الباب الثالث

أغشية التناضح العكسي

Reverse Osmosis Membranes

مقدمة :

إن الأغشية عبارة عن مواد طبيعية أو صناعية شبه منفذة (Semi Permeable) أي كما ذكرنا من قبل تسمح بمرور الماء فقط دون الأملاح و سنعرض أهم التطورات التي حدثت في تصنيع الأغشية و كيفية تصنيعها و مكوناتها و أهم الدراسات المتعلقة بتطويرها .

1- تاريخ استخدام الأغشية :

عرفت خواص التناضح للأغشية منذ القرن التاسع عشر حيث استعملت أغشية حيوانية ، ثم استعملت أغشية سيللوزية أو من مشتقات السيللوز أو صفائح رقيقة من بعض البوليميرات و في عام1953 قام العالم Reid باختراع الأغشية الاسموزية الصناعية لتحقيق تحلية المياه في الولايات المتحدة الأمريكية وفي عام 1958 صنع الباحثان Loeb و Sourirajan أغشية أسيتات السيللوز الثنائي الفعالية بحيث تعطي تدفقات عالية و بدأ في الستينات من القرن العشرين التصنيع التجاري لأغشية التناضح العكسي من مركب أسيتات السيللوز غير المتناسق و استمر تطوير الأغشية بشكل كبير و على الأخص الأغشية غير المتناسقة و ذلك بسبب قدرتها العالية على تمرير الماء و حجز الأملاح .

2- أنواع نماذج الأغشية :

هناك أربعة أنواع من نماذج الأغشية المتوفرة تجارياً هذه الأيام وهي كالتالي :

1- الصفيحة (الصحن) و الإطار (Plata And Frame)

2- اللولب الحلزوني (Spiral-Wound)

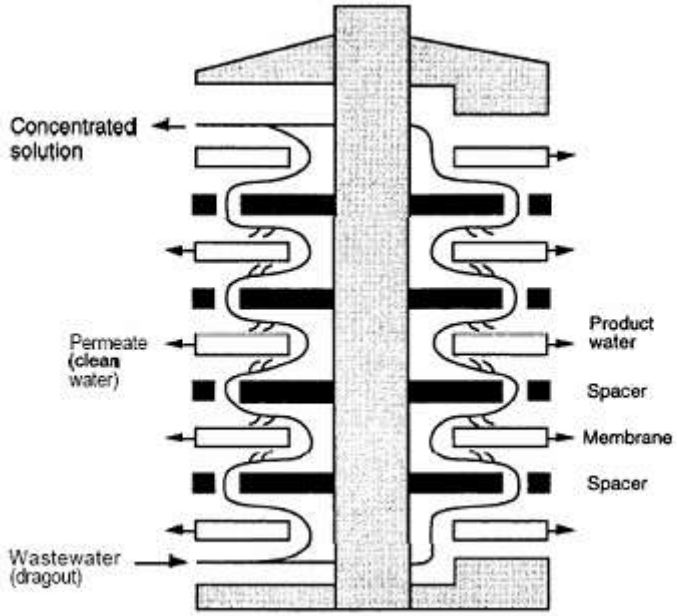
3-الألياف المجوفة (Hollow-Fiber)

4- الأنبوبية (Tubular)

1- نموذج (PLATE AND FRAME) :

كما يظهر الشكل رقم (1) حيث تستعمل في هذا النوع من النماذج أغشية ذات صفائح منبسطة أو مستوية و التي يتم وضعها بين فراغات و دعائم ، الدعائم أيضاً تشكل قناة جريان للماء النافذ ، تدفقات ماء التغذية تعبر الصفائح المستوية و تشكل طبقة واحدة للتالي ، الابتكارات الجديدة تعمل على زيادة كثافة التحميل من أجل زيادة كفاءة هذا النموذج ، أما بالنسبة لصيانة هذا النوع من الأغشية فهو ممكن بسبب طبيعة تجميعها ،و بإمكان هذا النوع من الأغشية الوصول لاستعادات عالية و ذلك من خلال قنوات التغذية الطويلة و المستخدمة للتحكم بتيارات التغذية و التي غالباً ما تسبب المشاكل والتلف للأغشية و فقط التصميمات الحديثة العالية الجودة لهذه النماذج يمكنها العمل بأملاح منحلة تزيد عن 25% وضغوط

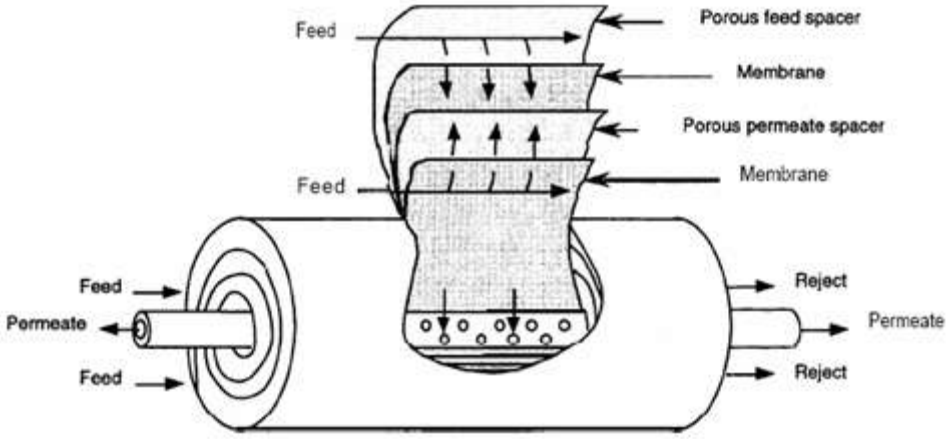
تشغيل فوق (4500 PSI) و التي طورت في ألمانيا (STANFORD AND MILLER 1994) هذا التطوير أعطى فرصاً جديدة لاستخدام التناضح العكسي لجمع مياه الصرف الصناعية المعدنية .
و الشكل (1) يبين هذا النوع من النماذج



شكل (1) نموذج الصحن و الإطار

2- نموذج (Spiral-Wound) :

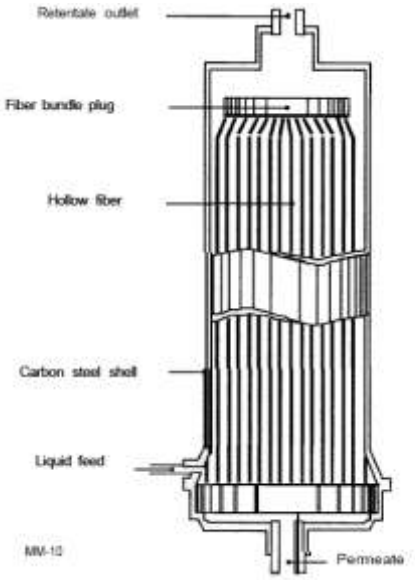
نموذج اللوح أو اللولب الحلزوني الملفوف يستعمل أغشية صفائحية مسطحة وملفوفة حلزونياً و دعامات تلف بشكل حلزوني حول أنبوب مركزي (الشكل 2) ، تدفقات التغذية تمر من جهة طرف النهاية للفة الحلزونية و بشكل موازي للغشاء الملفوف ، الطبقات الداعمة تصمم لتقليل هبوط الضغط و السماح بزيادة كثافة التحميل على الأغشية بالإضافة إلى ذلك فإن هذا النوع من نماذج الأغشية يمكن أن يصمم بتجهيزات تزويد خاصة لرفع الاضطراب من أجل زيادة الكتلة المارة عبر الأغشية أو لإعطاء مسار مستمر للجريان بغية التقليل من تلف الغشاء ، ونموذج اللوح الحلزوني الملفوف يقدم سعات و معدلات اجتياز أكبر لكن صيانته تكون صعبة . و الشكل (2) يبين هذا النموذج



شكل (2) نموذج اللوح الملفوف الحلزوني

3- نموذج (HOLLOW FIBER) :

كما في الشكل رقم (3) الذي يظهر الألياف المجوفة و المؤلفة من حزم من الألياف الغشائية ذات قطر صغير داخل أوعية ضغط أسطوانية الشكل ، الألياف متكيفة مع الضغط من الخارج ، التدفقات النافذة تعبر الثقوب الداخلية للألياف المجوفة تنزل أسفل الليف حتى تصل إلى الجزء الرأسي من الليف في القسم السفلي منه ، كما أن هذه الألياف المجوفة باستطاعتها أن تتكيف مع الضغط الجوي من الداخل لكن المتانة الميكانيكية الأكبر للألياف تعتبر ضرورية لمنع تمزق هذه الألياف . عند التغذية الجانبية أو الطرفية لهيكل الألياف ، فإن هبوط الضغط الأخفض يصطدم بأسفل ثقب الليف نظراً لأن معدل التدفق للنافذ أقل من معدل التدفق لماء التغذية ، هذا النوع من نماذج الأغشية يمتاز بكثافة تحميل أعظمية و ذلك من خلال تركيبته .



شكل (3) نموذج الألياف المجوفة الدقيقة

4- نموذج(Tubular) :

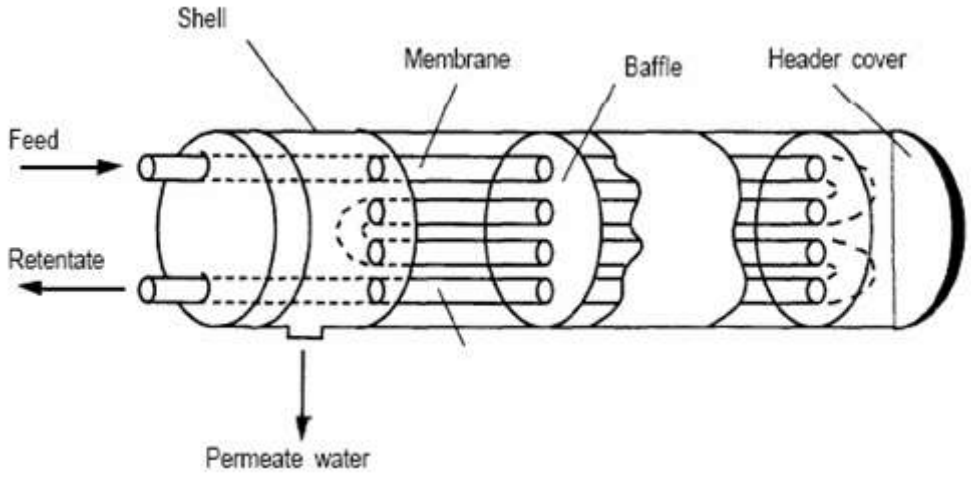
النماذج الأنبوبية لها أغشية مدعمة من الداخل بأنبوب ، حيث المشغل يمكنه بسهولة أن يصلح قنوات ماء التغذية و الماء النافذ بهدف إزالة الطبقات الملوثة أو المسببة لتلف الأغشية ، هذه النماذج إلى حد ما مقاومة للضرر و التلف عندما يتم تشغيلها بتدفقات تغذية مضطربة (غير مستمرة) وهذا مرتبط بقنوات تدفق أكبر من تلك المستخدمة في النموذج ذي الألياف المجوفة والنموذج ذي الأغشية الملفوفة حلزونياً أما مشاكل استخدام هذا النموذج بالمقارنة مع النموذجين السابقين فهي :

1- احتياجات القدرة العالية لضخ حجوم كبيرة جداً من مياه التغذية .

2- الكلف العالية لرأس المال .

3- المساحة المنخفضة لمنطقة الغشاء (الفعالة) لكل وحدة حجم من الماء المعد للمعالجة .

و الشكل(4) يوضح هذا النوع من النماذج :



شكل (4) النموذج الأنبوبي

و بناء عليه يمكننا أن نقارن بين هذه الأنواع الأربعة في العديد من النقاط كما هو مبين في الجدول (1)

جدول (1) مقارنة بين أنواع النماذج الأربعة

الأضرار	الفوائد	النموذج
– كثافات التحميل المعتدلة حوالي 600 m2 / m3 . – أكثر عرضة للإنغلاق و الانسداد بسبب ضيق ممرات المحلول الملحي و التي يمكن أن تؤدي إلى استقطاب التركيز . – صعوبة الوصول للعناصر الفردية في الأنابيب ذات العناصر المتعددة. – الغشاء يهتم بالتميّه و يفقد قدرته على رفض الأملاح في درجة حرارة أعلى من 35 مئوية أو PH خارج المجال (8-3) .	– ضغوط التشغيل حوالي 80 بار – مقاومة جيدة للتلوث و الفساد . – سهلة التنظيف . – سهلة لتغيير الحزم في الحقل . – متوفرة بأنواع مختلفة من المواد و لدى العديد من المصنعين	اللوح الملفوف

- حساسة تجاه التلوث بالمواد الصمغية و المعلقة بسبب ضيق ممرات المحلول الملحي لذا يكون من الضروري أن يسبقها عمليات معالجة واسعة في ماء التغذية النظيف نسبياً . - منيعة ضد الهجوم الحيوي ولا تنحل بالماء . - العدد المحدود لمواد صنعها و كذلك للمنتجين و المصنعين لها .	- لها منطقة غشاء عالية جداً بالمقارنة مع الحجم (كثافات التحميل)حوالي 30000 م3 /م2 - استعادات عالية للتدفقات النافذة - سهلة تغيير الحزم في الحقل . - سهلة الإخراج .	الألياف الدقيقة المجوفة
- كثافة التحميل منخفضة جداً حوالي 300 m2/m3 . - غالية الثمن. - اختيار أقل ما يمكن من مواد الأغشية .	- ممرات التدفق الكبيرة تسمح بسرع تدفق عالية . - الميل المنخفض للتلوث و الفساد . - سهلة التنظيف ، الإزالة ، و إعادة التشكيل . - تعمل بضغوط عالية جداً حوالي 100 بار .	الأنبوبية
- كثافة التحميل منخفضة . - إمكانية حدوث تسربات. - غالية السعر .	- الميل المنخفض للفساد و التلوث . - سهلة البعثرة و التفكيك من أجل عمليات التنظيف و تبديل الأغشية . - يمكن أن تستعمل أنواع متعددة من الأغشية . - مناسبة للتطبيقات التي تتطلب نوعية عالية للمنتج مثل الصناعات الدوائية وصناعات الأغذية .	الصفيحة و الإطار

و بالتالي ينبغي دائماً الاختيار المناسب للنموذج بحيث نحصل على أفضل النماذج و بأقل كلفة ممكنة .

3- أنواع مواد الأغشية :

تصنع نماذج الأغشية من أنواع متعددة من المواد و كل مادة لها صفاتها و ميزاتها التي تميزها عن الأخرى و بالتالي يمكن أن نصنف أنواع الأغشية تبعاً لمكوناتها أو مواد تصنيعها إلى :

سيلليوز أسيتات (Acetate Cellulose) :

1- **تحمل لمادة الكلور .**

2- **غير مقاوم للبكتيريا .**

3- **نسبة حموضة PH تتراوح بين 6 و 8 .**

4- **معدل إنتاج مياه جيد .**

5- **يجب استعماله مع مياه تحتوي على نسبة معينة من الكلور .**

6- **من أكثر أنواع الأغشية انتشاراً في الأسواق .**

سيلليوز تري أسيتات (Cellulose Tri -Acetate) :

1- **تحمل لمادة الكلور .**

2- **يتحمل أنواع متعددة من البكتيريا .**

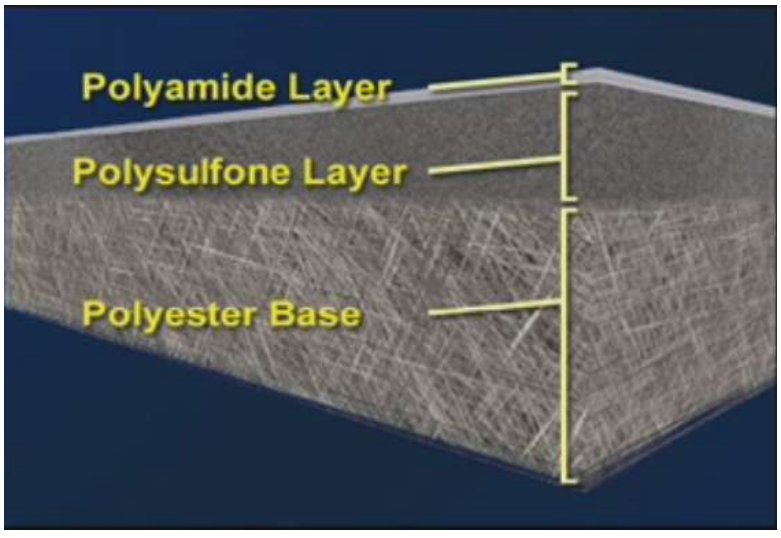
3- **نسبة حموضة PH تتراوح بين 4 و 8 .**

4- **معدل إنتاج مياه ممتاز .**

5- **استعمال مياه تحتوي على كلور يطيل عمره .**

أما الأغشية البوليميرية فسنتكلم عنها بالتفصيل فيما بعد .

أما من حيث البناء أو التركيب فأكثر الأنواع استخداماً و استقراراً هي الأغشية المركبة ذات الطبقة الرقيقة ثين فيلم كومبوزايت (Thin Film Composite) أو اختصاراً (Film Tec) و الشكل (5) يوضح طبقات هذا النوع من الأغشية .



شكل (5) طبقات أغشية Film Tec

نلاحظ من الشكل السابق أن الغشاء يتكون من طبقة علوية هي الطبقة الفعالة المسؤولة عن فصل الأملاح و طبقة متوسطة من البولي سلفون و هو مادة لدنة مسامية مكونة من ألدهيدات أو كيتونات مع الكبريت

الغاية منها هو تسهيل نفاذ الماء حيث تنتفخ بمرور الماء و بالتالي تقلل من المقاومة لجريان الماء و تسمح بزيادة كمية المياه المارة ، أما الطبقة السفلية فهي من البوليستر وهو مادة تشبه القصدير نوعاً ما (تلك المادة الموجودة على ظروف حبوب الأدوية) و يشكل طبقة داعمة مبدئية للغشاء و تحمل للصدمات، أما مواصفات هذه الأغشية فيمكن إيجازها بما يلي :

1- حساسة تجاه مادة الكلور مما يلزم إزالتها قبل وصول المياه إلى الأغشية

2- مقاومة للبكتيريا .

3- نسبة حموضة PH تتراوح بين 3 و 11 .

4- من أكثر أنواع الأغشية إنتاجاً للمياه .

5- خاصية رفض للأملاح عالية .

6- سنوات خدمة طويلة في حال توفرت مواصفات التشغيل الصحيحة .

و سندرس هنا صفات هذا النوع من الأغشية و الدراسات التي أثبتت جدارة هذه الأغشية .

اختبارات الضغوط العالية لأغشية (Thin Film Composite) :

إن ضغوط التشغيل اللازمة من أجل تحلية مياه البحر بمعدل أعلى من (1000 psi / 69 bar) هي شائعة جداً هذه الأيام في وحدات التناضح العكسي ، و البعض من التطبيقات المستخدمة هذه الأيام تتطلب ضغوطاً عالية حوالي (1200 psi / 83 bar) .

الأسباب الرئيسية للحاجة إلى ضغوط التشغيل العالية تتضمن الحاجة إلى أحد أو مزيج من الأمور التالية :

- الاستعادات العالية : و مثال على ذلك : أعلى من 60% بالمقارنة مع الاستعادات التقليدية ذات المعدل من (30 – 40 %) .
- الإمداد بمياه تغذية ذات ملوحة عالية : و مثال على ذلك : أعلى من 45000 mg / l في الشرق الأوسط مقابل الملوحة العادية التي هي حوالي 35000 mg / l أي حوالي 35000 ppm حيث يمكننا اعتبار أن (1 mg / l يساوي تقريباً 1 ppm مجازاً) .
- تحسين المنتج من الوحدات إلى أبعد قدر ممكن لاختلافات درجات الحرارة الموسمية مثل درجات الحرارة المنخفضة في فصل الشتاء .
- الرفض المحسن لأيونات معينة مثل البورن و محتوى الأملاح بشكل عام .

إن الرفض العالي لعناصر أغشية مياه البحر المركبة ذات الطبقة السطحية الرقيقة (FilmTec) تحسن كثيراً هذه الأيام لعمليات التشغيل تحت الضغوط العالية مع تقدير ضغط اسمي أعظمي حوالي1200 psi . و بينت اختبارات المختبر على المدى الطويل أن أداء العناصر لا يتأثر عكسياً بهذه الضغوط المرتفعة . العناصر ذات الضغوط المرتفعة استعملت أولاً في بعض التطبيقات الخاصة مثل استعادة مياه الصرف ، و مواقع دفن النفايات في البلدان ذات القيود البيئية، و بسبب الضغط التناضحي العالي لمصادر المياه المرتشحة من مواقع دفن النفايات المنزلية فإن الضغوط العالية (الأعلى من100 bar / 1400 psi) و الأعلى منها متطلبة .

حالياً اقتصاديات إزالة الأملاح من مياه البحر تظهر أنه تحت شروط محددة فإنه يجب إعطاء مفهوم اقتصادي من أجل دفع كلف الطاقة العالية و منطقة الأغشية الفعالة الكبيرة تكون ضرورية جداً من أجل

الحصول على معدل استعادات عالية . و هذه حقيقة خصوصاً في الحالات التي تفرض قيوداً على مياه التغذية المتاحة ، المعالجة الابتدائية أو رمي المحلول الملحي المتخلف . حديثاً دعت الحاجة إلى الاستعادات العالية القيام بالأمرين التاليين :

١ -تعديل نماذج الأغشية الموجودة في الأسواق : حيث برهنت النتائج أن النماذج الملفوفة حلزونياً ذات أداء متفوق و ذلك نظراً لأنها تسمح بتعديل بسيط أو عدم التعديل في مراحل المعالجة الأولية و أنظمة الضخ في الضغوط المنخفضة و العالية و تحتاج فقط لتغيير مراحل الأغشية و هذا يعني قبول الضغوط العالية إلى أبعد قدر ممكن .

٢ -زيادة السعة : العديد من وحدات التناضح العكسي تحتاج لزيادة السعة و ذلك بدون الحاجة إلى تغييرات في المعالجة الأولية قبل نظام الأغشية ، نظام إدخال مياه التغذية ، أو نظام الضخ لمياه التغذية ، و الحل الوحيد لذلك يكون بتحويل بعضاً من أوعية الضغط في المرحلة الأولى إلى أوعية المرحلة الثانية و إضافة مضخة تعزيز الضغط (Booster Pump) و التي تعمل بضغوط مرتفعة على سبيل المثال : بين psi (1200 – 1000) و هذا ربما يزيد الاستعادة من معدل %(45 – 35) إلى مستوى % (60 – 55) .

بالاستناد إلى الحالتين المذكورتين أعلاه فإن الضغوط الأعلى من 1000 psi تحتاج لتحسين تصميم نظام الغشاء ، لكن هناك الكثير من الحالات و التي من الممكن فيها الحصول على فائدة من التشغيل في ضغوط عالية و مثال على ذلك : استعمال درجة حرارة أخفض لماء التغذية أو استخدام مياه تغذية ذات قيمة TDS أعلى و ذلك عندما يكون التشغيل في معدل نافذ وسطي أعلى.

إن عناصر أغشية (FilmTec) هي الأكثر ثباتاً بسبب الميزات التالية :

١ -الطبقات المركبة من طبقة فيلمية رقيقة علوية و المقاومة للضغوط العالية (مثل polyamide polysulfone ...) .

٢ -الدعم المقاوم للضغوط العالية (مثال على ذلك : البوليستر ، حيز أو قناة النافذ Permeate Spacer) .

٣ -مواد التركيب القادرة على مقاومة الضغوط العالية (و مثال على ذلك : خيوط الغراء الدقيقة ، الهيكل القاسي الخارجي) .

و هناك العديد من طرق التركيب و البناء المختلفة لعناصر الأغشية من أجل إمكانية التشغيل في ضغوط عالية مع مستويات مختلفة من الفعالية . واحد منها استخدام طبقة داعم أثخن من البوليستر لتجنب التمزق الميكانيكي للغشاء داخل القناة ، وهذا يحقق إمكانية تطبيق ضغوط أعلى لكن في نفس الوقت يخفض منطقة الغشاء العظمى و التي يمكن أن تطوى إلى عنصر و بذلك تخفض من منطقة الغشاء المتوفرة و زيادة الجريان .

و من المهم أيضاً إنتاج طبقة غشاء مانعة مستقرة لرفض الأملاح لأن الطبقة إن لم تكن مستقرة بما فيه الكفاية فإن الغشاء سينهار ، و يجب عمل الدعم الكافي للغشاء الأضعف . أغشية (FilmTec) تستعمل دعماً مستقراً عوضاً عن الدعم الأثخن . و نتيجة التشغيل في ضغط حوالي 1200 psi فإن إمكانيات الدعم قابلة للمقارنة و الأخيرة تزيد من منطقة الغشاء ، بالإضافة إلى ذلك تم تحسين هذه الأغشية من خلال طبقات البوليميد و البولي سلفون لأغشية مياه البحر و التي أثبتت نجاحاً عالياً ليس فقط من خلال معدلات

التدفق العالية و أداء الرفض لكن أيضاً من خلال استقرار الطبقة العلوية من الغشاء . و تم اختبار هذه النوعية من الأغشية في المختبرات بضغوط أعلى من 1000 psi في عام 2001 و كان أداء عناصر الأغشية SW30HR-380 خلال الاختبار جيداً مما سمح بزيادة الضغط حتى 1200 psi تحت شروط محددة .

كلاً من مواد الإنشاء الفردية و العناصر الكلية التي تم تقييمها في الاختبار أثبتت كفاءة و قدرة عناصر أغشية FilmTec المستخدمة لمياه البحر على تحمل الضغوط العالية :

1- تقدير الضغط للطبقة المانعة (Barrier Layer) :

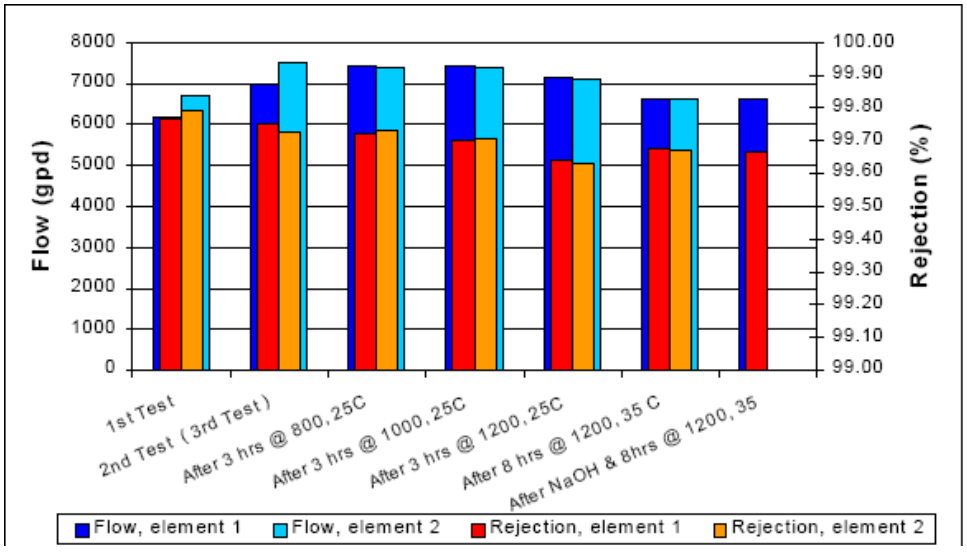
ثبات كلاً من تدفق الغشاء و رفض الأملاح اختبرا في ظروف الضغط العالي بمعدلات من1000 إلى 1400 psi . ووجدت خسارة بسيطة في التدفق بمقدار 10% بين الضغطين (800 psi) و 1200 psi ، و 15% بين psi (800 و 1400) و التي اختبرت من خلال الضغط . أما الرفض فبقي ضمن المجال من (0.1 - / +) نسبة مئوية من القياس الأصلي . تأثير الضغط المخمن هنا يمكن معرفته من برنامج ROSA .

2- دراسة قابلية دعم الغشاء :

بشكل نموذجي ، عند تطبيق ضغط على دعامة الغشاء فإن الغشاء يشوه بعض الشيء . هذا التشويه يؤدي إلى دعم منخفض للغشاء و خطر خسارة في الجريان و الرفض للأملاح . أغشية (Film Tec) طورت بمواد دعم جديدة و التي تخفض التشويه بمقدار 50 % .

3- دراسة الثبات الكيميائي :

تم تشغيل هذه العناصر لعدة أيام في معدلات تدفق عالية و درجة حرارة عالية حوالي 35 C° ، بعدها تم تنظيفها مستويات PH عالية ومنخفضة جداً حسب درجة الحرارة (PH = 13 في درجة حرارة 35 C°) ثم أعيد الاختبار من أجل فترات مختلفة قبل و بعد التنظيف في ضغط 1200 psi حيث أظهر العنصر المختبر أداءً مستقراً في الجريان و الرفض . الأداء النموذجي للعنصرين الموصوفين في الدراسات أعلاه مبين في المخطط التالي :

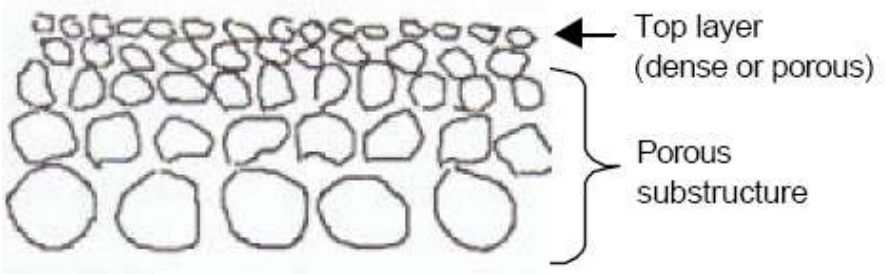


مخطط (1) التدفق و الرفض لعنصرين في اختبار الضغط العالي

و قد اختبرت عناصر أغشية (FilmTec) في اختبارات حقلية مختلفة في ضغوط عالية و كذلك تم اختبارها في عمليات تشغيل في ضغوط عالية في وحدات مختلفة و يمكننا إعطاء مثالاً من أجل التفصيل : ماء البحر الأحمر ذو قيمة TDS من 38000 إلى 43000 ميلليغرام / ليتر (وسطياً 40500 mg / l) و ذو درجة حرارة من 72 إلى 84 درجة فهرنهايت (22C إلى 29 C°) وسطياً (26 C) و استعادات من 45 % إلى 60% في الاختبار الحقلي ، تم تشغيل الأغشية بمعدلات تدفق نموذجية للنافذ من (3.8 m3/h إلى 4 m3 / h) و هذا يقابل جريانات للغشاء من 7.9 إلى 8.5 غالون لكل قدم مربع في اليوم (gfd) ، ووسطياً (8.2 gfd) أي (من 13.5 l / m2 h إلى 14.5 l / m2 h ووسطياً 14 l/m2 h) بثمانية عناصر لكل وعاء ضغط ، أثناء فترة التشغيل كلاً من التدفق عبر الغشاء و رفض الأملاح كانا ثابتين .

4- بنية الأغشية :

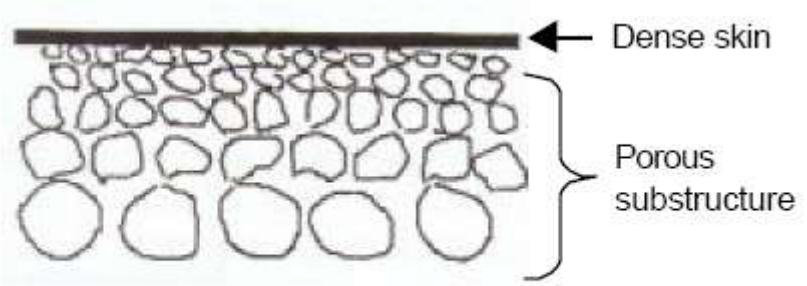
تعتبر الأغشية قلب نظام التناضح العكسي وهي تتكون من مواد رقيقة بسمك حوالي (0.04 – 0.1) ميكرون و مثبتة بمواد مسامية ليصل سمكها إلى حوالي0.01 مم، وهي تختلف في قدرتها على مرور الماء العذب و طرد الأملاح تبعاً لبنيتها و طبقاتها و الأغشية لها القدرة على منع مرور من99% – 90 من المواد غير العضوية و حوالي 100% من المواد العضوية (كالبكتريا و الفيروسات) و غيرها (كالسيليكا) ويمكننا أن نميز بين نوعين من الأغشية من حيث البناء أو تركيب الطبقات أو البنية و هما الأغشية المتناسقة (Symmetric) و الأغشية الغير متناسقة (Asymmetric) حيث أن الاختلاف بينهما هو في تكوين الطبقات لكل منهما فالأغشية المتناسقة تمتاز باحتوائها على مسامات و أبعاد جسيمات متناسقة و تترك فيما بينها مسامات متساوية أو أبعاد مسامات متساوية كما أنها لا تحوي على طبقة سطحية رقيقة أكثر كثافة من بدن الغشاء فالطبقات كلها ذات كثافة واحدة أما الأغشية الغير متناسقة فتمتاز عن تلك الأخيرة بوجود طبقة كثافة سطحية رقيقة جداً سماكتها حوالي 0.25 ميكرون و تتبع بطبقة وسيطة تسمى الطبقة الانتقالية و من ثم طبقة أخرى سفلية هي الطبقة الأسفنجية المسامية و تتراوح سماكتها حوالي (100 – 50) ميكرون و تلك الطبقة الكثيفة السطحية تعتبر المسؤولة عن عملية فصل الأملاح و كلما ازدادت كثافتها ازدادت خاصية الرفض للأملاح بوساطتها و الشكل (6) يبين بنية الليف اللامتناسق الحاوي على طبقة سطحية كثيفة أو مثقبة



Asymmetric fiber

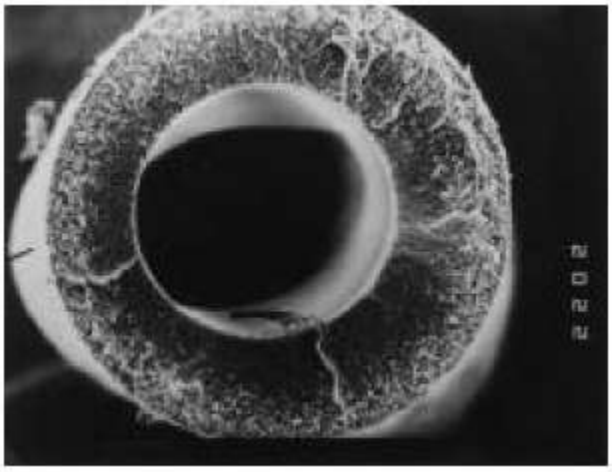
شكل (6) الليف الغير متناسق

و الشكل (7) يوضح بنية الليف المركب الحاوي على طبقة كثيفة سطحية



شكل (7) بنية الليف المركب (Thin Film Composite)

و الشكل (8) يوضح صورة فوتوغرافية لليف المجوف الدقيق (Hollow Fiber)



شكل (8) صورة فوتوغرافية بالمجهر لليف الدقيق المجوف

و لن نهتم بدراستنا هنا بالأغشية المتماثلة كون استخدامها أصبح معدوماً و ذلك للأسباب التالية :

1- عدم تحمل الصدمات و الحمولات العالية و التدفقات الكبيرة .

2- عدم كفاءة رفض الأملاح بالشكل المتطلب .

3- صغر كتلة الماء المنتقلة عبر بدن الأغشية .

4- ثبات كمية الماء المنتقلة من السطح عبر جسم الغشاء .

5- مقاومة لجريان و انتقال النافذ باستمرار انتقال الكتلة المائية .

لذا سنهتم فقط بدراسة الأغشية اللامتناسقة و التي برهنت على أنها الأقدر على تحلية المياه و نظراً لميكانيكية انتقال الماء و زيادة الكتلة المارة عبر بدن الغشاء بالتدريج و فعاليتها العالية في رفض الأملاح نظراً – كما ذكرنا – لوجود الطبقة الكثيفة السطحية ذات المسامات الأقل و الطبقات المسامية ذات

المسامات الأكبر في الأسفل مما يقلل من مقاومة مرور الماء عير بدن الغشاء باستمرار الانتقال للنافذ من الطبقة السطحية إلى بدن أو جسم الغشاء و بالتالي كمية مياه أكبر و قابلية حجز أعلى للأملاح من تلك السابقة .

و بالنسبة لآلية عمل الأغشية فهي تعمل بما يسمى بنظرية الجريان بالامتصاص الانتقائي (بالخاصة الشعرية) أي أن طبيعة الغشاء تسمح بامتصاص الماء فقط (ورفض امتصاص الأملاح) و قدرة الغشاء على رفض الأملاح تعتمد على قطر المسام (15 – 1) أنغستروم و هي أقل كثيراً من المرشحات الدقيقة (Micro Filtration) و بالتالي فهي تمنع الأحياء الدقيقة بالترشيح .

و لكي نتعرف على الأغشية الامتناسقة بشكل جيد يجب أن ندرسها بالتفصيل و سنأتي الآن بذكر خواص هذه الأغشية و سنركز على الأغشية البوليميرية و تصنيعها .

5- أغشية التاضح العكسي اللامتناسقة (Asymmetric RO Membranes) :

5-1- مدخل لعلم التشكل الجزيئي :

إن علم تشكل الجزيئات من الممكن أن يعطينا فكرة واضحة و تعريفاً واضحاً لأغشية التناضح العكسي الغير متناسقة المستعملة بكثرة هذه الأيام ، تركيب أو بنية الأغشية بشكل عام للأصناف البوليميرية يأتي من الإزاحة الجزئية للمذيب أو الأسيتون ، و بشكل تقريبي هي تتألف من العديد من الطبقات المسامية المتعددة ذات مجالات و أبعاد مختلفة (800 – 400) أنغستروم مدعمة بوساطة ركيزة مكونة من نفس المجالات ومكتظة أو محزومة بشكل عشوائي و أقل تشوهاً من السابقة لذلك تترك صدوع أو فجوات تتراوح من (75–100) أنغستروم ، و هذا البناء له عدة أشكال و أنواع تستخدم بشكل شائع في تصنيع الأغشية من المحاليل مثل الأغشية المصبوبة (الصب مع التبريد ، المحاليل البوليميرية المترسبة) .

إن علم التشكل المتعلق بالنافذ من الأغشية بالمقارنة مع التغذية يمكن أن يختلف تبعاً لبناء و تركيب الأغشية و عمليات تحضيرها .

هنا نذكر علم تشكل أو تكوين أغشية التناضح العكسي الغير متناسقة للأنواع المحضرة عن طريق الصب من المزائج و الخلائط ، أو المحاليل الحاوية على أملاح كتلك الموصوفة في البداية من العالمين لويب و سوريراجان ، التركيب المقترح بشكل عام للأصناف البوليميرية و في حد ذاته من الممكن أن يكون صورة واضحة أو تعريفاً لأغلب أنواع الأغشية ذات معدلات التدفق العالية .

الأغشية مكونة من طبقة متعددة سطحية من مواد أو أجسام كروية مبلمرة ذات أقطار تتراوح لمئات الأنغستروم ات ، و هذه الأجسام تكون ذات أبعاد مشوهة أو غير متناسقة بالشكل و مذابة جزئياً لذا فإن أبعاد مساماتها تبقى ثابتة تقريباً ، الطبقة المتعددة السطحية مدعمة من خلال ركيزة من حزم عشوائية مكتظة من أجسام مماثلة وهي أقل إذابة و نسبياً غير مشوهة لكي تترك فراغات قدرها (100-75) أنغستروم و هذه فكرة اللاتناسق و التي تتضمن ميكانيزم النفاذ و التي تعتبر أكثر وضوحاً من الآليات التي تقترح الحجم المجاني (المسامات الديناميكية) بدلاً من المسامات أو الثقوب الثابتة ، علاوة على ذلك تمتلك القدرة على تمييز الأغشية الجديدة و التي تعتمد على علم التشكل هذا ، تقلل من تضييع الوقت المتعلق بتحسين أنواع الأغشية ، كما أنها تعطي فكرة مساعدة لعملية البحث عن الغشاء المطلوب .

هناك تشابهات هامة بين علم تشكل الأغشية و تركيب المحلول الناتج من أي غشاء مصبوب و مركب من الصب و ليس للأغشية الأولية الغير مكثفة و بسبب هذه العلاقة يمكن أن نشير للوحدات البنائية حيث يمكن

تحديدها بوساطة مجهر الكتروني في محلول الصب عند تجمده بشكل مفاجئ على لوح زجاجي نظيف حيث يمكن رؤية الطبقة المتعددة في الغشاء خلال ثواني بعد الصب في درجة حرارة المكان ، إن علم تشكل الأغشية اللامتناسقة محدد في حالة الطور السائل و الإجراء المستخدم في الغشاء المصبوب و المحقق لهذا التركيب و بالتالي يمكننا أن نقول أنه من أجل الحفاظ على تركيبة الغشاء و فعاليته بشكل كبير يكون بوساطة الإبقاء و الحفاظ على قابلية التشكل من المحلول المصبوب دون السماح للخلايا بالإذابة الكلية أي تحقيق الإذابة جزئياً فقط ، و إجراءات الصب ينبغي أن يتم التحكم بها عن طريق التحكم بالتشكل الداخلي للأجسام و كذلك قياس كمية الإذابة للأجسام في الطبقة السطحية للوصول إلى حجم الفراغات الأفضل (الثقوب الديناميكية أو المسامات الديناميكية) .

إن علم تشكل الجزيئات هذا منسجم مع التأسيس الجيد للطبقة السطحية ذات الثخانة (1000) أنغستروم و هي الجزء اللامتناسق الذي يؤدي الوظيفة في أغشية التناضح العكسي (الطبقة الفعالة) و على أية حال فإن أغلب التصورات عن الطبقة السطحية تعالجه على أساس أنها طبقة رقيقة و ليس أكثر من ذلك .

5-2- طبيعة الأغشية اللامتناسقة :

إن أغشية التناضح العكسي الغيرمتناسقة (asymmetric membranes) تحضر من أصناف مبتكرة البوليميرات المتعددة العطرية (البوليميدات) و كذلك من (polyamide -hydrasides) ، هذه المواد تتميز بتحملها لدرجات الحرارة العالية في الحالة العادية و الانتقائية العالية للأملاح المنحلة (رفض أكبر أو يساوي 99.4%) في المستويات العالية لمعدلات الجريان $1 \leq J1(gal . ft^{-2} . day^{-2}) \leq 30$ مع معدل ثبات كيميائي و خصائص ميكانيكية . إن الأغشية مشابهة في التركيب لتلك المصنعة من أسيتات السيللوز و بمعنى آخر : تحتوي على طبقة سطحية كثيفة رقيقة جداً مدعومة على قوالب مسامية .

النشاط الكبير كان واضحاً في حقل التناضح العكسي من خلال الاكتشاف المبكر للعالمين ريد و بريتون و اكتسافهما لأسيتات السيليلوز كأغشية لإزالة الأملاح بشكل مواز للتحسينات المفاجئة اللاحقة لمعدلات التدفق و الجريان خلال الأغشية المعبر عنها من قبل العالمين (لويب و سوريراجان) و التي أثارت الاهتمام الكبير اللاحق للتناضح العكسي كعملية اقتصادية في عملية تحلية أو إزالة الأملاح من الماء المسوس و مياه البحر ، البحث عن تركيبات جديدة و مطورة للأغشية استمر بنجاح معتدل و حدد بشكل عام بالمواد السيليلوزية و تعديل أسيتات السيللوز بالذات .

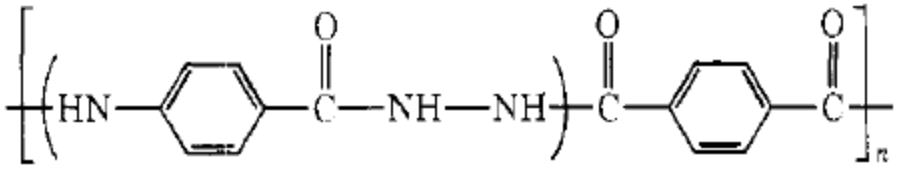
إن خصائص النقل لنظام الأغشية الغير متناسقة الجديدة يعتمد على صنف البوليميدات العطرية المصنفة و هذه المواد موصوفة بقابليتها العالية لانتقاء الأملاح الذائبة للمستويات العالية من الماء المنتقل عبرها ، المتانة الميكانيكية الجيدة ، الاستقرار الكيميائي الممتاز لها .

5-3- الأغشية البوليميرية :

5-3-1- تركيب و ترابط البوليمير :

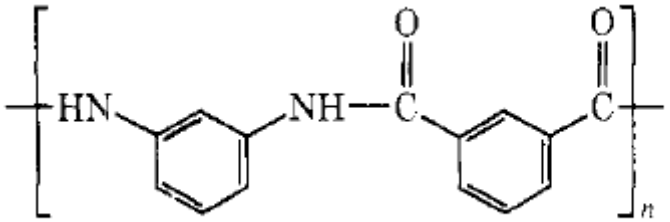
البوليميرات الثلاثية المقيمة في هذه الدراسة عندما يكون ال polyterephthalamide من paminobenzhydrazide هو البوليمير الأحادي، والبولي (m- phenyleneisophthalamide) البوليمير الثنائي ، و polyterephthdamide من (1,3 bis) لبنزول ال (3-aminobenzarnide) البوليمير الثلاثي . و يمكن أن توضح بمثال بنيوي مثل (الأحادي– ثلاثي) ، حيث البوليمير الأحادي يمكن تحضيره بدرجة حرارة منخفضة (10) درجة مئوية لمحلول dimethylacetamide مبلمر لامائي

من terephthaloyl chloride and p-aminobenzhydrazide . أما البوليميد (البوليمير الثنائي و الثلاثي) فهي تحضر في درجة حرارة (20) مئوية في dimethylacetamide . البوليمير الثنائي ناتج من التكثيف المتعدد ل (m- phenyleneisophthalamide) مع كلوريد ال isophthaloy1 ، في حين أن البوليمير الثلاثي ناتج من تقويم terephthaloyl chloride مع الديامين المعقد 1, 3 bis بنزول (3 – أمينو بنز أميد) .



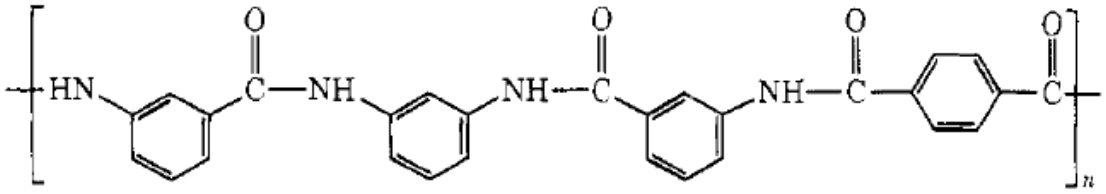
I

البوليمير الأحادي



II

البوليمير الثنائي



III

البوليمير الثلاثي

شكل (9) البوليميرات (الأحادية – الثنائية – الثلاثية)

عندما كانت عملية تقويم البلمرة كاملة كانت كربونات الكالسيوم بالكميات الكافية اللازمة لمعادلة (95 مول%) من حمض كلور الماء (HCL) المحرر من خلال عملية تكثيف البوليمير متأثرة بمحلول البوليمير ، و تم تسخين المزيج إلى درجة حرارة (75–80) مئوية لإنجاز الرفض الكامل لكربونات الكالسيوم CaCo3 و عندها تم تفريغ الغاز من الفراغ .

أوزان الجزيئات البوليميرية كمعدل (70≤ Mv -3 ^ 10 ≤ 20) في تراكيز من (% 6-20) (كوزن) و ذلك عندما تحضر بهذه الوسيلة .

5-3-2- تحضير الأغشية البوليميرية :

أغشية البوليميرات المتعددة العطرية (polyamides) و ال (polyamide-hydrazide) اللامتناسقة حضرت من بلمرة بعض أنواع الإيتانول الموصوفة مسبقاً بعد عمليات الفلترة الحذرة من خلال فلاتر ذات ثقوب بحجم 5 ميكرونات ، التحكم بسماكة الأغشية و كذلك صبها تم باستخدام سكينة غاردنر مع نصل تسوية قابل للتعديل ، و تبخير المذيب (الأسيتون) أحرز من خلال الانتقال الحراري الميكانيكي (مع الهواء الجوي المحيط) أو فرن مفرغ (مع الإمداد بغاز النتروجين) ،في جميع الحالات تم أخذ الحذر لضمان استبعاد التلوث بالغبار أو أية ملوثات أخرى يمكن أن تأتي من الهواء أو الجو المحيط .

أغشية البوليميرات الأحادية (The polyamide-hydrazide) حضرت من محاليل البوليمير المحتوية على (6 – 7)% بوليمير (Mv مساوي تقريباً 34000) و ذلك بالصب على صحون أو صفائح زجاجية جافة نظيفة ، الصحون و المحتويات أمكن بعدها وضعها في فرن و كان من الممكن للمذيب أن يتبخر بعد فترة زمنية معينة (60- 30) دقيقة في درجة حرارة محددة مسبقاً و أزيل الغشاء من الفرن و مباشرة تم تجميده بماء متأين . و سمح لكل غشاء بأن يطفو بحرية على الصفيحة الزجاجية و غسله لفترة لا تقل عن (12) ساعة كحد أدنى لإنجاز الإزالة الكاملة للمذيب . إن الأغشية الخالية من هذا المذيب تم بعدها تقويتها و تلدينها في (التيرموستات) أو أداة ميكانيكية منظمة للحرارة عن طريق ماء متأين بدرجات حرارة (100 ≤ t ≤ 40) مئوية و ذلك بهدف زيادة انتقائية الغشاء لكلوريد الصوديوم .

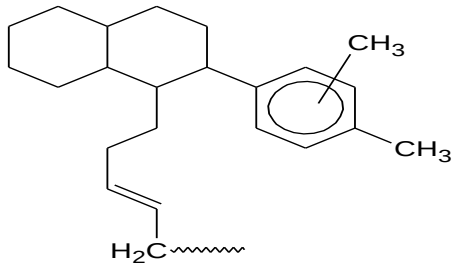
أغشية البوليميد (ذات البوليميرات الثنائية و الثلاثية) حضرت بطرقة مشابهة لتلك المستخدمة في أغشية polyamide-hydrazide باستثناء مرحلة التقوية أو التلدين بالماء و التي تم الاستغناء عنها من أجل البوليميرات الثلاثية ، درجة الانتقائية العالية (للأملاح) أمكن إنجازها كنتيجة مباشرة للتحكم بمرحلة التبخير بوساطة الفرن و التجميد اللاحق للبوليمير .

إن أغشية التناضح العكسي ذات (0.5 – 3.5 - 6 wt% NaCl) تم الحصول عليها بوساطة فاحص أغشية محدد مسبقاً والتعديلات (إضافة مضخة) التي استخدمت في الفاحص سهلت إلى حد كبير تقييم أداء التناضح العكسي .

و نظراً للتغيرات المهمة في تركيب الأغشية و خصائص الانتقائية العالية لهذه polyamides و polyamide hydrazides فإن درجة الحرارة و استمرار الكشف عن عملية التبخير في الفرن ، درجة حرارة التجميد ، ... وغيرها تكون ذات أهمية كبيرة لإنتاج أغشية ذات مواصفات محددة و درجة انتقائية عالية .

5-3-3- تصنيع ومواصفات الأغشية البوليميرية غير المتناظرة باستخدام البوليمير (بولي إيزو برين) المحلَّق جزئياً (وجود حلقات سداسية مغلقة في السلسلة الخطية للبوليمير) :

أجريت عمليات تصنيع أغشية اصطناعية غير متناظرة ذات نفوذية انتقائية تتصف بخواص ميكانيكية وهيدروديناميكية عالية باستخدام البوليمير (بولي إيزو برين المحلق جزئيا) تم في هذا العمل أيضاً دراسة سيلان الماء المقطر، والكحول الايثيلي المطلق، وكذلك تحولات وتغيرات الانتقائية من خلال هذه الأغشية البوليميرية، وتبين أنه من الضروري مراعاة عدد من الشروط(حددت في المناقشة)، التي يجب تحديدها بدقة حتى لا يتشوه الغشاء الناتج.



شكل (10) البوليمير (بولي إيزو برين) المحلق جزئياً

5-3-3-1- الدراسة النظرية المفصلة :

يعرف الغشاء البوليميري أنه الحد الفاصل بين طورين ، ويتميز أنه محدد ونوعي لمختلف المواد التي تجتازه بشكل انتقائي، وتتشكل الأغشية البوليميرية بنماذج وأشكال مختلفة ، منها المستوي ، ومنها المتموج، أو على شكل خيوط دقيقة تصنع جميعها تبعاً للغايات والتطبيقات المعدة من أجلها، وقد استخدمت الأغشية البوليميرية الاصطناعية في مجالات عديدة أهمها: فصل السكريات، والألبومين، والأملاح المعدنية، وفي تنقية الإنزيمات، وعزل الفيروسات، وتحديد الحجم، وتحديد الوزن الجزيئي التقريبي للجزيئات الضخمة، ومحليات مياه، بطريقة التناضح العكسي، وقد أظهرت التجارب أن هذه الأغشية عانت من صعوبات كثيرة أثناء عمليات الاستعمال ، منها: النفوذية السيئة التي لم تتجاوب مع احتياجات الصناعة والمقاومة الضعيفة تجاه المواد الكيميائية ، والبكتريا، والزمن القصير لحياتها في أثناء عمليات الاستخدام، وغيرها .

اتجه العلماء في محاولة لتخفيف هذه الصعوبات إلى تصنيع أغشية بوليميرية لا متناظرة مؤلفة من طبقتين: الأولى كثيفة ذات سماكة من 1 إلى 2 ميكرون، وتمثل المصفاة (الفلتر)، في حين أن الثانية ضعيفة الكثافة ذات سماكة من 100 وحتى 200 ميكرون، وتحتوي على فجوات كبيرة، وتمثل طبقة دعم ميكانيكي للطبقة الأولى. تتميز الطبقتان أنهما متمتعتان بالتركيب الكيميائي نفسه ، ومختلفتان بالشكل الفيزيائي من ناحية الثقوب أو الفجوات فقط. تتمتع الأغشية الاصطناعية البوليميرية غير المتناظرة مقارنة مع مثيلاتها المتناظرة بصفات مميزة ، أهمها:

١ – سرعة مرور كبيرة للمحاليل من خلالها.

٢ – ضعف سد ثقوب المصفاة (الفلتر) فيها.

تتميز عملية الفصل، تبعا لأقطار الفجوات الموجودة في الفلتر ، بميزات متعددة، ففي الغشاء ذ ي الفجوات الكبيرة (50-0.01) ميكرون تعدُّ كمنخل جزيئي ميكانيكي (molecular sieves)، بينما ترتبط عملية الفصل بشكل مباشر مع سرعة عبور واجتياز المحاليل لهذه الأغشية المتجانسة ذات الطبقة الرقيقة (على شكل فلم) الكثيفة. يوضح الجدول 2 طرائق الفصل باستخدام الأغشية الاصطناعية البوليميرية.

5-3-3-2 – الهدف من هذه الدراسة :

يتجلى الهدف من هذه الدراسة إيجاد طرائق حديثة لتصنيع أغشية بوليميرية غير متناظرة ذات نفوذية انتقائية عالية، والتي بدورها تتمتع بفلترة عالية الدقة، وتستخدم في الكُلية الاصطناعية (Dialysis)، والبنكرياس الاصطناعي الحيوي.

ميكانيكية تشكّل الأغشية الاصطناعية البوليميرية غير المتناظرة :

يتطلب الحصول على غشاء اصطناعي بوليميري ذات مواصفات جيدة ، ومقاومة ميكانيكية عالية، معرفة الأطوار الأساسية التي يتشكل منها النظام الثلاثي:

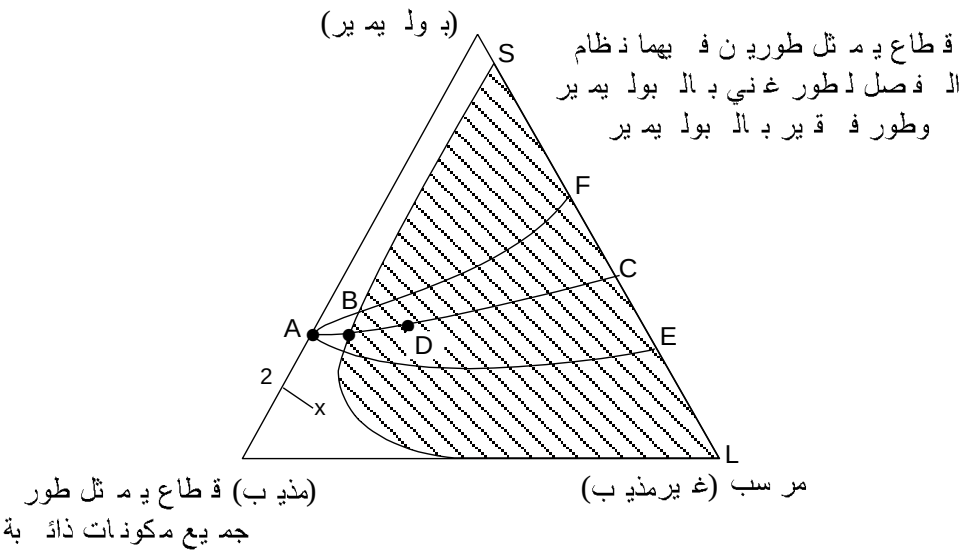
- الطور الصلب: الغني بالبوليمير والذي يتشكل بعد عملية الترسيب للغشاء ، ويعطي القشرة أو الجلد (المصفاة).
- الطور السائل: الفقير بالبوليمير الذي يتشكل بعد عملية الترسيب، ويعمل كداعم لطبقة القشرة (الأولى).

جدول (2) طرائق الفصل باستخدام الأغشية الاصطناعية البوليميرية

نوع الفصل	شكل الغشاء	القوة المستخدمة	طريقة الفصل	مجال التطبيق
التصفية الماكرونية	ثقوب ماكرونية متناظرة نصف قطر الثقب (10-0.1) ميكرون	ضغط هيدروليكي (1-0.1) بار	غربال ميكانيكي	تصفية (فلتره) بقصد التطهير
تصفية عالية الدقة	ثقوب ماكرونية غير متناظرة نصف القطر (10-1) ميكرون	ضغط هيدروليكي (5-0.5) بار	غربال ميكانيكي	فصل محاليل الجزيئات الضخمة
ضغط عكسي	غشاء غير متناظر نصف قطر الثقب (1-0.1) ميكرون	فرق في التركيز	انتشار	فصل الأملاح والدقائق
ديناليز	غشاء غير متناظر	فرق بالتركيز	انتشار	فصل الأملاح والدقائق

الكتروديناليز	غشاء مطعم بالايونات المتبدلة (موجبة-سالبة)	فرق بالكمون الكهربائي	حجم و شحنة الجزيئات المكهربة	إزالة ملوحة مياه البحار
فصل الغازات	غشاء متجانس	ضغط هيدرو ستاتيكي وفرق بالتركيز	ذوبانية وانتشار	فصل مزيج غازي

تفسر مختلف الظواهر المرافقة بالاعتماد على العلاقة الترموديناميكية الحركية، وظاهرة انفصال الطور في النظام الثلاثي بوليمير/ مذيب / مرسب، كما هو موضح في المخطط (2) وتمثل كل قمة في هذا المثلث تركيباً معيناً، كما تمثل كل نقطة فيه المزيج الثلاثي. ونلاحظ في هذا التمثيل حالتين:



مخطط (2) : مخطط يبين محتوى تشكل الغشاء الاصطناعي البوليميري
(مثلث الكولوديون الممثل لنظام ثلاثي متماثر – مذيب – غير مذيب).
A – تركيب المحلول البدائي، B – نقطة الترسيب، C – التركيب النهائي للغشاء، D – نقطة بداية التصلب E– التصلب في النقطة، F– بداية الترسيب، S – طور غني بالبوليمير، L – طور فقير بالبوليمير.

- طور تكون فيه جميع المكونات ذوابة.
- طورين أحدهما صلب غني بالبوليمير والأخر سائل فقير بالبوليمير.

تمثل النقطة A في مثلث التشكل خلال تشكل الغشاء المركب الأولي للمحلول الذي يعطي النقطة C بعد تبخر قسم من المحلول، وهو المركب بعد تبخر قسم من المذيب بعد فترة زمنية حتى نصل إلى النقطة C، حيث نلاحظ ظهور طورين متوازنين:

أ -طور صلب غني بالبوليمير يشكل البنية النهائية للغشاء الاصطناعي الذي يمثل بالنقطة S.

ب طور سائل فقير بالبوليمير يعطي الفجوات اللازمة التي ستمتلئ بالمرسب يمثل تركيبها من خلال النقطة L.

علماً أن تركيب النقطة C على المحور SL هو الذي يحدد الثقوب الإجمالية للغشاء، وأن عملية الترسيب خلال الخط AC تمثل مرور المكون A إلى الحالة C من خلال التبادل المتنامي بين المذيب والمرسب، و تتطابق النقطة B مع بداية عملية ترسيب البوليمير عندما يكون المذيب قد استبدل بالمرسب بشكل متنامي، وعندها تتزايد لزوجة الطور الغني بالبوليمير حتى نصل إلى النقطة D حالة المرحلة الصلبة. وهكذا تكون بنية الغشاء قد حددت تماماً من حيث توزع الثقوب، أما عددها الكلي فيرتبط بشكل مباشر بسرعة ترسيب البوليمير، وانتشار المذيب. يتم الحصول على المنحني AF من المعادلة التي تمثل الحالة العكسية لسرعة تشكل الغشاء التي يمكن مراقبتها من خلال إضافة بعض المواد مثل الفورم الدهيد – الفورم اميد – كلوريد الزنك – كلوريد المغنيزيوم وغيرها.

لقد أظهرت الدراسات أنه لا يمكن للطور المشكل للغشاء في الشكل السابق أن يعطي أية معلومات عن حجم الثقب، ولا عن بنية الغشاء الاصطناعي البوليميري غير المتناظر ، لذلك فسرت عملية ترسب البوليمير بعودة مشابهة لعملية التبلور من محلول مشبع – فوق مشبع وهنا يمكن وضع علاقة بين درجة فوق الإشباع، ونمو البلورات، فكلما كانت درجة فوق الإشباع مرتفعة كانت حجوم البلورات الناتجة صغيرة ، وسرعة الترسيب كبيرة. تتم دراسة وتحديد مواصفات الأغشية الاصطناعية البوليميرية غير المتناظرة من خلال عدد من الثوابت التي بواسطتها نحصل على بعض الخصائص، مثل: الثخانة، وحجم الانتفاخ، والشكل الخارجي، وتوزيع الثقوب، والنفوذية، والانتقائية .

تعرف النفوذية أنها السرعة التي يجتاز فيها سائل ما سطحاً مقداره متر مربع من الغشاء الاصطناعي البوليميري تحت ضغط محدد، ودرجة حرارة معينة، ويعبر عنها بشكل عام بواحدة (ليتر/ يوم)، و تعطى بالعلاقة الآتية: لها:

$$L^0_{p\eta} = \frac{Bp}{e}$$

حيث: $L^0_{p\eta}$ = معامل النفوذية.

Bp = ثابت مرتبط بالثقوب السطحية.

e = ثخانة الغشاء (القشرة أو الفلتر).

تعرف النفوذية النوعية أنها إمكانية الاحتفاظ أو السماح بمرور الجزيئات الضخمة من خلال الغشاء الاصطناعي البوليميري، وذلك تبعاً لحجومها التي تتوتبط بدورها بالكتلة الجزيئية وبنصف القطر الفراغي للجزيء، تحدد قيمة النفوذية النوعية من خلال عملية الفلترة عالية الدقة لمحاليل عيارية لجزيئات ضخمة معلومة الكتلة الجزيئية مثل البروتينات والدكستران وغيرها، ويعبر عنها رياضياً بالعلاقة الآتية:

$$\%R = \left(C_0 - \frac{C_p}{C_0} \right) \times 100$$

حيث: R = الانتقائية.

C_0 = التركيز الأولي للمحلول قبل اجتيازه الغشاء.

C_p = التركيز النهائي للمحلول بعد اجتيازه الغشاء.

يبين الجدول (3) قيم معامل النفوذية للماء خلال بعض أنواع الأغشية الاصطناعية البوليميرية.

جدول (3)

الغشاء الاصطناعي البوليميري	معامل النفوذية	النفوذية (ليتر/ يوم)
IRIS 3022	1.6	2000
UM 10	3	2000
IRIS 3038	10	8000

5-3-3-3- الطرائق والأجهزة المستخدمة:

أجريت هذه التجارب باستخدام وحدة فلترة مكونة من وحدة دائرية مثبت عليها الغشاء البوليميري غير المتناظر بسطح مقطع $1\ cm^2$، وتحت ضغط متغير باستخدام اسطوانة غاز النتروجين.

5- 3-3-4- مناقشة النتائج العملية:

١) دراسة انسياب الماء المقطر بدلالة حجم السائل المفلتر:

يمثل المخطط (3) انسياب (جريان) الماء المقطر بدلالة حجم السائل الناتج المفلتر عند ضغطين مختلفين، وتفسر هذه الظاهرة بالاعتماد على الفرضيتين الآتيتين:

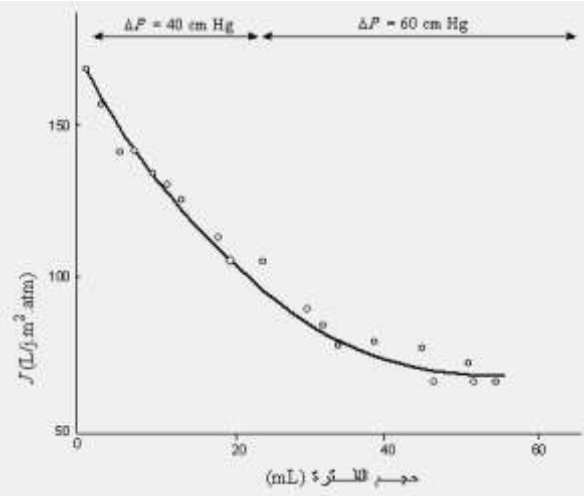
أ -انسداد بعض الثقوب في الغشاء بسبب الجزيئات المنحلة بالماء.

ب -خضوع الغشاء لعملية ارتصاص نتيجة زيادة الضغط الهيدروستاتيكي المطبق عليه والذي يؤدي إلى تناقص ملحوظ في المسامية الذي يعطي بدوره جريان بطيء للماء.

حيث يمثل PVP بولي فينيل بوليوريدون (مثقب الغشاء) و DBP دي بوتيل فتالات (مرسب)، و THF رباعي هيدروفيوران (مذيب)، و PI بولي ايزوبرين المحلق جزئياً (بوليمير مشكل للغشاء)زمن التبخر: 9 sec، في حمام ايتانول/ماء بنسبة 4 / 1 حجما في الدرجة $20\ ^oC$.

٢) دراسة انسياب الماء بدلالة الضغط:

حددنا تدفق الماء في شروط التجربة، حيث كانت درجة الحرارة 20 مئوية وتحت ضغوط مختلفة، وتوصلنا إلى تناسب طردي بين التدفق والضغط ، ونلاحظ من الخط البياني (3) العلاقة التناسبية الرياضية بين الجريان والضغط.



المخطط (3) : مخطط تغير النفوذية بدلالة حجم السائل الناتج عن الفلترة للماء المقطر

تحت ضغطين مختلفين ويمثل محور العينات كمية النفوذية (باليوم بدلالة الضغط).

تركيب الكولوديون: P.I / T.H.F / D.B.P / P.V.P

(% وزنا): 14 81.5 3 1.5

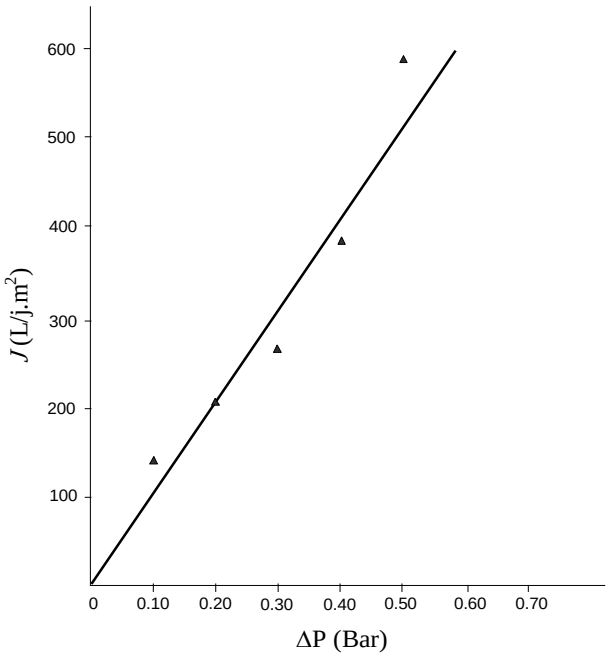
٣) دراسة انسياب الكحول الايثيلي المطلق :

أ -انسياب الكحول بدلالة حجم السائل الفلتر:

أعيدت التجربة السابقة باستخدام الكحول الايثيلي المطلق بدلاً من الماء المقطر وتوصلنا إلى النتائج المبينة في المخطط (4) ، والذي يوضح التناقص في عملية الجريان ثم الوصول إلى حالة الاستقرار والثبات بشكل أسرع مقارنة مع الماء المقطر ، وفسرت هذه الظاهرة بخضوع الغشاء للارتصاص نتيجة الضغط المائي الساكن المطبق على سطح الغشاء ، ونعني بذلك الضغط الناشئ عن تدفق الايتانول مع تشكل روابط هيدروجينية مثل الماء، ولكن مع اختلاف طفيف في القطبية. ويلاحظ أيضاً أن الانخفاض في تأثير الضغط يؤدي إلى ارتفاع في الجريان.

ب -انسياب الكحول بدلالة الضغط:

حصلنا من خلال هذه التجربة، كما هو موضح في المخطط (5) على معلومات تعبر عن وجود تناسب قائم بين الجريان والضغط مقارنة باستعمال الماء . كما هو موضح في المخطط (5) نلاحظ أن القيم المهمة لنفوذية الكحول تعود إلى المسامية العالية الموجودة في الغشاء البوليميري المستخدم.

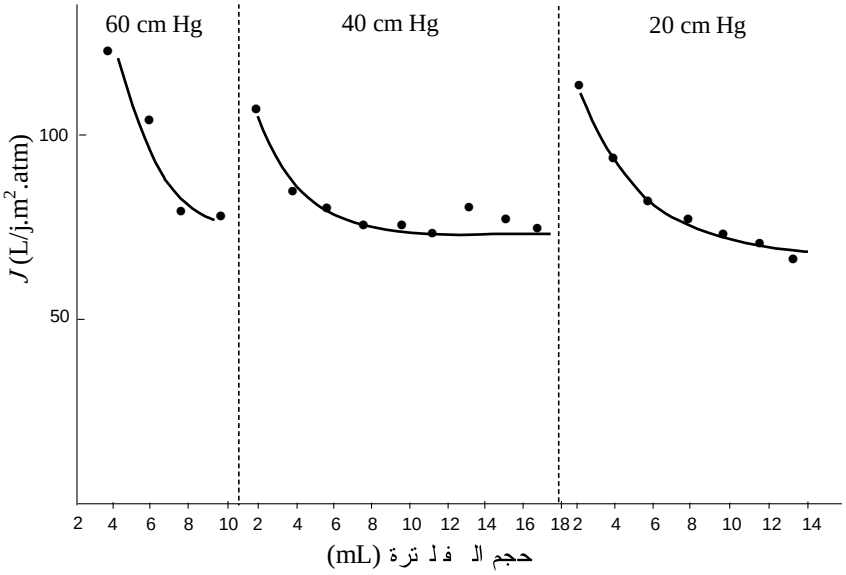


المخطط (4) : مخطط تغير النفوذية للماء المقطر بدلالة الضغط.

الشروط: P.I / T.H.F / D.B.P / P.V.P

(% وزنا): 14 81.5 3 1.5

زمن التبخر: 9 sec، في حمام ايتانول/ماء بنسبة 4 / 1 حجما في الدرجة 20 °C.



المخطط (5) : مخطط تغير النفوذية بدلالة حجم السائل المفلتر بالنسبة للايتانول.

الشروط: P.I / T.H.F / D.B.P / P.V.P

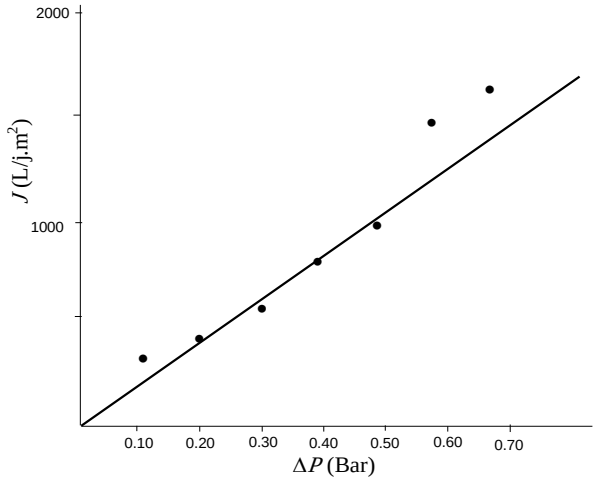
(% وزنا): 1.5 3 81.5 14

زمن التبخر: 9 sec، ضمن حمام ايتانول/ماء بنسبة ¼ حجما.

٤) دراسة الانتقائية R:

حددنا الانتقائية الغشاء الاصطناعي البوليميري (البولي إيزو برين المحلق جزئياً) بدلالة الأوزان الجزيئية المختلفة لمحاليل عيارية، وباستخدام علاقة النفوذية المشار إليها سابقاً

يشير المخطط (7) إلى تغير النفوذية بدلالة الأوزان الجزيئية المختلفة لمحاليل البولي اثيلين غليكول عند الدرجة 20 مئوية. ونلاحظ من المخطط السابق تزايد قيمة الانتقائية مع ارتفاع الوزن الجزيئي للبولي اثيلين غليكول.

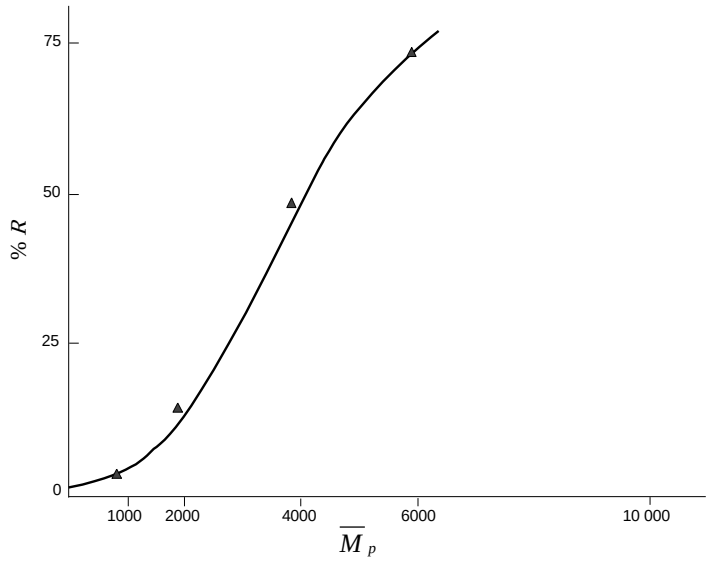


المخطط (6) : مخطط تغير النفوذية للكحول المطلق بدلالة الضغط.

الشروط: P.I / T.H.F / D.B.P / P.V.P

(% وزنا): 1.5 3 81.5 14

زمن التبخر: 9 sec، ضمن حمام ايتانول/ماء بنسبة ¼ حجما



المخطط (7) : مخطط تغير الانتقائية (R%) بدلالة الأوزان الجزيئية المختلفة لمادة البولي ايتلين غليكول ضمن محلول مميه بالدرجة ^{o}C 20 .

الشروط: P.I / T.H.F / D.B.P / P.V.P

(% وزنا): 1.5 3 81.5 14

زمن التبخر: 9 sec، الضغط: P = 20 cm.Hg، وزنا C = 1.5%.

حيث PVP هو بولي فينيل بوليوريدون (مثقب الغشاء) و DBP هو دي بوتيل فتالات(مرسب)THF هو رباعي هيدروفيوران (مذيب) PI هو بولي ايزوبرين الحلقي (بوليمير مشكل للغشاء).

5-3-3-5- الاستنتاجات من هذه الدراسة :

يلاحظ مما تقدم أنه من الضروري مراعاة عدد من الثوابت، والعوامل التي يجب دراستها وتحديدها بدقة حتى لا يحدث هناك تشوه في الغشاء الناتج في أثناء عملية التصنيع، والتخلص من العيوب التي تعيق عمله، من أهمها :

1- لزوجة المحلول التي تتغير مع تغير نسبة البوليمير في نظام الكولوديون وكانت أفضل نسبة للبوليمير حصلنا عليها هي 14 % وزنا التي تؤدي لتشكل الغشاء عالي الجودة.

2- سرعة انتشار المذيب خارج الطبقة الرقيقة (الفلم) والتي ترتبط بشكل رئيس بدخول المرسب إلى الوسط أثناء عملية تخثر الغشاء في حوض التغطيس

3- تشكل الغشاء الذي يتعلق بشكل رئيس بالتوازن الثلاثي لمكونات الكولوديون ، وتجنب عملية انفصال الطور، وقد توصلنا إلى نتائج مميزة، وذلك باستخدام نسبة البوليمير 14%، ونسبة المذيب 81.5%، ونسبة المرسب 3%، حيث كان المذيب رباعي هيدروفيوران، ويؤدي دي بوتيل فتالات دور المرسب فقط.

6-مقارنة بين الأغشية البوليميرية و أغشية أسيتات السيللوز :

الجدول (4) يعطي مقارنة بين هذين النوعين من الأغشية

جدول (4)

أسيتات السيللوز	البوليميد
– معدل مرتفع لمرور الماء العذب لوحدة المساحات . – تستخدم في الأغشية الملفوفة حلزونياً و الشعيرات الدقيقة المجوفة و غيرها – عمرها أقل من البوليميد . – تقاوم وجود الكلور الزائد حتى أقل جزء في المليون . – مستقر حتى أس هيدروجيني بين (3.5 – 6.5) . – حساس لهجوم البكتريا . – حساس لإمكانية انهياره مع ارتفاع درجة الحرارة و عدم انضباط الرقم الهيدروجيني – نسبياً أرخص سعراً .	– معدل اقل لمرور الماء العذب لوحدة المساحات – يستخدم في الأغشية الملفوفة حلزونياً و الشعيرات الدقيقة المجوفة و غيرها . – عمرها أطول من السيللوز . – حساسة لوجود الكلور . – مستقر في حدود مجال أس هيدروجيني بين (3 – 11) . – يقاوم البكتريا – يقاوم الانهيار مع ارتفاع درجة الحرارة و عدم انضباط الرقم الهيدروجيني . – نسبياً أعلى سعراً .

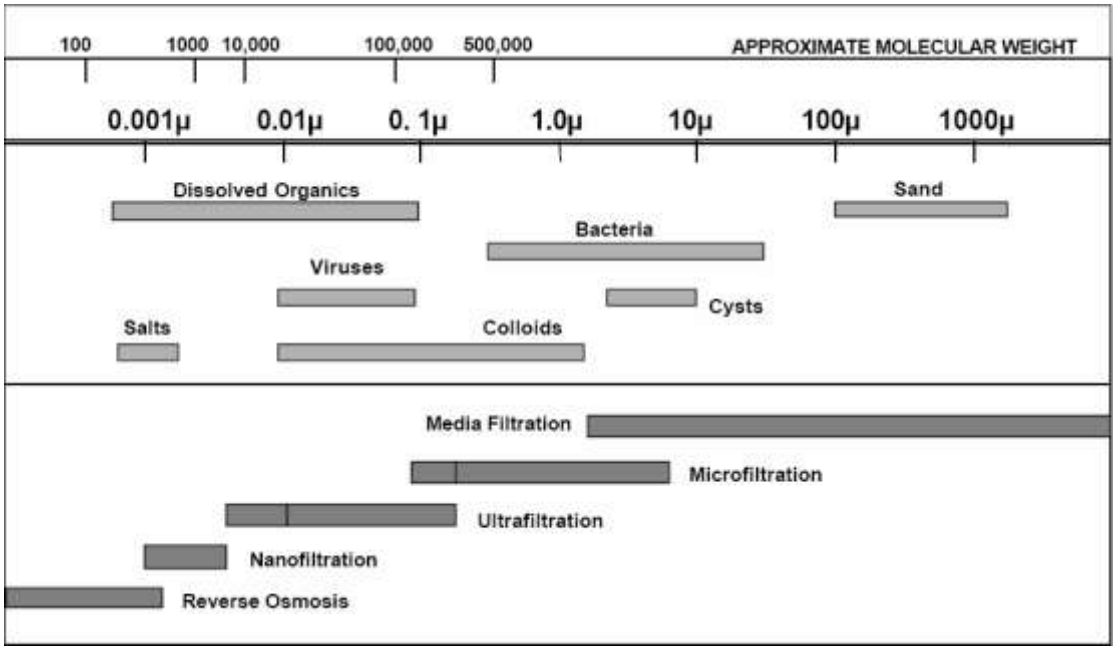
7- مقارنة بين أغشية التناضح العكسي و غيرها من أنواع الأغشية الأخرى :

تتفق كل من عمليتي التناضح العكسي و الترشيح الدقيق في أنهما يفصلان الماء عما يحتويه من مكونات إلا أن الترشيح الميكروني (**Micro Filtration**) يفصل المواد العالقة في حين أن الترشيح الدقيق (**Ultra Filtration**) و الترشيح النانومتري (**Nano Filtration**) و التناضح العكسي يمكنهم فصل العناصر الذائبة لذا تسمى أحياناً عملية التناضح العكسي (**Hyper Filtration**) و الجدول (5) يوضح خصائص أغشية الترشيح المختلفة بالمقارنة مع أغشية التناضح العكسي .

جدول (5) خصائص أغشية التناضح العكسي و مقارنتها بالأغشية الأخرى

الطريقة	حجم مسام الأغشية ($\mathring{A}$) أنغستروم	الضغط المستخدم رطل / بوصة2	المواد الممكن فصلها	المواد المستخدمة في الصنع	شكل الأغشية
ترشيح دقيق (MF)	2000 – 50	30 – 10	رواسب – غرويات	–بولي سلفون Poly Solfone فلوروكربونات – كربون زجاج	– أنبوبي
ترشيح فائق (UF)	1000 – 10	75 – 20	بروتينات و مواد عضوية ذات وزن جزيئي عالي	سيللوزية / أكريليك بولي سلفون/سيراميك	– أغشية غير متماثلة شعيرات دقيقة مجوفة
ترشيح نانومتري (NF)	100 – 7	150 – 50	أيونات ثنائية التكافؤ Ca2+/Mg2+	بولي أميدات أروماتية Arom Polyamides مشتقات بولي فينيل كحولية Polyvinyl Alcohol Derivatives	– أغشية مستوية مركبة Flat Sheet Composite es
تناضح عكسي (RO)	15 – 1	300 – 150 LP 600 – 350 St . Br 1200 – 800 Br	كل ماسبق مع الأيونات الأحادية	–أسيتات السيللوز CA – بولي أميدات أليفاتية Aliph.Polyamides –بولي أميدات أروماتية Arom.Polyamides – بولي سلفون Polysulfone – بولي فيوران Polyfuran	–لا متماثلة مستوية Asymmetric Flat – مركبة مستوية Flat Composite – لا متناسقة شعيرات مجوفة Asym . HFF

و الشكل (11) يوضح هذه الفروقات بين الأغشية و أقطار و أنواع المواد المفصولة



شكل (11) أنواع و أقطار المواد المفصولة من قبل أغشية التناضح و الأغشية الأخرى

نلاحظ من المقارنات السابقة أن أغشية التناضح العكسي لها القدرة على فصل كل أنواع المواد المختلفة بالمقارنة مع الأغشية الأخرى .

8- مواصفات الأغشية :

إن الغشاء المثالي له المواصفات التالية :

1- قابلية رفض عالي للأملاح .

2- قابلية النفاذية العالية للمياه .

3- مقاومة درجات الحرارة العالية .

4- مقاومة عوامل التأكسد خصوصاً الكلور .

5- مقاومة شتى أنواع التلوث (العضوي – الصمغي – اللاعضوي – التلوث الميكروبيولوجي) .

6- الثبات الكيميائي و الفيزيائي و الحراري في الماء الملحي .

7- القدرة على أن يتم تشكيلها لإنتاج أو تكوين منطقة غشاء فعالة عالية نسبة إلى معدل الحجم (كثافة التحميل) .

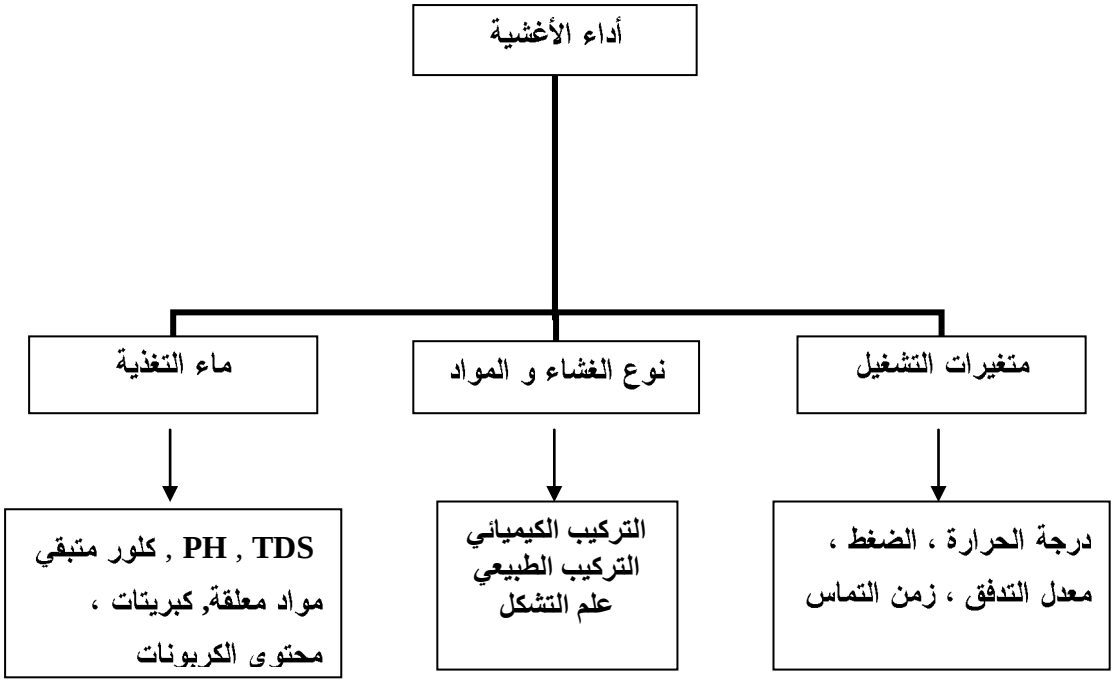
8- مقاومة شتى عمليات التشويه و التخريب .

9- الحياة الطويلة و الموثوقية العالية .

10- السعر المنخفض .

العوامل المؤثرة على أداء الأغشية :

المخطط التالي يبين العوامل المؤثرة على أداء أغشية التناضح العكسي



مخطط (8) العوامل المؤثرة على أداء أغشية التناضح العكسي

و بالتالي يمكننا أن نقول أنه من أجل رفع كفاءة عملية التناضح العكسي لابد من الاختيار الجيد للغشاء وفق المواصفات التالية :

1- لا بد أن يكون الغشاء ذو درجة رفض عالية للأمـــلاح .
2- لا بد من وجود فيض الماء المناسب لإتمام الانسياب.
3- لا بد أن يكون الغشاء سهل التشييد في وحدات الفرز الغشائي.
4- لا بد أن يتحمل الغشاء الضغط الواقع عليه .
5- لا بد أن تكون للغشاء متانة ميكانيكية جيـدة.
6- لا بد أن يعيش الغشاء لفترة مناسبـــــة.
7- لا بد أن يحتوي الغشاء على مدى تشغيلي كبير للأيونات الموجودة في الماء الخام والضغط ودرجة الحرارة ومقاومة التفاعلات الكيميائية والحيوية ويمكن أن يعمل في ظروف مختلفة.
8- لا بد أن يكون سعر الغشاء مناسب ورخيص.
9- لا بد أن تكون عملية تنظيف الغشاء سهلة .

بعد أن تعرفنا بشكل موسع على الأغشية و مواد صنعها و كيفية التصنيع المناسب لها و إعدادها لابد من أن ندخل إلى النواحي التطبيقية لها في أنظمة ووحدات التناضح العكسي .

9- الناحية التطبيقية :

من الناحية التطبيقية فإن الأغشية تكون موجودة ضمن أوعية للضغط في منظومة التناضح العكسي و يطلق على كل مجموعة أغشية متطبقة فوق بعضها باسم العنصر (Element) و يمكن لوعاء الضغط أن يحوي على عنصر أو أكثر من عناصر الأغشية و ذلك حسب كمية و نوعية مياه التغذية و نوعية و كمية

المياه المراد إنتاجها و حسب تصميم النظام أو الوحدة (استعادة أو بدون استعادة) و عدد المراحل المطلوبة لإنجاز التنقية المطلوبة حيث يضغط ماء التغذية على عناصر الأغشية الموجودة ضمن أوعية الضغط و عندما يمر جزء من الماء العذب عبر الغشاء تزداد ملوحة الماء المتبقي (**Brine**) و عليه فإن جزءاً من ماء التغذية الأكثر ملوحة يتم التخلص منه و بدون هذا التخلص فإن الازدياد المطرد لملوحة مياه التغذية – كما ذكرنا – سيتسبب في مشاكل كثيرة مثل زيادة الترسبات و زيادة الضغط عبر الأغشية (لزيادة الضغط الإسموزي مع زيادة الملوحة) و يسمى النافذ عبر الأغشية بالمنتج (**Permeate**) أما المتخلف فيسمى بالمحلول المطرود (**Brine**) .

10- الطبقات الملحقة مع الأغشية :

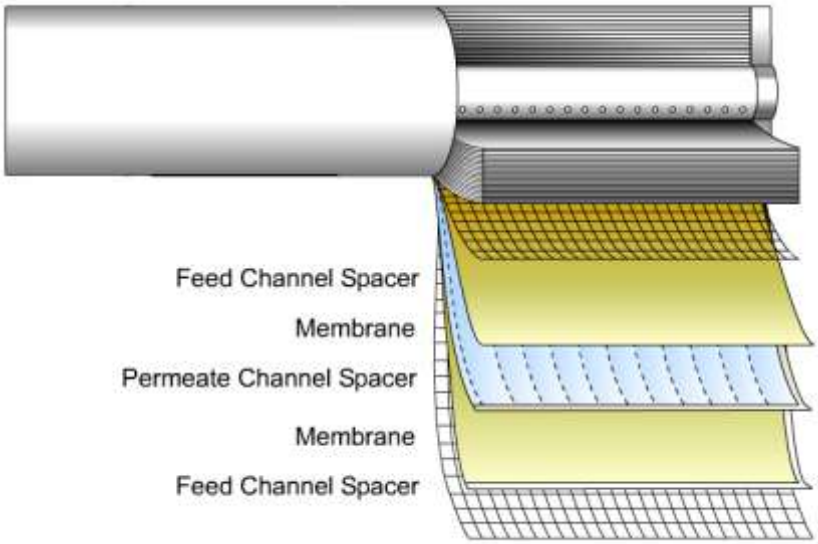
إن كل عنصر من الأغشية لا يستخدم فقط طبقات الأغشية بل لابد من وجود طبقات أخرى متطبقة فوق بعضها البعض بهندسة معينة و ذلك لتحديد مسار كل من المطرود ، النافذ ، و كذلك مسار التغذية و هذه الطبقات الموجودة في كل عنصر هي :

1- غشاء التناضح العكسي (**RO Membrane**) .

2- مجرى حيز أو قناة التغذية (**Feed Channel Spacer**) .

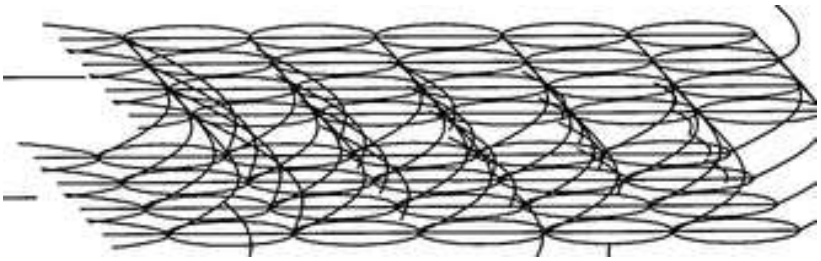
3- مجرى حيز أو قناة النافذ (**Permeate Channel Spacer**) .

الشكل (12) يوضح تطبق هذه الطبقات داخل وعاء الضغط أو العنصر .



شكل (12) الطبقات الملحقة مع الأغشية لكل عنصر

بالنسبة لحيز أو مجرى التغذية فهناك العديد من التصاميم المقترحة له فإما أن يكون مفتوحاً (**Open**) أو حاوياً على ثقوب متعددة و بأشكال مختلفة و كل نوع من هذه التصاميم له مواصفاته الخاصة و تأثيراته على نظام انتقال الكتلة عبر أغشية التناضح العكسي وعلى ضياعات الضغط المحورية و القطرية عبر العنصر و الشكل (13) يوضح حيز تغذية ذو فتحات بأبعاد تصميمية معينة .



شكل (13) حيز أو مجرى ماء التغذية ذو الفتحات

و لأخذ فكرة وافية عن كيفية تصميم حيز التغذية و ما تأثيره على عملية أو تشغيل نظام التناضح العكسي وعلى حركة السائل كان علينا القيام بالدراسة التالية .

10-1- ***تحليل حركة السوائل في أغشية التناضح العكسي مع هندسة لحيز مجرى التغذية :***

10-1-1- ملخص الدراسة:

أي عنصر من الممكن أن يطور ليصف انتقال الكتلة عبر أغشية التناضح العكسي ، إن هذه الدراسة مبنية على اعتبار أن ظروف التشغيل مثالية لتطبيقات التناضح العكسي المستخدمة في تحلية مياه البحر ، الماء المسوس و كذلك إعادة استعمال الماء و التي تهدف إلى التحسين لأبعد قدر ممكن من تصاميم حيز مجرى التغذية لأنابيب العناصر الملفوفة حلزونياً (**spiral wound element**) الافتراضية ، نتائج التمهيد تم اقتراحها من أجل مياه ذات قيم (**TDS**) منخفضة ، وقد تم الحصول على استهلاك طاقة أقل في أصغر حيز متاح لقياس نسب الارتفاع بالمقابل حيز أكبر لتحويل نسب الثخانة للعناصر إلى أدنى استهلاك للطاقة عند معالجة مياه ذات قيم عالية من الأملاح الذائبة الكلية ، و شكل حيز التغذية يملك تأثيراً بسيطاً على استقطاب التركيز للعنصر (**CP**) لكن بالمقابل فإنه يملك تأثيراً كبيراً على ضياعات الضغط المحورية وتنوع أشكال وتصاميم حيز التغذية .

(**Feed Channel Spacer**) للأغشية يتم تقديره حسب نوع مصدر المياه .

10-1-2- مقدمة توضيحية :

إن استقطاب التركيز على جانبي الغشاء عامل مهم وهو الذي يحدد أداء الفصل تقريباً في جميع عمليات الفلترة و الترشيح بوساطة الأغشية النصف نفوذة (**Mulder, 1991**) ، على سبيل المثال استقطاب الأملاح المرفوضة في التناضح العكسي (**RO**) ، الترشيح النانومتري (**NF**) و الفلترة الدقيقة (**UF**) و رفض هذه الأملاح يسبب استقطاباً للتركيز على السطح البيني للأغشية و الذي يعمل على زيادة الضغط التناضحي وراء الغشاء أي زيادة الضغط الخلفي و يزداد هذا التركيز باستمرار عملية الرفض للأملاح و زيادة تركيزها في المحلول المتخلف عن المعالجة ، بالإضافة إلى ذلك فإن استقطاب التركيز (**CP**) يثير كل أشكال ظواهر فساد و تلوث سطح الأغشية المتضمنة الترسبات و القشور المتشكلة من تراكم الأملاح المعدنية الغير أو الضعيفة الذوبان ، تشكل قطع من المواد الغروية ، تشكل مواد هلامية من خلال المواد العضوية ، و تشكل طبقات فيلمية رقيقة من البكتريا ، وبناء عليه فإن الوصف الدقيق لظاهرة استقطاب التركيز تعتبر عملية هامة و حاسمة جداً من أجل التصميم الصحيح للنظام و عمليات الفصل لأغشية التناضح العكسي الرافضة للأملاح .

10-1-3- المواد و الوسائل المستخدمة :

نموذج العنصر المحدود المطور بشكل متقدم تم تطبيقه لدراسة انتقال الكتلة في أنظمة الترشيح بأغشية ذات حيز مفتوح وأخرى ذات فراغات (Subramani et al., 2006) ، العنصر المحدود المتوفر تجارياً (FEMLAB 3.0, © COMSOL AB) كان يستخدم لبناء هندسة للنموذج و إنجاز تصاميم متعددة له ، هذا النموذج يستعمل معدلات ستوكس و الانتشار كما هو مبين في المعادلتين (10 – 12) على التوالي

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} + \frac{1}{3}\mu \nabla(\nabla \cdot \mathbf{v}) \quad (1)$$

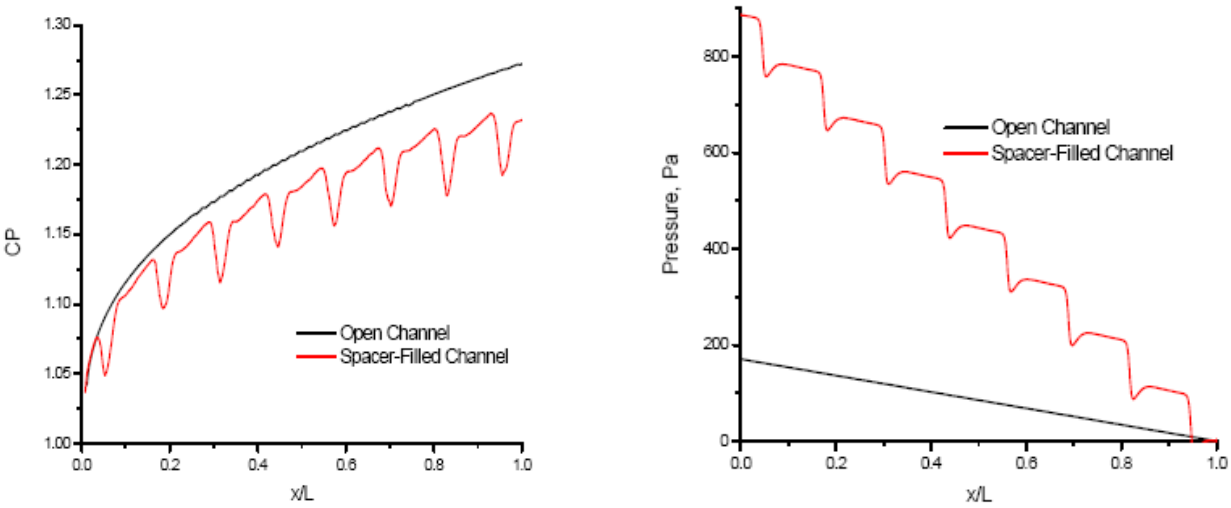
$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\nabla \cdot \left(-\mathbf{D} \cdot \nabla c + \mathbf{v}c + \frac{\mathbf{D} \cdot \mathbf{F}}{kT} c \right) \quad (3)$$

شروط التصميم تصور شروط تشغيل التناضح العكسي العملية و خصائص الغشاء في كل من مجاري التغذية ذات الفراغات و تلك المفتوحة ، و على الرغم من أن النموذج إلى حد ما بسيط و ثنائي البعد فإن النتائج قدمت فهماً عميقاً لاستكشاف معزز من أجل تصميم حيز التغذية و تحسين تصميم هذا الحيز إلى أبعد قدر ممكن و الذي سيكون من الممكن تقييمه بالاعتماد على انتقال الكتلة ، هذا التصميم أدى إلى خسارات أقل في الضغوط الاسموزية و المحورية وقد اعتبر أن تصميم الحيز الأفضل لمرور السائل هو من أجل شروط التشغيل المعطاة .

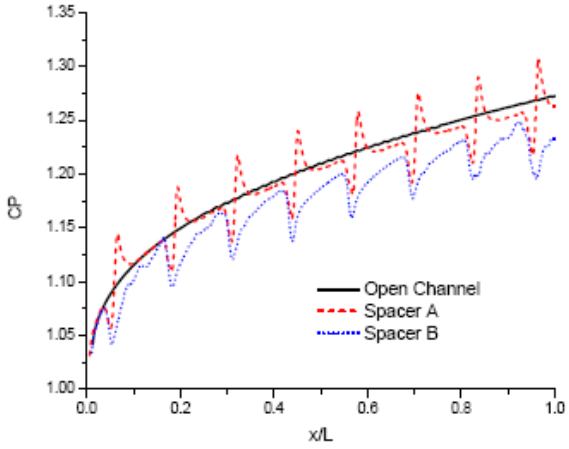
10-1-4- نتائج :

في المجاري المستقيمة المفتوحة كانت نتائج نموذج العنصر المعد متوافقة بشكل معقول مع النماذج الكلاسيكية القابلة للتحليل لتوقع هبوط الضغط ، أما بالنسبة للمجاري ذات الثقوب فإن خسارات ضغط الاحتكاك المحوري دائماً كانت أعلى من القنوات المفتوحة حيث أن استقطاب التركيز بشكل وسطي متناقص من أجل كل تصاميم الفراغات المعتبرة كما هو ظاهر في المخطط (9) ،المخطط(10) يوضح النتائج التمهيدية التي اقترحت أن تصميم الحيز المحقق يخلق منطقة حيث يكون فيها المزيج راكد قرب سطح الغشاء و هذا يؤدي إلى (حيز معزز باستقطاب التركيز) و الذي بشكل نظري يمكن أن يرفع نسبة القشور المتمركزة ، المواد الغروية ، المواد الهلامية ، و تشكيل طبقات من البكتريا على سطح الأغشية و بالنتيجة ينبغي أن نبدأ بالاستقصاء عن تصاميم جديدة لحيز التغذية و التي من الممكن أن تقودنا إلى التصميم النموذجي لحيز التغذية لنماذج الأغشية العملية و النتائج التي نحصل عليها من (تدفق المائع ، هبوط الضغط ، استقطاب التركيز ، و انتقال الكتلة) من الممكن أن تساعدنا في وصف تأثير تصميم حيز التغذية المعطى .

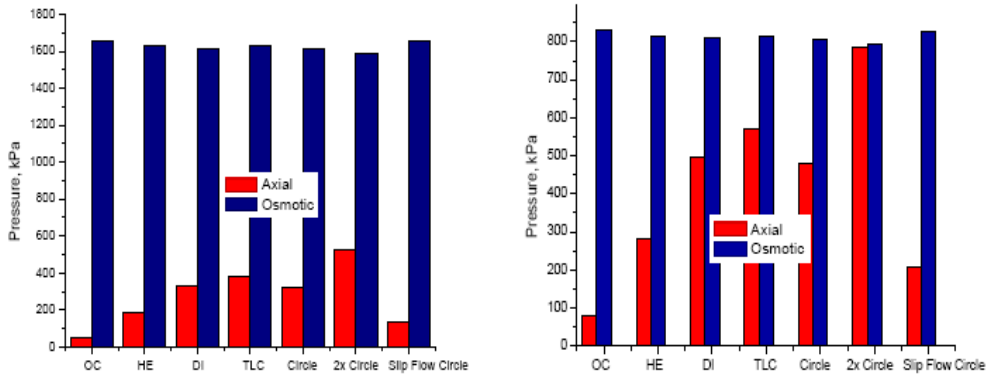


(a) (b)

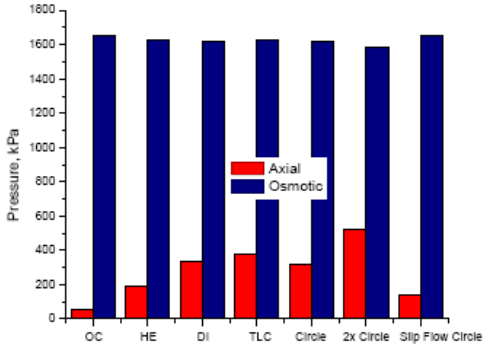
مخطط (9) مقارنة كل من (a) خسارة الضغط المحوري و (b) استقطاب التركيز بين مجاري التغذية المفتوحة و ذات الثقوب أو الفراغات



مخطط (10) دليل على منطقة الركود الظاهرة في الحيز A ، الحيز B يظهر تخفيض ثابت لاستقطاب التركيز



(a) (b)



(c)

مخطط (11) توقف الخسائر في الضغوط الاسموزية و المحورية من أجل تطبيقات (a) SWRO ، (b) RWRO ، (c) BWRO المستعملة لأشكال متنوعة من التصاميم و المجاري

إن هذه النتائج تقترح أن تأثير استقطاب التركيز على الضغط الاسموزي عبر غشاء التناضح العكسي هو السبب الرئيسي للخسارة في الطاقة في تطبيقات أنظمة التناضح العكسي المستخدمة لمعالجة مياه البحر (SWRO) كما في المخطط (a - 11) ، بينما خسائر الاحتكاك المحورية تسبب النسبة الأكبر من فقدان الطاقة في تطبيقات أنظمة التناضح العكسي المستخدمة لإعادة استعمال المياه (RWRO) كما هو واضح من المخطط (b - 11) ، أما من أجل تطبيقات التناضح العكسي المستعملة لمعالجة المياه المسوس (BWRO) فكما هو واضح من المخطط (c - 11) فإن توازن الخسائر في الضغوط الاسموزية و الاحتكاك معتمدة على الضغط الاسموزي لماء التغذية ، مواصفات و خصائص الغشاء ، و كذلك شروط التشغيل .

10-1-5- الاستنتاجات :

تقترح النتائج التي تم التوصل إليها أن تحسين حجم الحيز المتاح المستند على نوعية ماء التغذية هو معيار حاسم من أجل تخفيض استهلاك الطاقة ، و شكل الحيز له بعض التأثير على انتقال الكتلة لكن الأشكال غير الكروية تنتج خسائر ضغط كبيرة ، تخفيض استقطاب التركيز ربما يقلل من عائدات الخسائر في الضغط الاسموزي ، و على أية حال فإن انقاص استقطاب التركيز ذو تأثير هام في تخفيض القشور و الترسبات و الملوثات الكامنة في التغذية . الجيل الجديد من تصاميم حيز التغذية ربما يتم عمله باستعمال أغطية مضغوطة (telescoping) على السطوح البينية للأغشية لأنها بشكل ديناميكي تقلل من استقطاب التركيز إلى حد كبير .

مما تقدم نلاحظ تأثير تصميم المجرى على الضغوط و التراكيز المختلفة لذا لابد دائماً من إجراء دراسة تتعلق بهذا التصميم لتحسين كفاءة العمل .

11- معايير تصميم الأغشية :

11-1- معلومات تصميمية :

إن العامل الذي له التأثير الأعظم على تصميم نظام الغشاء هو ميل ماء التغذية لإفساد هذا الغشاء ، إن إفساد الغشاء سببه الجزيئات و المواد الصمغية الموجودة في مياه التغذية والتي تتركز على سطح الغشاء، إن قيمة دليل كثافة الطمي (SDI) لماء التغذية المعالج ترتبط بشكل جيد بالكمية الموجودة للمواد المسببة للتلف في مياه التغذية ، و تركيز هذه المواد على سطح الغشاء يزداد بزيادة تدفق الماء النافذ

عبر الغشاء (معدل تدفق النافذ لواحدة السطح من الغشاء) و بزيادة مقدار الاستعادة لعنصر الغشاء (النسبة بين معدل تدفق النافذ لمعدل تدفق ماء التغذية لكل وحدة غشاء) ، و النظام ذو معدلات التدفق الكبيرة للمياه النافذة من المحتمل أن يواجه معدلات ضرر أعلى و أكبر و عمليات تنظيف كيميائي متكررة للنظام بشكل أكبر .

وأي نظام للأغشية يكون محدداً بالاستعادة العظمى المطلوبة أو المسموحة (معدل التدفق النافذ الأعظمي ، معدل تدفق المحلول المركز الأصغري، و معدل تدفق ماء التغذية الأعظمي عبر عنصر الغشاء و ميل ماء التغذية لإفساد الأغشية بشكل أكبر) يحدد بشكل دقيق من خلال هذه البارامترات السابقة و التي يتم تحديدها عادة بالاختبار الطويل للأغشية .

إن التدفق الوسطي للنظام الكامل ، و بمعنى آخر معدل تدفق الماء النافذ يتعلق بمنطقة الغشاء الفعلية الكلية للنظام أو العدد المميز للتصميم ، و تدفق النظام هو مقدار نافع ومفيد لتخمين العدد المطلوب من عناصر الأغشية بسرعة و ذلك لأي مشروع جديد . فالأنظمة التي تعمل بمياه تغذية ذات نوعية عالية مصممة نموذجياً على معدلات تدفق عالية بينما الأنظمة التي تعمل بمياه تغذية رديئة مصممة نموذجياً على أساس معدلات تدفق منخفضة و على الرغم من ذلك حتى في نفس نوعية المياه هناك أنظمة مصممة على أساس قيم تدفق مرتفعة و منخفضة و الاعتماد الأساسي للنظام يكون على أساس :

1- إما تقليل نفقات رأس المال .

2- أو تقليل نفقة العمليات على المدى البعيد .

و مجموع قيم الجريان تعطى في الجدول الذي في الأسفل و الذي يعطي أرقام نموذجية لأغلبية الأنظمة المستعملة و لكن هذه الأرقام ليس بالضرورة أن تكون حدوداً يعتمد عليها دائماً .

إن عمليات (RO/NF) المصممة وفقاً لدليل التصميم الخاص لهذا النظام و المقرونة بنظام ما قبل معالجة جيد سوف تعطي أداءً مستقراً و يكفي القيام بتنظيفها أربع مرات في السنة فقط عند التطبيقات القياسية لها و تجاوز الحدود الموصى بها من قبل المصنع أو الشركة قد يؤدي إلى الحاجة لتنظيفها أكثر من ذلك ، و إلى استطاعة منخفضة ، زيادة الضغط الطبق على الغشاء ، و كذلك إمكانية تلف الغشاء و تقليل عمره و أي خرق للحدود الموضحة أدناه (نوع معين من الأغشية) و لفترة قصيرة قد يكون مقبولاً طالما أن الحدود طبيعية و طالما أن هبوط الضغط الأعظمي و ضغط التغذية الأعظمي لا يزددان .

الجدول التالي يوضح بعض التعليمات الموصى بها لأنظمة (RO) ذات عناصر أغشية بقطر8 إنش لعناصر أغشية FilmTec و ذلك تبعاً لنوع ماء التغذية :

جدول (6) دلائل التصميم لعناصر أغشية FilmTec ذات قطر 8 انش المستخدمة في تطبيقات معالجة المياه

Feed source		RO Permeate	Well Water	Surface Supply		Wastewater (Filtered Municipal Effluent)		Seawater	
						MF[1]	Conventional	Well or MF[1]	Open intake
Feed silt density index		SDI < 1	SDI < 3	SDI < 3	SDI < 5	SDI < 3	SDI < 5	SDI < 3	SDI < 5
Average system flux	gfd	21-25	16-20	13-17	12-16	10-14	8-12	8-12	7-10
	l/m²h	36-43	27-34	22-29	20-27	17-24	14-20	13-20	11-17
Maximum element recovery %		30	19	17	15	14	12	15	13

Element type	Minimum concentrate flow rate[2], gpm (m^3/h)							
BW elements (365 ft^2)	10 (2.3)	13 (3.0)	13 (3.0)	15 (3.4)	16 (3.6)	18 (4.1)		
BW elements (400 ft^2 and 440 ft^2)	10 (2.3)	13 (3.0)	13 (3.0)	15 (3.4)	18 (4.1)	20 (4.6)		
NF elements	10 (2.3)	13 (3.0)	13 (3.0)	15 (3.4)	18 (4.1)	18 (4.1)		
Full-fit elements	25 (5.7)	25 (5.7)	25 (5.7)	25 (5.7)	25 (5.7)	25 (5.7)		
SW elements	10 (2.3)	13 (3.0)	13 (3.0)	15 (3.4)	16 (3.6)	18 (4.1)	13 (3.0)	15 (3.4)

Active Membrane Area	Maximum permeate flow rate, gpd (m^3/d)							
320 ft^2 elements	9,000 (34)	7,500 (28)	6,500 (25)	5,900 (22)	5,300 (20)	4,700 (18)	6,700 (25)	6,100 (23)
365 ft^2 elements	10,000 (38)	8,300 (31)	7,200 (27)	6,500 (25)	5,900 (22)	5,200 (20)		
380 ft^2 elements	10,600 (40)	8,600 (33)	7,500 (28)	6,800 (26)	5,900 (22)	5,200 (20)	7,900 (30)	7,200 (27)
390 ft^2 elements	10,600 (40)	8,900 (34)	7,700 (29)	7,000 (26)	6,300 (24)	5,500 (21)		

Element type	Active area ft^2 (m^2)	Maximum feed flow rate[2], gpm (m^3/h)							
BW elements	365 (33.9)	65 (15)	65 (15)	63 (14)	58 (13)	52 (12)	52 (12)		
BW or NF elements	400 (37.2)	75 (17)	75 (17)	73 (17)	67 (15)	61 (14)	61 (14)		
BW elements	440 (40.9)	75 (17)	75 (17)	73 (17)	67 (15)	61 (14)	61 (14)		
Full-fit elements	390 (36.2)	85 (19)	75 (17)	73 (17)	67 (15)	61 (14)	61 (14)		
SW elements	320 (29.7)	65 (15)	65 (15)	63 (14)	58 (13)	52 (12)	52 (12)	63 (14)	56 (13)
SW elements	380 (35.3)	72 (16)	72 (16)	70 (16)	64 (15)	58 (13)	58 (13)	70 (16)	62 (14)

و يظهر الجدول التالي المعلومات التصميمية الموصى بها منا اجل أنظمة (RO) ذات عناصر أغشية (2.5) إنش و المستخدمة في التطبيقات الصناعية الخفيفة و الأنظمة الصغير لمعالجة مياه البحر

جدول (7) دلائل التصميم لأغشية FilmTec ذات القطر 2.5 انش المستخدمة في التطبيقات التجارية الخفيفة و أنظمة معالجة مياه البحر الصغيرة

Feed source	RO permeate	Well water	Softened Municipal	Surface	Wastewater (filtered tertiary effluent)		Seawater	
					MF[1]	Conventional	Well or MF[1]	Open intake
Feed silt density index	SDI < 1	SDI < 3	SDI < 3	SDI < 5	SDI < 3	SDI < 5	SDI < 3	SDI < 5
Typical target flux, gfd (l/m^2h)	22 (37)	18 (30)	16 (27)	14 (24)	13 (22)	11 (19)	13 (22)	11 (19)
Maximum element recovery %	30	19	17	15	14	12	15	13

Element diameter	Maximum permeate flow rate, gpd (m^3/d)							
2.5-inch	800 (3.0)	700 (2.6)	600 (2.3)	500 (1.9)	500 (1.9)	400 (1.5)	700 (2.6)	600 (2.3)
4.0-inch	2,300 (8.7)	1,900 (7.2)	1,700 (6.4)	1,500 (5.7)	1,400 (5.3)	1,200 (4.5)	1,800 (6.8)	1,500 (5.7)

Element type	Active area ft² (m²)	Maximum feed flow rate U.S. gpm (m³/h)	Maximum pressure drop per element psig (bar)	Maximum feed pressure psig (bar)
Tape-wrapped 2540	28 (2.6)	6 (1.4)	13 (0.9)	600 (41)
Fiberglased 2540	28 (2.6)	6 (1.4)	15 (1.0)	600 (41)
Seawater 2540	29 (2.7)	6 (1.4)	13 (0.9)	1,000 (69)
Tape-wrapped 4040	87 (8.1)	14 (3.2)	13 (0.9)	600 (41)
TW30-4040	82 (7.6)	14 (3.2)	13 (0.9)	600 (41)
Fiberglassed 4040	82 (7.6)	16 (3.6)	15 (1.0)	600 (41)
SW Fiberglassed 4040	80 (7.4)	16 (3.6)	15 (1.0)	1,000 (69)
Full-fit 4040	85 (7.9)	18 (4.1)	15 (1.0)	600 (41)
Full-fit 4040	6 (1.4)	6 (1.4) 6 (1.4)	6 (1.4) 6 (1.4) 6 (1.4)	NA NA

و الجدول التالي يوضح الأنظمة المستخدمة في التطبيقات التجارية الخفيفة و هي تحوي بشكل نموذجي من (1-6) عناصر و التي بشكل منتظم تستبدل أو تنظف كل نصف سنة أو سنة أو تفقد أداءها ، عمر العنصر المتوقع ليس أكثر من ثلاث سنوات و هو ذو كلف بسيطة للأنظمة التي تعمل بشكل متقطع

جدول (9) الأغشية المستخدمة للتطبيقات التجارية الخفيفة من FilmTec Membranes

Feed source	RO permeate	Softened Municipal	Well water	Surface or Municipal Water
Feed silt density index	SDI < 1	SDI < 3	SDI < 3	SDI < 5
Typical target flux, gfd (l/m²h)	30 (51)	30 (51)	25 (42)	20 (34)
Maximum element recovery %	30	30	25	20

Maximum permeate flow rate, gpd (m³/d)				
2.5-inch diameter	1,100 (4.2)	1,100 (4.2)	900 (3.4)	700 (2.7)
4.0-inch diameter	3,100 (11.7)	3,100 (11.7)	2,600 (9.8)	2,100 (7.9)

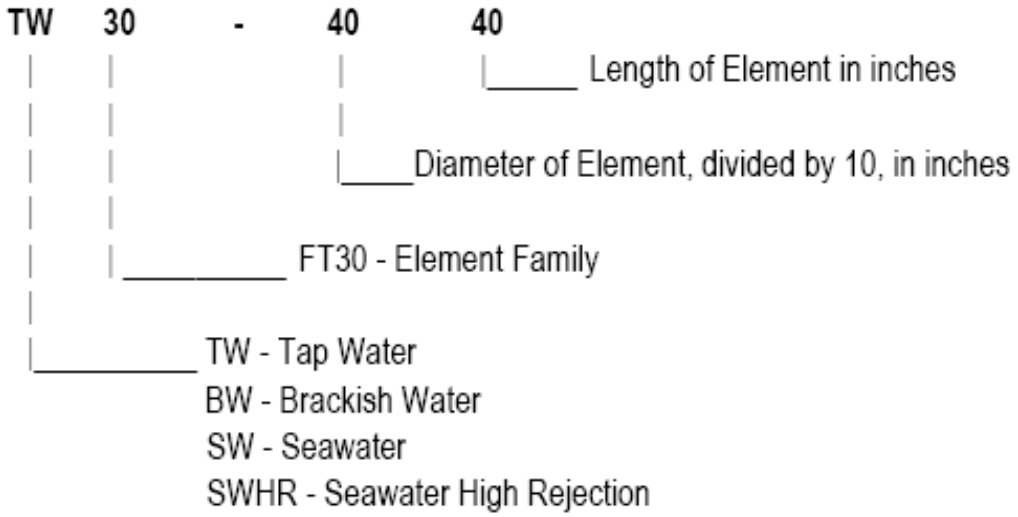
Element type	Active area ft² (m²)	Maximum feed flow rate U.S. gpm (m³/h)	Maximum pressure drop per element[1] psig (bar)	Maximum feed pressure psig (bar)
Tape-wrapped 2540	28 (2.6)	6 (1.4)	13 (0.9)	600 (41)
Fiberglased 2540	28 (2.6)	6 (1.4)	15 (1.0)	600 (41)
Seawater 2540	29 (2.7)	6 (1.4)	13 (0.9)	1,000 (69)
Tape-wrapped 4040	87 (8.1)	14 (3.2)	13 (0.9)	600 (41)
TW30-4040	82 (7.6)	14 (3.2)	13 (0.9)	600 (41)
Fiberglassed 4040	82 (7.6)	16 (3.6)	15 (1.0)	600 (41)
SW Fiberglassed 4040	80 (7.4)	16 (3.6)	15 (1.0)	1,000 (69)

ملاحظة : معايير الأغشية السابقة وضعت لاستخدامها في برنامج التصميم (ROSA) الذي سنأتي لذكره فيما بعد و هذه المعايير يجب أن يتم الالتزام بها لضمان التصميم الصحيح لمنظومة التناضح العكسي .

11-2- خصائص وتسمية العناصر :

بالنسبة لعناصر أغشية FilmTec فإنها تستعمل في مجال واسع من التطبيقات حيث يتم وصف نوع الغشاء (ملفوف خارجي – الحجم و الأداء) و يعطى لكل غشاء أسماء تعريفية خاصة به ، فعلى سبيل المثال العناصر ذات القطر الأصغر من 8 inches تعرف وفقاً للشكل التالي :

شكل (14) الأسماء التعريفية للعناصر ذات القطر الأصغر من 8 انش



حيث أن الجزء الأول للاسم يشير إلى الغشاء وهو عبارة عن استعمال أو وصف لنموذج معين من الأغشية فمثلاً : BW30 هو ماء مسوس و FT30 هو غشاء نسيجي يستعمل للماء المسوس ، أما الجزء الثاني للاسم فهو يشير إلى حجم العنصر مثلاً 2540 هو عنصر ذو قطر2.5 و طول 40 (إنش) و لكل عنصر كما ذكرنا أسماء تعريفية خاصة به كما في الشكل السابق .

حيث أن عناصر 8 inches هي دائماً ذات قطر (8 inches) و طول (40 inches) وهي تسمى وفقاً لمنطقة الغشاء الفعلية النشطة بالقدم المربع ، على سبيل المثال (BW 30-400) عنصر ذو منطقة غشاء نشيطة بمساحة قدرها (400 ft2)، كما أن بعض العناصر لها امتداد لاسمها و مثال على ذلك : FF أو FR هذا يصف مقاومة عنصر خاص أو معايير غشاء :

حيث : FF : مقاومة الضرر .

FULLFIT : FR

و أنواع الأغشية التالية مستعملة في عناصر FilmTec للمساعدة في فهم كل نوع من أنواع الأغشية و للتصميم الصحيح للنظام كمثال نعتمد عليه :

1- NF 270 : غشاء نانومتري ذو إنتاجية عالية لإزالة المواد العضوية مع مرور متوسط للأملاح و العسرة .

2- NF 200 : غشاء نانومتري ذو معدل رفض عالي للكربون العضوي مع مرور متوسط للكالسيوم .

3- NF 90 : غشاء نانومتري بمعدل إزالة للأملاح حوالي 90% ، إزالة عالية للحديد ، المبيدات الحشرية ، مبيدات الأعشاب ، و الكربون العضوي TOC .

4- NF : غشاء نانومتري يستخدم في التطبيقات غير المائية .

5- TW 30 : غشاء نسيجي للماء المسوس ذو معدل رفض عالي للأملاح يستعمل بشكل نموذجي لمياه الصنابير في نظام التناضح العكسي .

6- TW 30LP : يستعمل للضغط المنخفض وهو مشتق من الغشاء TW30

7- BW 30 : غشاء ذو معدل رفض عالي للأملاح يستخدم للماء المسوس بالتناضح العكسي .

8- RO : غشاء تناضح عكسي يستعمل للتطبيقات الصحية .

9- HSRO : غشاء تناضح عكسي قابل للتنظيف حرارياً .

10- BW 30LE : غشاء ذو طاقة منخفصة نسخة غشاء BW30 .

11- SG 30 : غشاء FT30 شبه موصول لنظام التناضح العكسي الذي يعطي ماء نقياً .

12- SG 30LE : طاقة منخفضة نسخة الغشاء SG30 .

13- XLE : غشاء تناضح عكسي ذو طاقة منخفضة جداً و ضغط منخفض لمعاملة الماء المسوس .

14- SW 30 : غشاء تناضح عكسي يستخدم بشكل نموذجي لمعالجة ماء البحر ذي الملوحة المنخفضة أو ماء البحر البارد و كذلك الملوحة العالية للماء المسوس .

15- SW 30HR : غشاء تناضح عكسي لماء البحر ذو معدل رفض عالي للأملاح و يستخدم بشكل نموذجي من اجل إزالة الأملاح من خلال الاجتياز أو المرور الوحيد لماء البحر .

16- SW30HRLE : غشاء تناضح عكسي ذو معدل رفض عالي للأملاح و يستخدم بشكل نموذجي من أجل إزالة الأملاح من مياه البحر تحت طاقة منخفضة .

17- SW30XLE : غشاء لتحلية ماء البحر باستهلاك طاقة منخفض جداً .

إن الطول القياسي لعنصر الغشاء هو 40 إنش أي (1016 mm) ، أما بالنسبة للأنظمة الصغيرة و المركزة فهناك عناصر أقصر و أصغر مثل 14 inches (356 mm) و 21 inches (533 mm) .

عناصر نظام التناضح العكسي من أجل مياه الشرب المنزلية تبلغ حوالي (12 inches) كطول و (1.8 inches) كقطر لتناسب الوعاء الضئيل ذو القطر (2 inches) عادة .

و القطر القياسي للعناصر هنا هو inches (8- 4- 2.5) (20mm- 99- 61) و ذلك لتناسب أوعية الضغط الموضوعة ضمنها ذات الأقطار(8 inches- 4- 2.5) على التوالي .

عناصر الأغشية هذه يمكن أن تطوق من الخارج أو تدعم بالعديد من المواد مثل : الفيبركلاس (ألياف زجاجية) أو شبكة من البولي بروبلين .

بالنسبة للألياف الزجاجية فإنها تضيف صلابة و قوة للعنصر في حالة الظروف القاسية و الصعبة .

و الجدول التالي يعطي مواصفات للعناصر المذكورة و المعرفة سابقاً مثل : الضغط الأعظمي ، التدفق ، القطر .....

جدول (10) نماذج عناصر FilmTec

Element type	Diameter (inch)	Permeate flow[1] at standard test conditions (GPD)	(l/h)	Maximum operating pressure (bar)	(PSI)
NF270	2.5, 4, 8	850 - 14,700	134 - 2,300	41	600
NF200	2.5, 4, 8	460 - 8,000	73 - 1,260	41	600
NF90	2.5, 4, 8	525 - 10,300	83 - 1,620	41	600
TW30	1.8	24 - 100	3.8 - 16	21	300
TW30, TW30HP	2, 2.5, 4	100 - 3,200	16 - 500	41	600
BW30	2.5, 4, 8	750 - 10,500	120 - 1,660	41	600
BW30LE	4, 8	2,000 - 11,500	320 - 1,830	41	600
XLE	2.5, 4, 8	330 - 13,000	52 - 2,040	41	600
SW30	2.5, 4	150 - 1,950	24 - 300	69	1,000
SW30HR	8	6,000	950	84	1,200
SW30HRLE	8	7,500	1,200	84	1,200
SW30XLE	8	9,000	1,400	69	1,200

و تغير شروط اختبار العنصر يعتمد على نوع الغشاء المستعمل الجدول التالي يعطي مثال لتغير شروط الاختبار تبعاً لنوع العنصر المستعمل :

جدول (11) شروط اختبار معايير عناصر FilmTec

Element type	Feedwater	Temperature	Pressure psi	Pressure bar	pH	Recovery	Test time
NF200 NF270 NF90	$MgSO_4$, 2,000 ppm	77°F (25°C)	70	4.8	8	15%	20 min.
NF200 NF270	$CaCl_2$, 500 ppm	77°F (25°C)	70	4.8	8	15%	20 min.
NF90	NaCl, 2,000 ppm	77°F (25°C)	70	4.8	8	15%	20 min.
LPTW	Tapwater, 250 ppm	77°F (25°C)	50	3.45	8	15%	20 min.
BW30LE	NaCl, 2,000 ppm	77°F (25°C)	150	10.3	8	15%	20 min.
XLE	NaCl, 500 ppm	77°F (25°C)	100	6.9	8	15%	20 min.
TW30 BW30	NaCl, 2,000 ppm	77°F (25°C)	225	15.5	8	15%	20 min.
SW30	NaCl, 32,000 ppm	77°F (25°C)	800	55	8	10%†	20 min.
SW30HR	NaCl, 32,000 ppm	77°F (25°C)	800	55	8	8%	20 min.

† 8% for 2.5 inch and 4 inch diameter elements.

ملاحظة : ينبغي الأخذ بعين الاعتبار أن المعلومات المذكورة أعلاه تقدم مثالاً لأنواع معينة من الأغشية (و هي الأغشية المركبة ذات الطبقة الفيلمية الرقيقة و الملفوفة حلزونياً) لنعطي مثالاً عن الأغشية و لنتعرف على أدائها كونه يوجد العديد من أنواع الأغشية كما ذكرنا سابقاً و كون هناك العديد من الشركات

و لكل شركة أغشيتها الخاصة و تجاربها الخاصة لذا لا ينبغي أخذ المعلومات السابقة بعين الاعتبار إلا عند استخدام هذه الأغشية بحد ذاتها و الاعتماد عليها في التصميم .

و اختيار نوع الغشاءيعتمد على مجموعة من العوامل :

1- نوعية المياه المراد معالجتها .

2- نوعية المياه المراد إنتاجها .

3- كمية المياه المراد إنتاجها.

4- استهلاك الطاقة .

و هذا بشكل عام و لأي نوع من أنواع الأغشية المستخدمة و لابد من إجراء الاختبارات اللازمة للأغشية لمعرفة ما يمكنها تحمله و ماهي التدفقات اللازمة .

11-3-اختبار الأغشية :

لتحلية مياه ذات أصل و تركيب معروف ، فإن أداء النظام يمكن أن يعرف و مع الضبط الكافي باستعمال برنامج (ROSA) و في العديد من حالات الاختبار يوصى بدعم تصميم النظام الملائم و هذا يتضمن ما يلي :

1- نوعية ماء تغذية غير معروفة .

2- اختلاف غير معروف بنوعية ماء التغذية .

3- التطبيقات الخاصة أو الجديدة مثل تدفق مياه صرف أو عمليات أخرى .

4- متطلبات ماء نافذ ذو نوعية خاصة .

5- استعادات عالية جداً للنظام (أكبر من 80 %) .

6- الوحدات الكبيرة (أكبر من 13250 m3/d) .

و يجرب الاختبار نموذجياً بمستويات لاحقة مختلفة . إن الهدف من إجراء الاختبار هو الاختيار الملائم للغشاء لمعرفة المطلوب و الحصول على فكرة عالية عن التدفقات (gfd أو l/m2-h) و خصائص الرفض للغشاء . حيث أن قطعة صغيرة من الغشاء المنبسط يمكن وضعها أو حملها في (خلية) و تكشف لاستعمال محلول الاختبار باستخدام جهاز الجريان المتقاطع (cross- flow) و هذه الطريقة سريعة ، رخيصة ، و تتطلب فقط كميات صغيرة من محلول الاختبار و على أية حال فإن هذا الاختبار لا يستطيع توفير البيانات الكافية لفترة طويلة أو يعطي فكرة عن التأثيرات البعيدة المدى كما أنه لا يعطي معلومات عن آثار الضرر الذي يلحق من جراء هذا الاختبار .

أما بالنسبة للمشاكل التي يمكن أن تحدث للأغشية ، و إجراءات التنظيف لها ، و الربط الملائم لعناصر الأغشية ، وسبل تلافي التسربات في الوصلات و موانع التسرب فسنعرضها في الباب السادس (التشغيل و الصيانة) .

بعد أن تعرفنا على الأمور المتعلقة بأغشية التناضح العكسي نبدأ بالدخول إلى منظومة التناضح العكسي للتعرف على كيفية تشغيلها الأمثل و الأنواع المختلفة للتصاميم و المعادلات الأساسية لها .