هذه الحالة فإن أداء عمليات التناضح العكسي مختلفة تماماً عن العملية المدارة من خلال التوازن الكتلي .

و عمليات التناضح العكسي المدارة من خلال هذا التوازن مشتقة في الأسفل .

إن معادلات التوازن الكتلي للموائع والمحاليل يمكن أن تكتب كالتالي :

$$Q_r + Q_p = Q_f \qquad 19$$

$$Q_r c_r + Q_p c_p = Q_f c_0 \qquad 20$$

حيث :

cr : تركيز المحلول الملحي الناتج (mol / l)

cp : تركيز النافذ (mol / l)

من المعادلتين 19 و 20 يمكن أن نكتب التالي :

$$\frac{Q_p}{Q_f} = \frac{c_r - c_0}{c_r - c_p} \qquad 21$$

حيث cp << cr و cp << c0 في عمليات التناضح العكسي

ومن المعادلتين 12 و 21 يمكن أن نكتب العلاقة التالية :

$$r_c = \frac{c_r - c_0}{c_r} \qquad 22$$

عندما تكون عمليات التناضح العكسي مسيطر عليها من قبل التوازن الديناميكي الحراري ، فإن الضغط الإسموزي للمحلول المركز يكون مساوياً لضغط غشاء النقل . الضغط الإسموزي للمركز يعطى بالعلاقة التالية :

$$\Delta\pi = f_{os} c_r = \Delta p \qquad 23$$

حيث :

f_{os} : معامل الضغط التناضحي (Pa / mol)

ومن المعادلتين 22 و 23 يمكننا أن نكتب العلاقة التالية:

$$r_c = 1 - \frac{\Delta\pi_0}{\Delta p} \qquad 24$$

حيث :

$\Delta\pi_0 \ (= f_{os} c_0)$: الضغط التناضحي لمحلول التغذية (Pa)

إن المعادلة 24 تظهر الاستعادة في حالة التوازن و المحددة فقط من قبل بارامترات الديناميكا الحرارية أي الضغط الإسموزي للتغذية و ضغط الانتقال للغشاء و هذه الاستعادة غير متأثرة ببارامترات العمليات الأخرى مثل طول الفلتر ، نسبة تدفق التغذية ، و مقاومة الغشاء .

5-3- النتائج و المناقشة :

المعادلات المطورة السابقة كانت تستعمل لتحديد أداء عمليات التناضح العكسي الكاملة و ذلك عند الظروف المختلفة للتشغيل وهي من ناحية أخرى توضح قيمة العوامل و البارامترات المدرجة في الجدول3 و التي تستخدم في التقييم و الضغط الإسموزي حسب معادلات (Vant Hoff) وبمعنى آخر معامل الضغط التناضحي المستخدم في المعادلة 23 والذي هو :

$$f_{os} = 2RT$$ 25

حيث R ثابت الغازات العام و T درجة الحرارة المطلقة ، المعادلة 25 يجب أن تعطي تقدير معقول من أجل 1:1 ملح مثل كلوريد الصوديوم (NaCl) ، و على أية حال عندما يكون هناك تعبير أكثر دقة (أو معادلة تجريبية) متوفرة لنوع معين من الماء من الممكن أن يستعمل بدل المعادلة25 .

جدول (3) قيم البارمترات النموذجية المستخدمة للتقليد

البارامتر	القيمة
درجة الحرارة (مئوية)	25
ثابت الغازات العام (باسكال ليتر / مول كالوري)	8.314×10^3
ارتفاع قناة التغذية (متر)	5×10^-4
الطول الكلي لقناة الغشاء (متر)	6
مقاومة الغشاء (باسكال ثانية / متر)	1.5×10^11
تركيز الأملاح في التغذية (مول / ليتر)	0.05 (2925mg/l)
معامل انتشار الأملاح (متر مربع / ثانية)	1.0×10^-9
سرعة العبور (متر / ثانية)	0.1
ضغط النقل للغشاء (باسكال)	3.5×10^6 (500 psi)

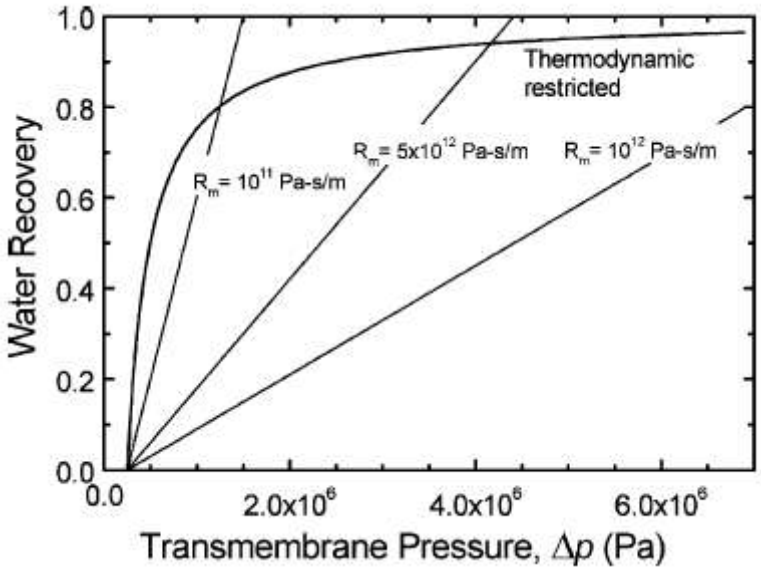
في انتقال الكتلة من أجل العمليات المحدودة يكون التغير في تركيز الأملاح في قناة النظام ليس ذو أهمية و بالتالي يكون :

الضغط الإسموزي $\Delta\pi$ في مثل هذه الحالات مساوياً تقريباً إلى الضغط الإسموزي لماء التغذية $\Delta\pi_0$ (بإهمال التأثيرات الناتجة عن استقطاب التركيز) ، و مقاومة الغشاء الأصلية هي 1.5×10^11Pas/m و المستخدمة في هذه الدراسة كخيار تقليدي .

أغشية التناضح العكسي حالياً يمكن بسهولة أن تمتلك مقاومة حوالي (1×10 ^11 Pa. s / m) أو أدنى من هذه القيمة و الغرض الرئيسي لهذه المحاكاة أو التقليد هو إظهار الآليات المعطاة في عمليات التناضح العكسي وذلك تحت ظروف تشغيل مختلفة .

5-3-1- الأنظمة المسيطر عليها من قبل التوارن الكتلي و التوازن الديناميكي الحراري :

المخطط (2) التالي يعرض ثلاثة استعادات في الحالة المحددة بالانتقل الكتلي ومن أجل ثلاثة مقاومات للأغشية (كما هو مشار إليها في المخطط) بالإضافة إلى الاستعادة تحت حالة التوازن الحراري الديناميكي حيث يوجد فقط استعادة واحدة في الأخيرة لأنها لا تعتمد على مقاومة الغشاء المعرفة بالمعادلة 24 و سلوك الحالات المحددة بالانتقال الكتلي و التوازن الديناميكي الحراري مختلف تماماً ، فالاستعادة في حالة التوازن مصورة بالمنحني والذي يتفق مع ازديادات ضغط غشاء النقل اللامحدودة وعلى العكس ، فإن الاستعادات عند انتقال الكتلة تزداد بشكل خطي مع الضغط و تميل لأن تكون معتمدة على مقاومة الغشاء (و بمعنى آخر الميل هو معامل الترشيح F المحدد في المعادلة رقم 17) .



مخطط (2) الاستعادة عند التوازن الترموديناميكي و الاستعادات عند انتقال الكتلة عبر الغشاء من أجل مقاومات أغشية مختلفة الموضحة في الشكل وقيم البارامترات الأخرى المستخدمة في الجدول3

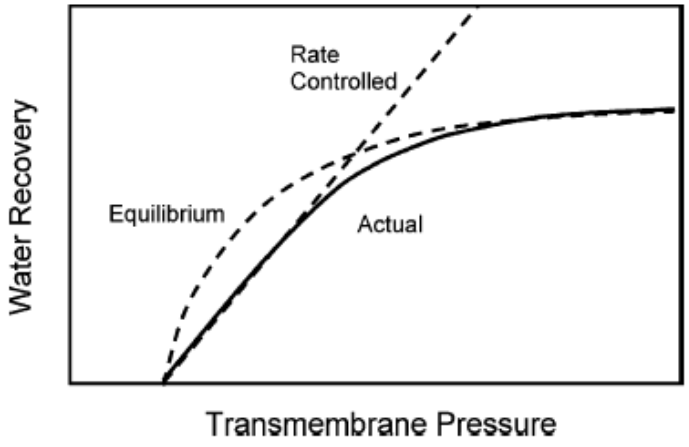
هناك ميزة واحدة مهمة في المخطط السابق وهي أن الاستعادات في حالة انتقال الكتلة تتقاطع مع الاستعادة عند التوازن الترموديناميكي وذلك عند ضغوط معينة ، عند الضغط المنخفض فإن الاستعادة عند انتقال الكتلة أصغر من الاستعادة عند التوازن الترموديناميكي وهذا يدل في هذه الحالة أن أداء عمليات التناضح العكسي مسيطر عليها من خلال نظام وآليات انتقال الكتلة ، أما عند الضغط العالي الكافي فإن الاستعادات في حالة الانتقال الكتلي تصبح أكبر من الاستعادة في التوازن الترموديناميكي و نتيجة لذلك فإن التقييد الديناميكي الحراري يصبح هو المتحكم بميكانيكية العملية .

مقاومة الغشاء لها تأثير هام على الانتقال من حالة السيطرة على الانتقل الكتلي لحالة التوازن و الشكل السابق يظهر أن نظام أو حالة التوازن تظهر بوقت أبكر في عمليات التناضح العكسي مع أغشية أكثر قابلية للنفاذ . وتوليد التيار النافذ بقيم عالية لهذه الأغشية يمكن أن يمتلك مقاومة حوالي10^11 Pa s / m

ومن الممكن أن يلاحظ من الشكل ذاته أن حالة التوازن من الممكن أن تحدث عند ضغط أقل من

1.25×10^6 Pa (181 psi) من أجل نفس الأغشية ، من أجل الأغشية ذات المقاومة الوسطية أو المعتدلة (5×10^11 Pa s / m) فإن ضغط البدء من أجل الحصول على توازن ديناميكي حراري يكون (4.2×10^6 Pa) أي (609 psi) ، أما الأغشية القديمة من ناحية أخرى عادة تكون ذات مقاومة أعلى من 10^12 Pa s/m كما هو واضح في المخطط السابق و ميكانيكيق التحكم بالأداء من أجل تلك الأغشية هو من خلال انتقال الكتلة بضغط أعلى من 7×10^6 Pa (1000 psi) وبناء عليه فليس هناك حاجة لاعتبار التوازن لعمليات التناضح العكسي التي تستعمل أغشية قديمة .

إن الاستعادة المطلوبة من عمليات التناضح العكسي يمكن أن تكون إما عمليات انتقال أو توازن thermodynamic محكمة و التي تعتمد على ظروف التشغيل ، في حالة الضغط المنخفض و نظراً لكون التدفق النافذ صغير عبر الأغشية فإن قسم صغير من الماء المغذى يعبر من خلال الغشاء لينتج الماء أو النافذ و بالتالي تكون الاستعادة هنا محددة من خلال معامل انتقال الكتلة المنخفضة (الماء) وفي هذه الحالة فإن الاستعادة يمكن زيادتها من خلال تعزيز الانتقل للماء عبر الأغشية ، و عندما يكون الضغط عالياً فإن التدفق النافذ عبر الأغشية يمكن أن يكون عالياً جداً لدرجة أن الأملاح الموجودة في المحلول المركز من الممكن هنا أن يصل تركيزها إلى حالة التوازن داخل قناة الغشاء (وعاء الضغط) و هذه الظاهرة تقلل من قيمة الضغط الصافي و ربما تصل قيمته إلى الصفر و لا يتم إنتاج أي ماء في الجزء المتبقي من الوعاء ، وفي مثل هذه الحالة فإن الاستعادة لا يمكن زيادتها من خلال تحسين شروط انتقال الكتلة أو زيادة منطقة سطح الغشاء و بالإضافة إلى ذلك فإن هناك منطقة انتقال بين هذين النظامين أو الحالتين حيث أن الآليتان هنا تكون لهما نفس الأهمية لذا فإن الاستعادة الحقيقية ينبغي أن تكون منحني يقع أسفل هذه الخطوط المستقيمة كما هو مبين في المخطط (3) .



مخطط (3) التحكم بالآليات لعمليات تشغيل أنظمة التناضح العكسي المتكاملة عند ضغوط مختلفة و الاستعادة للماء محددة من خلال انتقال الكتلة (الماء) من أجل ضغط منخفض

5-3-2- ضغط التحول (Transition Pressure) :

الضغط في أي عملية RO ينتقل من حالة التحكم بانتقال الكتلة إلى حالة التحكم بالتوازن الديناميكي الحراري ضمن النظام ، كما أنه من الممكن تحديد هذه الحالات بدقة ، و الجمع بين المعادلتين 18 و 24 يمكن أن يعطينا العلاقة التالية :

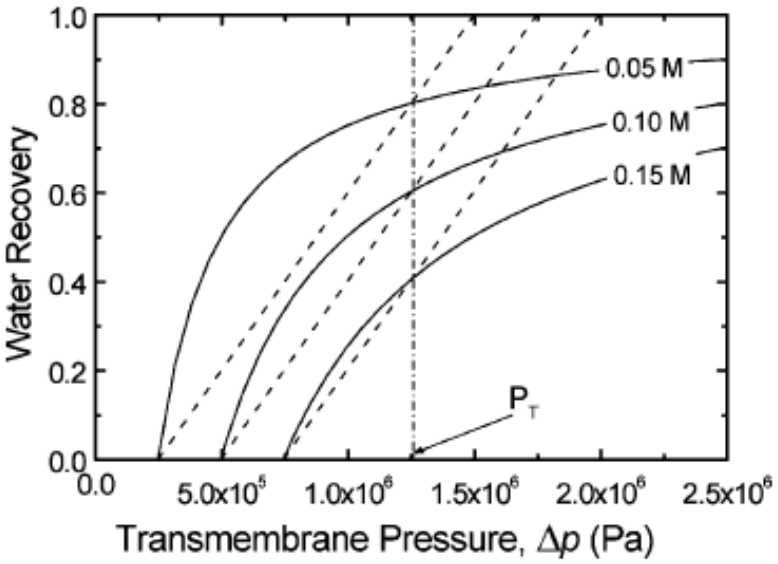
$$\Delta p_{\mathrm{T}} = \frac{1}{F} = \frac{uHR_{\mathrm{m}}}{L} \qquad 26$$

حيث :

Δp_{T} : **تحول ضغط غشاء النقل (transition transmembrane pressure) (Pa)**

وعندما يكون ضغط الغشاء الناقل أصغر من ضغط التحول يتم التحكم بالعمليات من خلال آلية انتقال الكتلة و فيما عدا ذلك يتم تقييد العمليات من خلال التوازن الديناميكي الحراري .

و بالنظر إلى المعادلة 26 يمكن ملاحظة أن ضغط التحول لم يخضع لتأثير تركيز الأملاح في مياه التغذية على الرغم من أهمية تركيز الأملاح في الحد من هذا التوازن وهذه النقطة الهامة يمكن أن تصور بشكل أوضح من خلال المخطط التالي :



مخطط (4) العلاقة بين ضغط الانتقال و تركيز الأملاح في ماء التغذية حيث أن ضغط الانتقال مستقل عن تركيز الأملاح

حيث أن الاستعادات يتم التحكم بها من خلال كلا الآليتين والتي تم حسابها من أجل ثلاثة تراكيز أملاح تغذية مختلفة لملح الطعام (NaCl) بتراكيز (0.15 M – 0.10 – 0.05) و البارامارات الأخرى التي استخدمت في المحاكاة الموجودة في الجدول السابق ، الشكل السابق يظهر أن خطوط الاستعادة تمثل آليتين مختلفتين (انتقال الكتلة مقابل التوازن الديناميكي الحراري) و التي تتقاطع عند نفس الضغط من أجل كل تراكيز الأملاح الثلاثة . عندما يكون الضغط الإسموزي للتغذية أعلى من ضغط الانتقال فإن أداء عملية التناضح العكسي يكون محكماً من خلال التوازن الديناميكي الحراري في كامل مدى الضغط .

5-4- ملاحظات :

إن استعمال أغشية تناضح عكسي ذات معدل نافذ أعلى (مايسمى بالضغط المنخفض) في العمليات المتكاملة شائع جداً ، و التوازن الديناميكي الحراري يظهر كتحديد و تقييد جدي وواقعي لأداء عمليات

التناضح العكسي و هناك ضغط تحول منقطع النظير من أجل عمليات التناضح العكسي والذي يحدد من خلال بارامترات العمليات ماعدا تركيز الأملاح في ماء التغذية . إن عمليات التناضح العكسي المتكاملة تكون محددة من خلال معدل انتقال الكتلة (الماء) عندما يكون الضغط اقل من ضغط التحول ، وعلى كل حال عندما يكون ضغط التشغيل (المطبق) أعلى من ضغط التحول فإن عمليات التناضح العكسي يتم ضبطها و التحكم بها من خلال التوازن الترموديناميكي . و هناك ميزات جديدة لعمليات التناضح العكسي التي يتم التحكم بها من خلال تقييد التوازن في حالة التوازن حيث أن الاستعادة لنظام التناضح العكسي تحدد فقط من خلال تركيز الأملاح (الضغط الإسموزي) و بالتالي فإن فشل الأغشية ربما يصبح غير قابل للكشف من خلال أداء النظام طالما أن العملية يتم تشغيلها على أساس نظام أو حالة التحكم بالتوازن ، و الفهم الأفضل لعمليات التناضح العكسي في حالة التشغيل المتكامل يمكن أن تحقق فقط عندما تكون ميزات و نتائج التحكم بهذا التوازن مقدرة تماماً .

6- تصميم أنظمة التناضح العكسي :

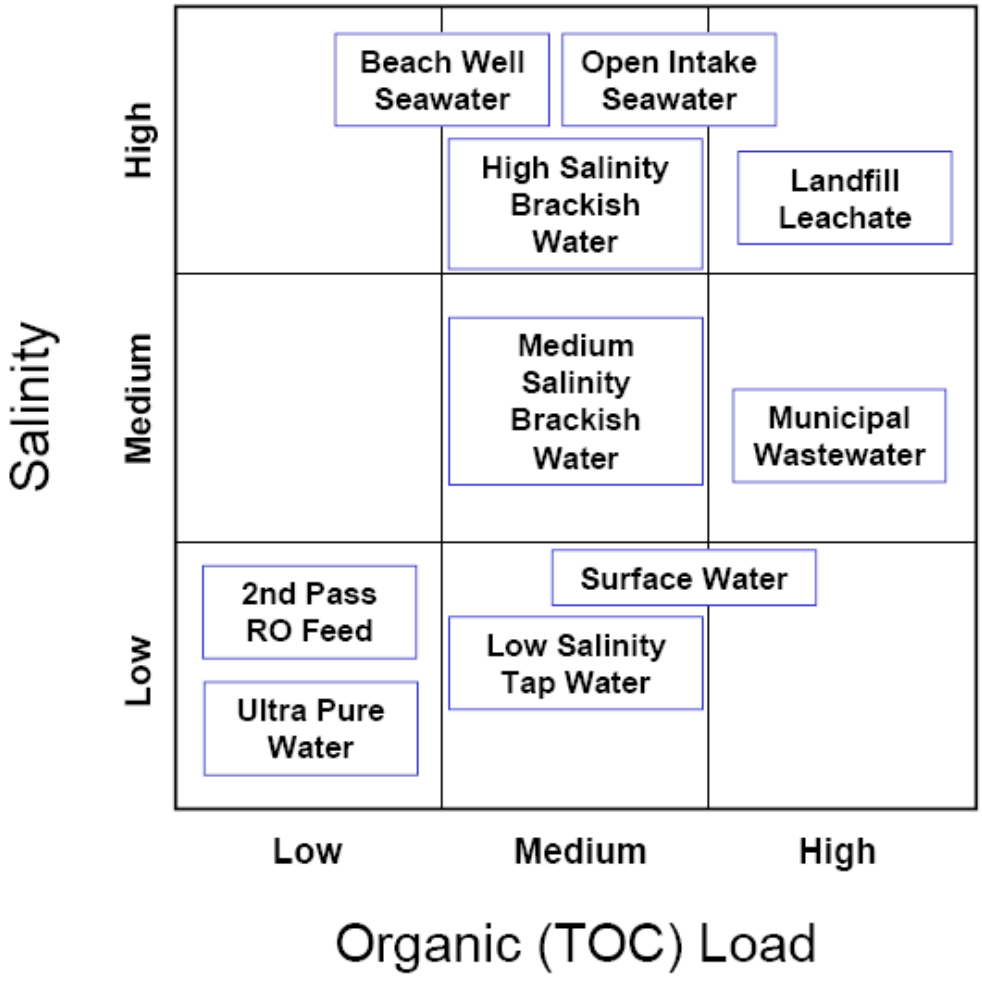
قبل البدء بتصميم نظام التناضح العكسي يجب معرفة نوعية المياه اللازم معالجتها و مواصفاتها بدقة لمعرفة عدد المراحل اللازم استخدامها في نظام التناضح العكسي و كذلك الاختيار المناسب للأغشية وفق تلك النوعية و سنعرض أمثلة على مواصفات المياه و تركيز و نوعية الأملاح و المواد المتواجدة فيها .

6-1- أنواع المياه المعالجة بنظام (RO) :

أنواع الماء الرئيسية المعالجة من قبل نظام (RO) يمكن وصفها بسهولة من خلال الأملاح الكلية الذائبة (TDS) المحتواة و الحمل العضوي (الكربون العضوي الكلي TOC) كما في التالي :

- الملوحة المنخفضة جداً و المياه ذات النقاوة العالية (HPW) تأتي من أنظمة التناضح العكسي الأولى (نظام تناضح عكسي ذو اجتيازين) أو من مرحلة التبادل الأيوني في أنظمة الماء النقي (UPW) مع أملاح ذائبة كلية فوق (50 mg/l)
- الملوحة المنخفضة تعطى عندما تكون الأملاح الذائبة الكلية فوق (500 mg/l)
- المياه المسوس ذات الملوحة المتوسطة عندما تكون (TDS) أكبر من (5000 mg/l)
- التدفق الثالثي ذو الملوحة المتوسطة مع كربون عضوي عالي و محتوى أكسجين حيوي (BOD) و أملاح ذائبة كلية فوق(5000 mg/l)
- مياه المسوس ذات الملوحة العالية بتركيز (5000- 15000 mg/l) و ماء البحر ذي ملوحة حوالي (35000 mg/l) .

و الشكل التالي يوضح نوعية تلك المياه :



شكل (1) نوعية و ملوحة المياه المختلفة المعالجة بأنظمة RO أو أنظمة RO / NF

حيث :

Beach Well Seawater : ماء بحر شاطئي ذو ملوحة عالية .

Open Intake Seawater : ماء بحر مكشوف ذو ملوحة عالية .

High Salinity Brackish Water : ماء مسوس عالي الملوحة .

Landfill Leachate : ماء مرتشح من مواقع دفن النفايات ذو ملوحة عالية

Medium Salinity Brackish Water : ماء مسوس ذو ملوحة متوسطة

Municipal Wastewater : مياه الصرف البلدية .

2Nd RO Feed : ماء تغذية للاجتياز الثاني لنظام التناضح العكسي ذو ملوحة منخفضة .

Ultra Pure Water : ماء عالي النقاوة .

Surface Water : ماء سطحي ذو ملوحة منخفضة

Low Salinity Tap Water : ماء حنفية منخفض الملوحة .

إن ماء البحر النموذجي يكون ذو ملوحة حوالي (35000 mg/l) و الذي يشكل إلى حد بعيد الكمية الأكبر للمياه في العالم و تركيب ماء البحر تقريباً نفسه في العديد من أجزاء البحار في العالم ، حيث أن محتوى ال (TDS) الفعلي يمكن أن يتفاوت في مناطق عديدة من بحر البلطيق حيث يمكن أن يكون عند السطح (7000 mg / l) أما في البحر الأحمر و الخليج العربي فهي بحدود (45000 mg/l) و التراكيب الفعلية يمكن أن تخمن بشكل متناسب مع تركيب ماء البحر القياسي و الماء الناتج عن الآبار القريبة من مياه البحر و بالاعتماد على التربة يكون ذو تركيب مختلف تماماً عن ماء البحر الذي وصلت مياهه إليه .

6-1-1- مياه البحر (Seawater) :

إن ماء البحر و غيره من أصناف المياه المالحة التي منها يستخلص الإنسان مياهه العذبة ماهي في الحقيقة إلا محاليل مائية للأملاح ، و يختلف التركيز الكلي للأملاح من مياه البحر من مكان لأخر . و كما يتضح من الجدول 4 فهو في البحر الأحمر ومياه الخليج العربي يعادل تقريباً ستة أضعاف قيمته في بحر البلطيق و يعزى هذا الاختلاف الكبير في التركيز الكلي للأملاح (TDS) إلى عوامل متعددة أهمها :

1- كمية المياه العذبة التي تصب في البحر، فبحر البلطيق مثلاً تأتيه مياه عذبة كثيرة من الأنهار التي تصب فيه ، ومن الأمطار التي تنهمر عليه ، و كذلك من الثلوج الذائبة التي تجد طريقها إليه أما البحر الأحمر فلا تصيب فيه أنهار و حظه من الأمطار قليل .

2- أثر العوامل المناخية على كمية المياه المتبخرة ، والأحوال الجوية السائدة في المناطق الحارة كمنطقة الخليج و البحر الأحمر التي تساعد على كثرة التبخر و بالتالي على زيادة تركيز الأملاح . و بالرغم من أن الاختلاف في التركيز الكلي للأملاح كبير إلا أن تحليل عينات كثيرة من مياه البحار في أنحاء مختلفة من العالم أثبتت أن التركيب الكيميائي لمكونات الأملاح لا يختلف كثيراً من مكان لآخر بحيث يمكننا أن نعتبر التركيب المبين في الجدول (5) لعينة من مياه البحر مماثلاً للتركيب النسبي لمياه البحر على وجه العموم .

هذا و بالرغم من انه أمكن إثبات وجود حوالي 40 ايون من مياه البحر إلا أن أحد عشر فقط من هذه الأيونات هي التي يزيد تركيزها عن جزء واحد في المليون ، و يبين الجدول (6) التركيب الأيوني لعينة قياسية من مياه البحر .

و تأكيداً لما سبق ذكره من أن مياه البحر مهما اختلف مصدرها و التركيز العالي للأملاح بها فإن نسبة وجود الأيونات فيها لا تختلف إلا اختلافاً بسيطاً عن بعضها البعض .

جدول (4) تركيز الأملاح (جزء في المليون) في بعض البحار و المحيطات

بحر البلطيق	7000
البحر الأسود	13000
البحر الأدرياتيكي	25000
المحيط الهادي	33600
المحيط الهندي	33800
البحر الأبيض المتوسط	39400

الخليج العربي (الكويت)	42100
البحر الأحمر (جدة)	41200
البحر الأحمر (ينبع)	42300

الجدول (5) التركيب النسبي لمكونات الأملاح الذائبة في عينة قياسية من ماء البحر

المركب	التركيز (ppm)	النسبة المئوية
كلوريد الصوديوم NaCl	23476	68.08
كلوريد المغنزيوم MgCl2	4981	14.44
كبريتات الصوديوم Na2So4	3917	11.36
كلوريد الكالسيوم CaCl2	1102	3.20
كلوريد البوتاسيوم KCl	664	1.92
بيكربونات الصوديوم NaHCo3	192	0.56
بروميد البوتاسيوم KBr	96	0.28
حمض البوريك HBo3	26	0.08
كلوريد السترشيوم SrCl2	24	0.07
فلوريد الصوديوم NaF	3	0.01
المجموع الكلي	34481	100

جدول (6) التركيب الأيوني لعينة قياسية من مياه المحيطات

الأيونات الموجبة	الكاتيون	التركيز ppm
الصوديوم	Na+	10556
المغنزيوم	Mg2+	1272
الكالسيوم	Ca2+	400
البوتاسيوم	K+	380
السترنشيوم	Sr2+	13
مجموع الأيونات الموجبة	–	12621

الأيونات السالبة	الأنيون	التركيز ppm
الكلور	Cl-	18980
الكبريتات	So4--	2649
البيكربونات	HCo3-	140
الفلوريد	F-	1.4
البروميد	Br-	65
مجموع الأيونات السالبة	–	21835.4
حمض البوريك	–	26
المجموع الكلي	–	34482.4

و الجدول (7) يعطي التراكيز الأيونية المختلفة لمياه بحر نموذجية من مصدر آخر

جدول (7)

Ion	Concentration (mg/L)
Calcium	410
Magnesium	1,310
Sodium	10,900
Potassium	390
Barium	0.05
Strontium	13
Iron	<0.02
Manganese	<0.01
Silica	0.04 - 8
Chloride	19,700
Sulfate	2,740
Fluoride	1.4
Bromide	65
Nitrate	<0.7
Bicarbonate	152
Boron	4 - 5
Other	
TDS	35,000 mg/L
pH	8.1

و الجدول (8) يعطي ملوحة و ناقلية بعض أنواع مياه البحر بمناطق مختلفة

جدول (8)

Location	Salinity TDS ppm	Conductivity K µS/cm	Factor K/TDS µS/(cm·ppm)
South Pacific	<36,000	<51,660	1.43 - 1.44
Gran Canaria (Atlantic Ocean)	37,600	53,280	1.42
Sardinia (Mediterranean Sea)	40,800	57,240	1.40
Bahrain	42,500	59,350	1.40
Egypt (Red Sea)	44,000	62,990	1.38

و يجب أن يتم الأخذ بعين الاعتبار الصفات الأساسية لمياه البحر عند تصميم نظام التناضح العكسي، و كنتيجة للملوحة العالية لمياه البحر يتولد ضغط إسموزي أو تناضحي عالي (حوالي 25 بار) و الاستعادة للنظام يجب أن تحدد بحوالي (% 40-50) لكي لا يتجاوز الضغط الإسموزي حدود الضغط الطبيعية أو المصممة للأغشية أو حدود استهلاك الطاقة الموافقة لضغوط التغذية الأكبر عند معدل الاستعادة الأكبر المسموح به أو لتحديد الملوحة مع أو بدون تركيز البورن في الماء الناتج .

6-1-2- المياه المسوس (Brackish Water) :

في معالجة الماء المسوس العامل الأساسي الذي يحدد الاستعادة المطلوبة هو العوامل الطبيعية (مياه الهطولات المطرية ، تكون التكلسات و القشور مثل كربونات الكالسيوم أو كبريتات الكالسيوم) ، كما أن إمكانية إتلاف الأغشية يؤخذ بها بعين الاعتبار عند معالجة الماء المسوس و هناك العديد من الطرق لتقييم إمكانية التلوث العضوي .

أما في المياه الصناعية و المنزلية فهناك ملوثات مختلفة عضوية و غير عضوية و العوامل المحددة أحياناً تضيف صفات و خصائص أخرى لمياه التغذية و مثال على ذلك المواد العضوية مثل إمكانية تشكل ترسبات من الفوسفات . الجدول (9) يعطي تركيب مياه مسوس مختلفة المصدر

جدول (9) أمثلة على مكونات الماء المسوس

Parameter	Unit	Well water[a]	Well water[b]	Lake water[c]	Surface water[d]	Pretreated tertiary effluent[e]
Calcium	mg/L	84	113	54	102	40 - 64
Magnesium	mg/L	6	2.7	23	11	—
Sodium	mg/L	36	23	87	20	150 - 200
Potassium	mg/L	3.3	2	6.6	4	—
Iron	mg/L	<0.05	0.2	0.05	ND-015	0.02 - 0.09
Manganese	mg/L	0.01	0.1	<0.01	<0.01	<0.05
Barium	mg/L	0.07	0.1	0.09	—	0.01 - 0.1
Strontium	mg/L	0.7	1	1	—	0.2 - 1
Ammonium	mg/L	<0.05	—	—	0.3	22 - 66
Aluminum	mg/L	0.02	—	0.02	ND-0.15	0.03
Chloride	mg/L	45	52	67	33	150 - 500
Bicarbonate	mg/L	265	325	134	287	48.8 - 97.6
Sulfate	mg/L	24	8	201	56	120 - 160
Nitrate	mg/L	4.3	4	<1.0	15	40 - 60
Fluoride	mg/L	0.14	0.7	—	0.25	0.7 - 0.7
Phosphate	mg/L	<0.05	0.6	0.01	1.2	6.1 - 12.2
Silica	mg/L	9	11	3.1	7 - 17	6 - 10
Hydrogen Sulfide	mg/L	—	1.5	—	—	ND
TDS	mg/L	478	377	573	400	500 - 1,300
TOC	mg/L	1.5	10	3.6	2.4	20 - 30 (COD)
Color	Pt	<5	40	—	<5	13 (Hazen)
Turbidity	NTU	—	—	—	2 - 130	0.4 - 1.7
pH	—	7.5	7.4	8.2	8	6.6 - 7.4
Conductivity	µS/cm	590	—	879	400 - 700	700 - 2,200
Temperature	°C	12	23 - 28	—	3 - 25	25 - 35

و الجدول (10) يعطي أمثلة أخرى على الاختلاف في تركيز الأيونات و PH لمياه مسوس من مصادر أخرى

جدول (10)

الأيونات الموجبة	مصدر 1	مصدر 2	مصدر 3	مصدر 4	مصدر 5
الصوديوم	11700	500	494	542	74
الكالسيوم	148	120	65	102	204
المغنزيوم	48	72	40	54	127
البوتاسيوم	–	9	–	–	–
الحديد	1	–	2	–	–
المنغنيز	–	–	1	–	–
البورن	–	3	–	–	–
المجموع	1366	703	602	698	405

الأيونات السالبة	مصدر 1	مصدر 2	مصدر 3	مصدر 4	مصدر 5
الكلوريد	2040	252	72	1090	50
الكبريتات	137	1170	1060	38	984
البيكربونات	96	–	260	110	159
الكربونات	–	–	–	–	–
النترات	–	0.8	4	–	–
الفلوريد	–	0.2	–	–	–
المجموع	2273	1423	1396	1238	1193
السيليكا	25	–	–	–	–
المجموع	3664	2127	1998	1936	1598
pH	7.1	–	7.4	7.8	7.2

و بناء على الاختلاف الكبير في نوعية ماء التغذية فإن الخطوة الأولى اللازمة هي معرفة خصائص المياه و ذلك قبل تصميم نظام التناضح العكسي و ذلك لمعرفة كيفية تصميم و تشغيل النظام بسهولة و دون أخطاء أو اتلاف للأغشية و يجب أن يتم عمل تقرير مفصل عن نوعية مياه التغذية من قبل الدارس لموازنة الأيونات و الشوارد (و بمعنى آخر ، تركيز الأنيونات و الكاتيونات ينبغي أن يكون مطابقاً كمكافئ من

كربونات الكالسيوم) و إذا لم يتم تحقيق توازن لشوارد الماء فينبغي عندها إضافة إما شوارد صوديوم +Na أو كلور -Cl لتحقيق الاتزان الشاردي المطلوب (كما سنرى في برنامج ROSA) .

أي ينبغي عمل تقرير متكامل عن مكونات مياه التغذية و قيمة الPH و درجة الحرارة و BOD و TOC و COD و تركيز الأيونات المختلفة و ذلك من قبل المصمم قبل البدء بالتصميم و حتى من قبل المشغل لمقارنة هذه البيانات بالشروط التشغيلية و التصميمية لنظام التناضح العكسي لأن هذه المعلومات ستشكل الأساس الذي سيعتمد عليه في التصميم الملائم لنظام ال RO و الورقة التالية تبين هذه التحاليل و التقرير حول نوعية مياه التغذية

كيفية كتابة تقرير التحليل لماء التغذية و الأيونات و المكونات الأخرى

Sample identification: .....
Feed source: .....
Conductivity: ..... pH: ..... Temperature (°C): .....

Feed water analysis:				
Please give units (mg/L as ion	NH_4^+	.....	CO_2	.....
or ppm as $CaCO_3$ or meq/L)	K^+	.....	CO_3^{2-}	.....
	Na^+	.....	HCO_3^-	.....
	Mg^{2+}	.....	NO_3^-	.....
	Ca^{2+}	.....	Cl^-	.....
	Ba^{2+}	.....	F^-	.....
	Sr^{2+}	.....	SO_4^{2-}	.....
	Fe^{2+}	.....	PO_4^{2-}	.....
	Fe (tot)	.....	S^{2-}	.....
	Mn^{2+}	.....	SiO_2 (colloidal)	.....
	Boron	.....	SiO_2 (soluble)	.....
	Al^{3+}	.....		

Other ions: .....

TDS (by method): .....
TOC: .....
BOD: .....
COD: .....
AOC: .....
BDOC: .....

Total alkalinity (m-value): .....
Carbonate alkalinity (p-value): .....
Total hardness: .....
Turbidity (NTU): .....
Silt density index (SDI): .....
Bacteria (count/ml): .....
Free chlorine: .....

Remarks: .....
(odor, smell, color, biological activity, etc.) .....
.....
.....

Analysis by: .....

Date: .....

ملاحظة : إن شوارد +Ba2 و +Sr2 ينبغي أن تحلل إلى 1 mg/l (ppm) عند الكشف على التوالي كما أنه من الضروري أن تعطى درجة الحرارة كمعدل حقيقي بدلاً من القيمة المطلقة لها لأن اختلاف درجة الحرارة يمكن أن يؤثر على إمكانية تكوين ترسبات في نظام التناضح العكسي و بصورة خاصة عندما تكون مستويات البيكربونات والسيليكات في ماء التغذية عالية .

6-2- معلومات و بيانات التصميم :

هناك العديد من إمكانيات و احتمالات التصميم الخاصة للمتطلبات التالية :

1- تحسين كمية المنتج :

- استخدام جزء أو كل عناصر ماء البحر من أجل ماء التغذية المسوس (الضارب للملوحة)

- استخدام عناصر ماء البحر في مرحلة واحدة أو عدة مراحل وفق نظام المرحلة النافذ .

- إعادة تدوير التدفق النافذ من المرحلة الأخيرة لمياه التغذية .

2- زيادة استعادة النظام :

- تغذية المحلول المركز للنظام الثاني بعد عملية إعادة معالجة محددة

3- الحصول على استعادة عالية و تدفق نافذ موحد لكل عنصر مع ماء تغذية ذو ملوحة متوسطة :

- استخدام مضخات إضافية بين المراحل لتعويض الزيادة في الضغط الإسموزي .

- استخدام الضغط الخلفي النافذ المرفوض من أول لأخر مرحلة .

- استخدام نظام هجين للتصميم مع أغشية أكثر كتامة في المرحلة الأولى عنها في المرحلة الثانية (مثل أغشية BW3 في الأولى و أغشية XLE في المرحلة الثانية مثلاً) .

4- إنتاج كميات ماء نافذ مختلفة :

- فصل النافذ من المراحل المختلفة : النافذ من المرحلة الأولى يكون ذو نوعية أفضل بصورة خاصة عندما تكون المرحلة الأولى مجهزة بأغشية ذات قابلية رفض أعلى للأملاح و الملوثات

5- إنقاص و تقليل سعة الوحدة للحصول على كمية معينة من النافذ :

- مزج و خلط النافذ بماء التغذية

6-عمل التدابير الاحتياطية لتوسعة النظام أو الوحدة :

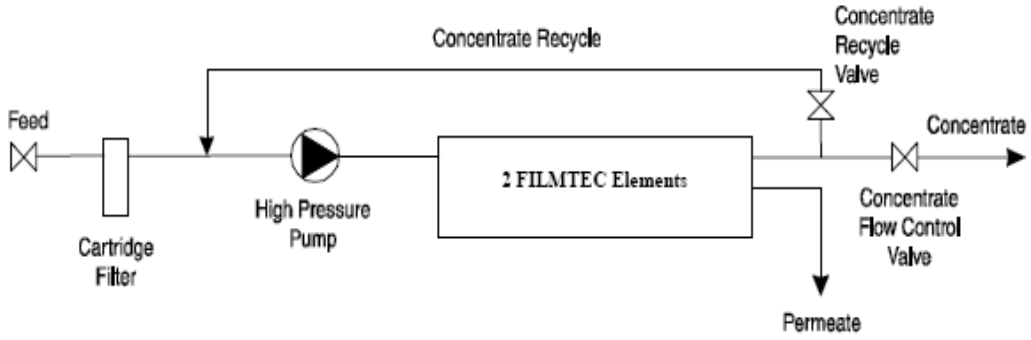
- استعمال مكان حر في وعاء الضغط (أي فراغ للعنصر لإمكانية استبداله بعنصر آخر)

- تصميم نموذج داعم ليلائم أوعية الضغط الزائدة .

6-2-1- تصميم نظام المرحلة الواحدة (Single Module System) :

النظام ذو المرحلة الوحيدة : أي وحدة تحوي وعاء أو إناء ضغط يحوي أقل من ثمانية عناصر من الأغشية الموصولة بشكل متتالي و متسلسل ، المحلول المركز الناتج عن العنصر الأول يصبح عبارة عن ماء تغذية للعنصر الثاني ، و المحلول المركز الناتج عن العنصر الثاني يغذي العنصر الثالث ... وهكذا ، و أنابيب كل العناصر تزاوج و تربط للنقطة الأخيرة من الوحدة حيث يتم جمع المحلول المركز النهائي الناتج عن الوحدة ككل ، نقطة النهاية هذه ربما توضع في نهاية نقطة التغذية أو نهاية نقطة المحلول المركز . أنظمة الوحدة المفردة يتم اختيارها فقط عند الحاجة لتدفقات نافذة محددة باستعمال عنصر وحيد من الأغشية أو عدد قليل منها ،

الشكل التالي يظهر النموذج المحتوي على عنصرين من الأغشية حيث ماء التغذية يدخل النظام من خلال صمام التغذية و يتدفق من خلال فلتر خرطوشي حتى الوصول إلى مضخة الضغط العالي .



شكل (2) النظام ذو المرحلة الواحدة

من مضخة الضغط العالي يتدفق ماء التغذية إلى مدخل التغذية المتصل مع النموذج و هنا التيار الناتج ينبغي أن يترك الوحدة بضغط لا يزيد عن (5 psi) (0.3 بار) فوق الضغط الجوي ، حيث يتطلب ذلك ضغط نافذ أعلى أحياناً و مثال على ذلك : لتغذية قسم ما بعد المعالجة أو لتوزيع المنتج بدون مضخة تعزيز . و بعد ذلك ضغط التغذية يجب أن تتم زيادته و ذلك عن طريق صمام تحكم بالضغط النافذ لكن ضغط التغذية الأعظمي المحدد يجب أن تتم مراقبته بعناية و في هذه الحالة ينبغي اتخاذ إجراءات الحماية في أي وقت خصوصاً في حالة التوقف أو الانغلاق المفاجئ للصمام لأنه في هذه الحالة فإن مضخة الضغط النافذ سوف لن تزيد ضغط التغذية عن (0.3 بار) كما يجب مراعاة الضغط الأعظمي المسموح به لتجنب تلف الأوعية و الأغشية و هذا يحدد بالاختيار المناسب للأغشية و للمضخة و كذلك للصمام و إجراءات المراقبة و غيرها .

يعود ترك المحلول الملحي المركز نقطة اتصاله بالمخرج إلى ضغط التغذية ، يبلغ هبوط الضغط عادةً (5 – 30 psi) (0.3–2 بار) من مدخل التغذية لمخرج المحلول المركز المتخلف و هذا يعتمد على عدد عناصر الأغشية ضمن الوحدة ، سرعة التدفق ، و درجة الحرارة .

يتم التحكم بتدفق المحلول الملحي بوساطة صمام ، كما يتم التحكم بمعدل الاستعادة للنظام بوساطة هذا الصمام و يجب ألا تزيد أبداً عن القيمة المحددة المذكورة من قبل المصنع أو المصمم للنظام.

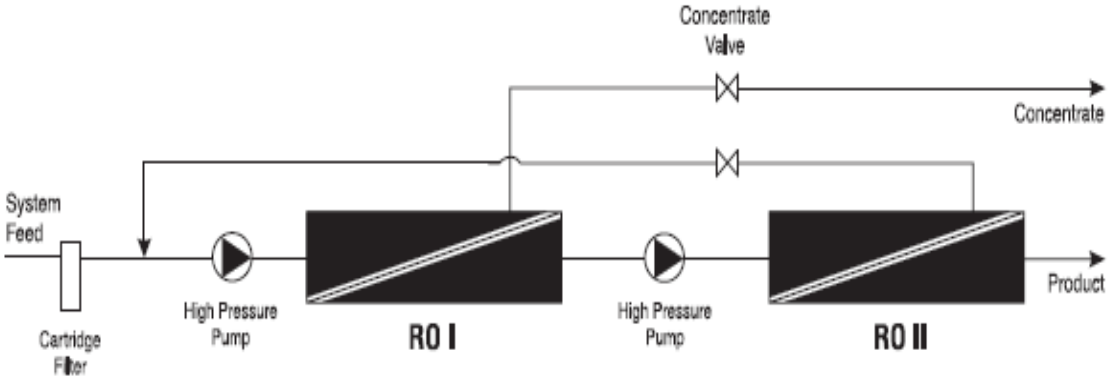
6-2-2- تصميم نظام المراحل النافذة (Permeate-Staged System) :

نظام المرحلة النافذ ربما يدرس من أجل الأسباب التالية :

1- الكمية النافذة المقاسة غير كافية .
2- المعالجة اللاحقة مع التبادل الأيوني غير مسموحة (مواد كيميائية معاد تنشيطها) .
3- رفض البكتريا ، و المواد العضوية أكثر أهمية .
4- الموثوقية و إمكانية الاعتماد العالية .

إن إنتاج الماء لأجل الاستعمال الصيدلاني و الطبي هو تطبيق مثالي لنظام المرحلة النافذ ، و يتخلل هذا النظام مجموع نظامي (RO/NF) حيث أن التدفق النافذ من النظام الأول(الاجتياز الأول) يصبح عبارة عن تدفق تغذية للنظام الثاني (الاجتياز الثاني) ، و كلاً من نظامي التناضح العكسي و الترشيح النانومتري يمكن أن يتكونا من مرحلة واحدة أو مراحل متعددة و أيضاً يمكن أن يكون هذين النظامين ذوي تدفق جبهي أو إعادة تدوير .

يعرض الشكل التالي مخطط تدفق تخطيطي لنظام التناضح العكسي (RO) ذو المرحلة النافذ ، حيث أن المحلول المركز من (RO 11) يعاد تدويره ليصبح تدفق تغذية أو ليغذي المرحلة (RO 1) لأن نوعيته عادةً أفضل من ماء تغذية النظام ككل ، و نظراً لكون ماء تغذية للمرحلة (RO11) ذو نوعية جيدة و أفضل من ماء تغذية الاجتياز الأول فإن(RO11) من الممكن أن يصمم باستعادة أكبر من (RO1) و كذلك بعدد عناصر أغشية أقل .



شكل (3) نظام المراحل النافذة

و بدلاً من وضع مضخة ذات ضغط عالي منفصلة للاجتياز الثاني النظام ككل يمكن أيضاً أن يشغل بمضخة ضغط عالي واحدة ، و ضغط التغذية الاعظمي المسموح به لعنصر الغشاء لا يتجاوز (600PSI) أي (41بار) من أجل أغشية محددة و ذات نوع معين (نوع BW) ، الاجتياز الثاني عندها يمكن أن يشغل بالضغط المعاد النافذ من الاجتياز الأول أي من (RO1) ، و يجب الأخذ بعين الاعتبار العناية و التدريب اللازم للتأكد من الضغط الخلفي النافذ في أي وقت كي لا يزيد عن ضغط التغذية بأكثر من(5PSI) أي 0.3 بار .

خزان التدفق يمكن أن يستعمل لجمع التدفق النافذ من الاجتياز الأول ، و هذا الخزان يجب أن يحمى بعناية ضد التلوث بالميكروبات و الجراثيم و كذلك لمنع تراكم الغبار و الأوساخ فيه .

الناقلية في العديد من الحالات أكثر البارامترات أهمية في نوعية الماء المنتج ففي حالة عدم التخلص من (CO2) بوساطة الأغشية فإنه سيخرج مع الماء المنتج على شكل حمض الكربون (H2CO3) و بهذه الحالة تزداد ناقلية الماء المنتج و هذا المرور لثاني أكسيد الكربون ينبغي أن يمنع بمعايرةPH ماء التغذية المار للاجتياز الأول (RO1) للقيمة (8.2) و في هذه القيمة فإن معظم ثاني أكسيد الكربون الموجود بمياه التغذية يتحول إلى كربونات الهيدروجين (H2CO3) و التي يتم رفضها و التخلص منها

بشكل جيد من قبل الغشاء ، هيدروكسيد الصوديوم (الصود الكاوي NAOH) يمكن أن يحقن إما إلى التدفق النافذ من الاجتياز الأول (RO1) أو إلى تدفق التغذية له ، ناقلية الماء المنتج المفضلة يمكن أن تحقق إذا تم تحسين قيمة PH في ماء التغذية المار للاجتياز الأول و هذا يدل ضمنياً على أن إمكانية قياس كربونات الكالسيوم الموجودة يمكن التحكم بها عند القيمة (8.2-8.5) للأس الهيدروجيني ، و بهذه الفكرة ناقلية المنتج النموذجية تكون أصغر من (1 iS /cm) و التي من الممكن أن تتحقق .

أما قابلية الاستعادة عادة يتم تحديدها بإمكانية قياس ماء التغذية، لكن الاستعادة للاجتياز الثاني يمكن أن تكون أكبر من (90-95%) و ذلك بهدف خفض كلفة النظام و من ناحية أخرى الاستعادة المعتدلة أكثر للاجتياز الثاني تساعد على تكبير كمية الماء الناتج على حساب الاجتياز الأول بشكل أكبر (أي عندها يجب أن يعالج معدل التدفق للمحلول المركز المتزايد من الاجتياز الثاني) .

6-2-3- نظام التغذية المجزأة بالمقارنة مع التغذية المستمرة :

إن نظام التناضح العكسي و الترشيح النانومتري يصممان عادةً للعملية المستمرة ، و حالة تشغيل كل عنصرغشاء في نظام الوحدة تكون ثابتة مع الزمن ، و الشكل التالي يوضح طراز العمليات المستمرة

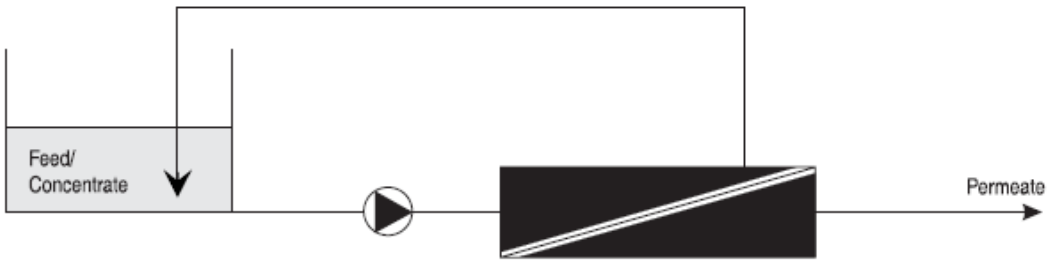
شكل (4) العملية المستمرة (Continuous)

في بعض التطبيقات عندما تكون الحجوم صغيرة نسبياً (الوجبة أو الكمية) من مياه التغذية الخاصة فإن العملية تحدث بشكل متقطع ، و مثال على ذلك :

مياه صرف أو المحاليل الناتجة من العمليات الصناعية ، فإن نمط عملية الوجبة يكون له الأفضلية أو المفضل في مثل هذه الحالة .

إن ماء التغذية يجمع ضمن خزان و يعالج فيما بعد بالمعالجة اللاحقة .

الماء النافذ عبر المنظومة السابقة يزال بينما المحلول المركز يعاد تدويره مرة ثانية إلى الخزان . في نهاية عمليات التغذية (batch الوجبة) يبقى حجم صغير من المحلول الملحي المركز الناتج في خزان التغذية و بعد ذلك يتم صرفه و تفريغ الخزان ، أما بالنسبة للأغشية فالتنظيف النموذجي لها يتم قبل امتلاء الخزان مرة ثانية بوجبة مياه جديدة كما في الشكل التالي الذي يبين نموذج الوجبة



شكل (5) نظام الوجبة (Batch)

أما النمط المسمى ب (نصف الدفعة أو نصف الوجبة) فهو تعديل لنمط الدفعة السابق ، في نمط العملية المسماة نصف الدفعة ، يعاد ملء خزان التغذية بماء التغذية و ذلك أثناء العملية حيث تنتهي الوجبة مع امتلاء خزان التغذية بالمحلول المركز الناتج عن المعالجة و هذا بدوره يسمح باستخدام خزان ذو حجم أصغر من العملية السابقة التي تحتاج إلى خزان ذو حجم أكبر من هذا .

أنظمة الدفعة تصمم عادة بضغط تغذية ثابت و تدفق نافذ مرفوض الأملاح ، حيث تصبح التغذية أكثر تركيزاً من الأملاح باستمرار مرور المياه و رفص الأملاح و في هذه الأنظمة يجب الأخذ بعين الاعتبار التنظيف الملائم للأغشية .

تمتاز أنظمة التغذية على دفعات عن أنظمة التغذية المستمرة بالميزات التالية :

1- مرنة و تمتاز باستيعابها للتغيرات في نوع مياه التغذية .

2- الاستعادة في هذه الأنظمة يمكن زيادتها دفعة وراء دفعة .

3- سهلة التنظيف .

4- سهلة التشغيل الأتوماتيكي .

5- نوعية الماء النافذ يمكن التحكم بها بانتهاء العملية .

6- نوعية الماء النافذ يمكن تحسينها بوساطة المعالجة الكلية أو الجزئية .

7- شروط التشغيل مناسبة للأنظمة ذات العنصر المفرد (أو العدد المنخفض) لأن الأغشية تتصل مع المحلول الملحي المركز النهائي فقط لفترة قصيرة .

8- توسيع المحطة أو المجموعة سهل نوعاً ما .

9- كلف الاستثمار منخفضة .

أما مساوئ هذه الأنظمة فهي :

1- التدفق النافذ عبر الأغشية غير متواصل .

2- الكمية النافذة غير ثابتة .

3- تتطلب خزان تغذية كبير .

4- تتطلب مضخة كبيرة .

5- استهلاك الطاقة أكبر .

6- زمن مكوث أطول لماء التغذية و الماء النافذ (فترة معالجة أطول) .

7- الكلف الكلية تكون أعلى .

الغالبية العظمى لأنظمة التناضح العكسي تصمم وفق العملية المستمرة مع تدفق نافذ ثابت و استعادة ثابتة . الاختلافات في درجة حرارة ماء التغذية و آثار التلوث يتم تعويضها بوساطة تسوية و تعديل ضغط التغذية. يجب الأخذ بعين الاعتبار أن إزالة الملوثات و الجراثيم في هذا النوع من الأنظمة يعتمد على كفاءة تصميم المحطة و صيانة النظام بشكل مستمر .

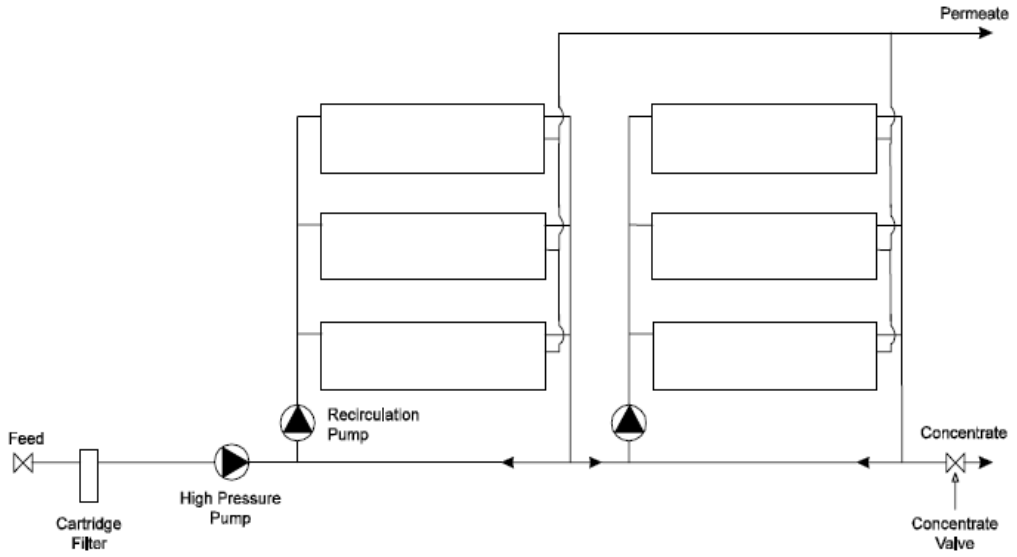
6-2-4- نظام الجريان الجبهي بالمقارنة مع نظام إعادة التدوير :

إن نظام التناضح العكسي القياسي الذي يصمم من أجل تطبيقات إزالة ملوحة المياه يكون من خلال فكرة الجريان الجبهي .

في أنظمة الجريان الجبهي يتم إدخال ماء التغذية مرة واحدة فقط عبر النظام (أي بدون إعادة تدوير للمياه) حيث أن الجزء المحقق من التغذية يجتاز الغشاء لينتج التدفق النافذ عبر الغشاء أي أن التغذية بشكل تدريجي تركز و تغادر النظام بتركيز عالي جداً .

أما عملية إعادة التدوير للمحلول الملحي الناتج فتستعمل عندما يكون عدد العناصر صغير جداً ليحرز استعادة عالية كافية للنظام عند استخدام نظام الجريان الجبهي كما أن أنظمة إعادة تدوير المحلول الملحي يمكن استعمالها أيضاً للعديد من العمليات الخاصة و التطبيقات الضرورية مثل معالجة مياه الصرف و السوائل .

في الأنظمة التي تعمل بعملية إعادة التدوير الذاتي قسم من المحلول المركز (**concentrate**) المطرود خارج النظام (أو المرحلة) يدار إلى جانب التغذية للنظام (أو المرحلة) و يمزج مع تيار ماء التغذية . الأنظمة المتعددة المراحل يمكن أيضاً أن تصمم على هذا الأساس (أي إعادة التدوير الذاتي للمحلول المركز) لكل مرحلة من المراحل و ذلك باستعمال مضخات إعادة تدوير منفصلة ، على سبيل المثال : يمكن أن يصمم النظام ذو التدفق الجبهي مع عملية إعادة تدوير المحلول المركز بدلاً من التدفق الجبهي و الشكل التالي يوضح عملية إعادة التدوير مع نظام بمرحلتين :



شكل (6) نظام بمرحلتين مع نظام إعادة التدوير الداخلي للمرفوض

إن الفائدة الرئيسية لمفهوم إعادة التوزيع أو التدوير هو معرفة معدل تدفق الغذاء للأنظمة بغض النظرعن درجة التلوث السابقة للنماذج و التغيرات في تركيب مياه التغذية ، السمات الأخرى لفكرة إعادة التدوير مذكورة في أنظمة نظام الدفعة بالمقارنة مع المستمرة و كذلك نظام الوحدة المفرد . موجز المقارنة يعطى بالجدول التالي :

جدول (11) مقارنة أنظمة الجريان الجبهي بأنظمة الاستعادة

البارامتر	جريان جبهي	إعادة تدوير
تركيب التغذية	يجب أن يكون ثابت	يمكن أن يتفاوت
الاستعادة	يجب أن يكون ثابت	يمكن أن يتفاوت
تنظيف	معقد أكثر	بسيط
تعويض الإفساد أو الضرر	صعب أكثر	سهل
ضغط الغشاء من مدخل التغذية لنهاية مخرج المحلول المركز	متناقص	موحد
استهلاك الطاقة	أخفض	أعلى (15-20 %)
عدد المضخات (استثمار – صيانة)	أخفض	أعلى
قابلية التوسع – تغيير منطقة الغشاء	صعب أكثر	سهل
جعل المراحل الفردية من الأنظمة المتعددة المراحل داخل / خارج الخدمة	غير ممكنة	ممكنة
مرور الأملاح عبر النظام	منخفض	مرتفع

إن مرور الأملاح الظاهر للنظام (SPs) يدعى أيضاً مرور ملح النظام و المعرف كتركيز المركب (قد يكون أيون ، مزيج أو مركب عضوي أو أملاح منحلة TDS) في المحلول النافذ و يرمز له Cp نسبة لتركيزه في ماء التغذية المرمز له Cf أي :

$$SP_s = \frac{C_p}{C_f} \qquad 27$$

في أنظمة الجريان الجبهي SPs عامل من استعادة النظام Y و مرور ملح الغشاء يرمز له (SPm)

$$SP_s = \frac{1-(1-Y)^{SP_M}}{Y} \qquad 28$$

حيث مرور ملح الغشاء عرف كتركيز المركب في التدفق النافذ (Cp) نسبة إلى تركيزه الوسطي من ناحية التغذية و المحلول المركز (Cfc) :

$$SP_M = \frac{C_p}{C_{fc}} \qquad 29$$

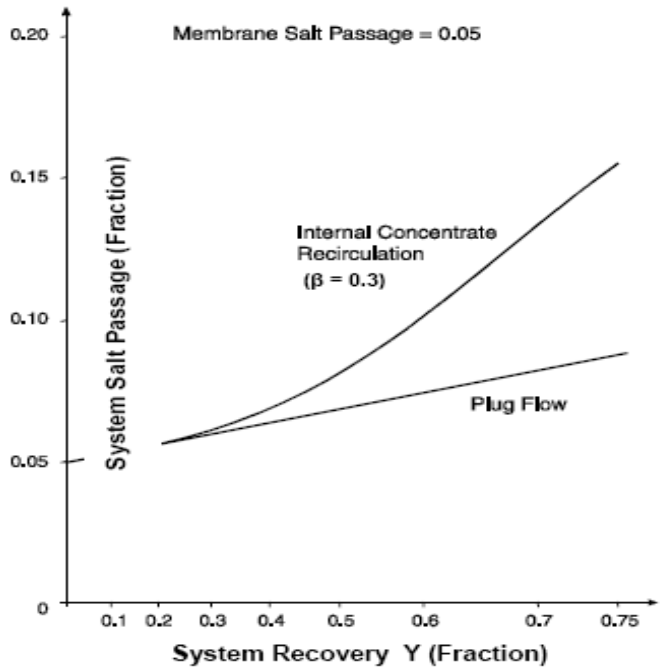
و في أنظمة إعادة التوزيع الذاتية هناك اعتماد على رقم بيتا الذي يعرف كالتالي :

$$\beta = \frac{\text{permeate flow leaving the module}}{\text{concentrate flow leaving the module}} \qquad 30$$

أي تدفق الماء النافذ الخارج من النظام إلى تدفق المحلول المركز الخارج .
في الأنظمة ذات إعادة التدوير الجزئي للمحلول المركز الناتج لتيار التغذية الداخل للنظام فإن مرور ملح النظام يعطى كالتالي :

$$SP_s = \frac{(1+\beta)^{SP_M} - 1}{Y(1+\beta)^{SP_M} - Y(1+\beta) + \beta} \qquad 31$$

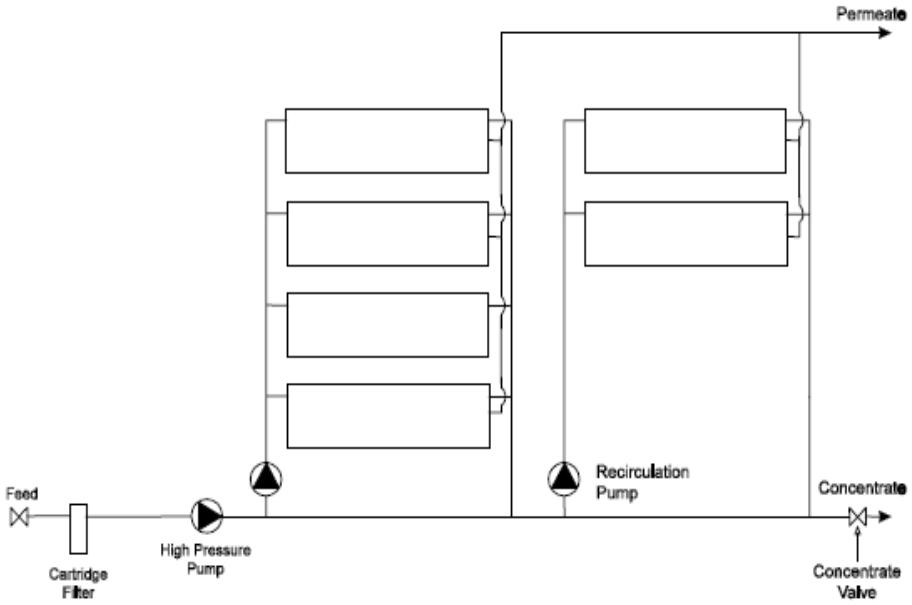
و في أنظمة الاستعادة العالية للأنظمة فإن مرور ملح النظام لنظام إعادة التدوير أكبر من نظام الجريان الجبهي بكثير و يدل على ذلك حساب العينة كما في المخطط (5) حيث أن الاختلاف قليل و على كل حال فمن أجل الأنظمة المتعددة المراحل ذات حلقات إعادة تدوير لكل مرحلة منها ، فإن مرور ملح النظام لهذا النظام (كمثال انظر الشكل التالي) يجب أن يحسب بتطبيق العلاقة 31 لكل مرحلة .



مخطط (5) مرور ملح النظام من أجل نظام الجريان الجبهي و نظام إعادة التدوير

عندما يقترب تيار المحلول المركز المعاد تدويره من الصفر العدد يقترب من القيمة[1- (1/ Y)] / 1 و يصبح نظام إعادة التدوير نظام ذو جريان جبهي و الحل الوسطي بين أنظمة إعادة التدوير و أنظمة الجريان الجبهي يكون بنظام إعادة التدوير المتناقص تدريجياً مع عدد هابط من الوحدات المتوازية في اتجاه تدفق التغذية.

و مضخات إعادة التغذية يمكن أن توضع في أي طريقة بحيث جزء صغير من المحلول المركز يغادر المرحلة و يعاد تدويره بينما الجزء الأكبر منه يجري للمرحلة التالية (أو إلى مخرج المحلول المركز ، للمرحلة الأخيرة) عندها فإن وضع الجريان يكون غالباً جبهي ، لكن مع ذلك تظل فائدة فكرة إعادة التدوير موجودة .



شكل (7) نظام إعادة التدوير المتناقص تدريجياً

6-2-5- أوعية الضغط و المضخة :

تتوفر أوعية الضغط بأقطار ، أطوال ، و معدلات ضغوط مختلفة . عندما يتم اختيار وعاء الضغط فأن تقدير الضغط المختار يجب أن يكون عالياً بما فيه الكفاية و ذلك للسماح بزيادة الضغط لتعويض التلوث الغير المتعذر إلغاؤه (نموذجياً **10%** أ كبر من المطلوب في التصميم لثلاث سنوات) .

عندما يكون الضغط الخلفي للنافذ أثناء عمليات التشغيل لنظام التناضح العكسي متغيراً بصورة ديناميكية فيجب وضع قطعة في نهاية بعض أوعية الضغط في فتحة النافذ تستعمل مواد عديدة لصنع قناة النافذ مثل هذه المواد هي البولي فينيل كلورايد (**PVC**) و تقدير ضغط النافذ هو عامل متغير بشدة مع درجة الحرارة و يجب الانتباه إلى أنه في الشروط الساكنة (و بمعنى آخر : عند إغلاق مضخة الضغط العالي) فإن الضغط الخلفي للنافذ عبر الأغشية يجب ألا يتجاوز أبداً **5 psi** (0.3) بار .

الجدول التالي يعطي الضغط الخلفي الديناميكي للنافذ الأعظمي من أجل أوعية الضغط لعناصر أغشية **FilmTec** و ذلك حسب درجة الحرارة .

جدول (12)

Temperature (°F)	Temperature (°C)	Maximum dynamic permeate backpressure psi	bar
113	45	145	10.0
104	40	180	12.4
95	35	219	15.1
86	30	257	17.7
77	25	299	20.6
68	20	338	23.3

إن ضغط الدفع للمضخة يجب التحكم به بشكل دقيق جداً و ذلك للحفاظ على معدل تدفق النافذ المصمم أو المقترح و عدم تجاوز الحد الأعظمي المسموح لضغط التغذية و الذي هو :

١ - **600 psi** أي (41) بار من أجل عناصر الأغشية التالية (**TW30, BW30, NF**) .

٢ - **1000psi** أي (69) بار من أجل (**SW30**) .

٣ - **1200psi** أي (82) بار من أجل (**SW30HR**) .

مضخة الاستبدال الفعلي لا يمكن أن تخفف من سرعة محركها لذا فإن ضغط التغذية يتم التحكم به بصمام الضغط الخلفي (**Backpressure Valve**) في خط التحويلة من المضخة المدفوع إلى كأس أو ماص المضخة ، يتم استخدام قطعة مخفضة للاهتزاز على خط الإطلاق للمضخة و ذلك لتصغير سيل الضغط ، كما يستخدم صمام راحة أو إغاثة و ذلك لضمان بأن الحد الأعظمي المسموح للضغط لن يتم تجاوزه .

إن صمام الخنق أو التخفيف (**Throttling Valve**) يوضع على خط الدفع للمضخة للسيطرة على مضخة الطرد المركزي .

المحركات الثابتة تستعمل في مضخات الطرد المركزي لأغلب أنظمة التناضح العكسي و استخدام محرك سرعة متواتر أو متغير يحفظ الطاقة البديلة لكن كلفته أعلى ، محركات السرعة المتغيرة يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار عندما يكون هناك اختلاف **5 C°** بين درجات حرارة ماء التغذية العظمى و الدنيا .

في أنظمة مياه البحر نموذجياً (60 % – 55) من ماء التغذية المضغوط داخلياً يترك النظام مع حوالي 870 PSI أي (60) بار ضغط في تيار المحلول الملحي المطرود ، هذه الطاقة الناتجة يمكن أن تستعاد و ذلك بهدف تخفيض متطلبات القدرة اللازمة للنظام ، وسبل استعادة الطاقة هي :

١ - Pelton Weel .

٢ – توربين تدويري ارتدادي عكسي (Reverse Turning Turbine)

٣ – Piston Type Work Exchanger مبادل من نموذج بستوني .

إن المحلول المركز ذو الضغط العالي تتم تغذيته إلى وسيلة استعادة الطاقة و القدرة حيث ينتج قدرة متناوبة كهربائية ، و هذه تستعمل لتساعد المحرك الكهربائي الرئيسي في تدوير و قيادة مضخة الضغط العالي ، و بالمقارنة مع المضخة التقليدية فإن نظام استعادة القدرة يسمح بتخزين و ادخار طاقة فوق40% .

6-2-6- قياس دليل كثافة الطمي (Salt Density Index) :

دليل كثافة الطمي (SDI) : بالتعريف هو قياس قدرة الماء على تلويث الأغشية أو سد الفلاتر .

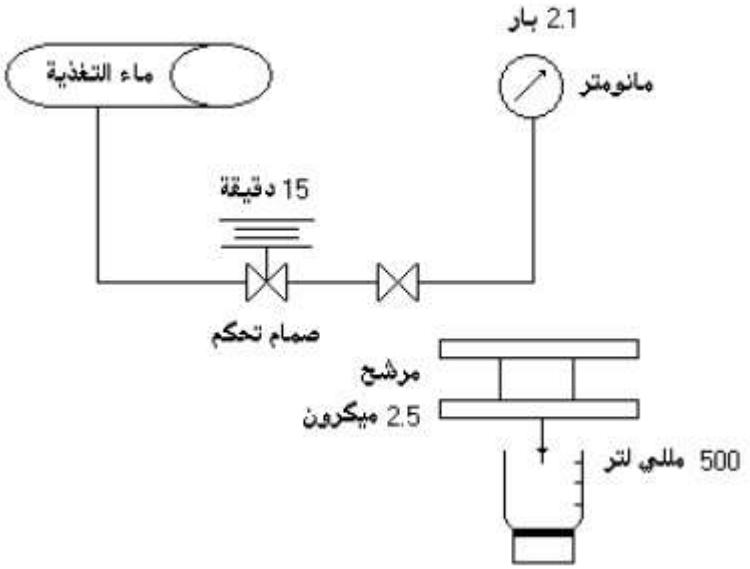
SDI يقاس بوساطة عدة أدوات و التي تتألف بشكل قياسي من منظم للضغط في المدخل و مقياس للضغط متبوع بفلتر محمول يحوي على مرشح غشائي ذي مسامات بأبعاد 0.45 ميكرون وذلك عندما يكون الضغط المطبق 30 psi .

حيث يعتبر اختبار العكارة (للمواد العالقة بماء التغذية) من أحد المعايير الهامة للمحافظة على كفاءة وحدة التحلية الخاصة بالأغشية . و اختبار العكارة هذا المسمى (دليل كثافة الطمي) هو اختبار لتحديد نسبة المواد المعلقة الموجودة في المياه و على أساسه يحدد حجم المعالجة الأولية المطلوبة لمياه التغذية و الخاصة بإزالة هذه المواد و يتكون جهاز الاختبار كما ذكرنا من مرشح0.45 ميكرون و مقياس للضغط و يتم الاختبار عند ضغط 2.1 بار و الاختبار عبارة عن ترشيح كمية من مياه التغذية تعادل500 ml من خلال مرشح جديد و يقاس الزمن اللازم للترشيح T1 و يترك بعد ذلك ماء التغذية ليمر من خلال المرشح لمدة 15 دقيقة (يسبب انسداد جزئي للمسام ، و من ثم يقل معدل مرور الماء) ثم يعاد قياس الزمن اللازم لمرور 500 ml من الماء خلال المرشح T2 و تحسب قيمة SDI كما يلي :

$$SDI = (1 – T1/T2) (100 / 15) \qquad 32$$

و عندما يكون الزمن T2 اكبر أبع مرات من الزمن T1 يكون مقياس SDI=5 أما قيمة SDI التي تسبب انسداد المرشح هي 6.7 (بشكل عام) و لمنع انسداد الأغشية (و خاصة الأغشية الملفوفة حلزونياً) يلزم أن تكون قيمة مقياس العكارة خمسة أو أقل و تكون أقل من ثلاثة في الأغشية ذات الشعيرات الدقيقة المجوفة ، و يلزم إجراء عملية القياس في الاختبار أكثر من مرة و يفضل ثلاث مرات في اليوم الواحد .

و الشكل (8) يبين اختبار العكارة (دليل كثافة الطمي)



شكل (8) اختبار العكارة

أسئلة شائعة :

السؤال : عندما تكون قيمة الدليل محسوبة مسبقاً كيف يمكن استخدام هذه القيمة لتحديد نظام الترشيح أو الفلترة قبل التناضح العكسي ؟

الجواب : يجب الأخذ بعين الاعتبار مايلي :

١ -عندما يكون SDI< 5 فليست هناك حاجة للترشيح أو الفلترة .

٢ -عندما يكون SDI بين (5-10) ينبغي استخدام فلتر رملي .

٣ -عندما يكون SDI >10 فإنه من الضروري استخدام الفلترة هنا ومن المحتمل بوساطة المخثرات أو خزانات التهدئة.

السؤال : هل SDI مشابه للعكارة ؟

الجواب : إن دليل كثافة الطمي هو لقياس الإفساد من جراء المواد الصلبة المعلقة أما اختبارات العكارة فهي من أجل قياس كمية المواد المعلقة وليس قابليتها لإفساد الأغشية و بالتالي ليس هناك ارتباط بين الاثنين و ليسا متشابهين ، و في الشروط العملية فإن الأغشية ستتعرض لإفساد و ضرر قليل جداً عندما يحوي ماء التغذية على عكارة أقل من 1NTU و بشكل متماثل فإن الأغشية ستتعرض لضرر قليل جداً عندما تكون قيمة دليل كثافة الطمي للتغذية أقل من 5 كما ذكرنا سابقاً و لن تكون هناك حاجة للفلترة .

السؤال : ما الذي يمكن عمله لتخفيض قيمة SDI ؟

الجواب : يمكن خفض القيمة بالمعالجة بالمخثرات قبل الفلتر شريطة أن تكون متوافقة مع الأغشية المستعملة و لا تسبب أي ضرر لها ومن الممكن حقن الكيماويات للمحافظة على الأغشية من إمكانية فسادها من قبل الجزيئات التي يمكن نفاذها .

السؤال : هل يمكن الحصول على قيمة SDI من أجل ضغط 4.5 psi فقط ؟
الجواب : لا بل ينبغي استعمال مضخة و ذلك حسب شروط الاختبار .
السؤال : هل هناك علاقة بين درجة حرارة الماء و قيمة SDI ؟
الجواب : طالما تبقى درجة الحرارة ثابتة أثناء الاختبار أو (1-/+) درجة مئوية فلا يوجد أي علاقة أو تأثير لدرجة الحرارة أما في حال اختلاف درجات الحرارة فإن القياسات ستكون مشوشة و غير واضحة .

بعد أن عرضنا العديد من الأمور الهامة اللازم عملها من أجل التصميم الصحيح لمنظومة الأغشية و نظام التناضح هنا سنتوقف لنعرض أهم تطبيقات التناضح العكسي و أنواع الأنظمة و الأجهزة المتعددة و مواصفاتها و سنعرض في الباب الأخير أمثلة تصميمية مفصلة لمنظومة تناضح عكسي باستخدام برنامج ROSA من شركة DOW CHEMICAL لنكرس هذه الأفكار و المعلومات و ذلك بعد أن نتعرف على الأنظمة المختلفة و تشغيل محطات التناضح و ماهي المشاكل المحتمل حدوثها و ماهي الحلول المقترحة لها .