

Membraantechnologie

1 Inleiding

Membraantechnologie heeft zich in de afgelopen decennia ontwikkeld tot een volwaardige scheidingstechnologie. De kracht van membraantechnologie ligt in het werken zonder toevoeging van additionele stoffen, met een relatief lage energiebehoefte en met een goed regelbare en op te schalen procesvoering.

Membraantechnologie is een verzamelnaam voor diverse, in karakter sterk verschillende scheidingsprocessen. Deze scheidingsprocessen hebben als gemene deler dat in alle gevallen het membraan centraal staat.

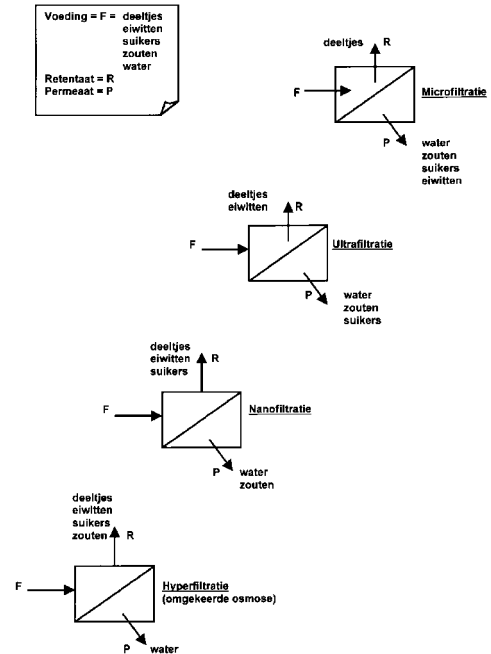
Na een beschrijving van de beschikbare membraanprocessen en hun toepassingen, zullen de membranen belicht worden en komen tenslotte de mogelijkheden tot het verhogen van de energie-efficiency door toepassing van membranen aan de orde.

2 Membraanprocessen

Bij beschouwing van de diverse beschikbare membraanprocessen valt vooral op het onderling grote verschil van de technologische ontwikkelingsfasen. Deze processen zijn:

- dialyse. Dialyse is de oudste membraantechniek en qua marktomvang nog veruit het grootst. Scheiding vindt plaats door diffusie van bepaalde componenten door het membraan onder invloed van een concentratieverschil. Dialyse wordt vooral toegepast in de medische sector onder andere voor nierdialyse. Een voor de chemische industrie belangrijke variant is diffusie-dialyse, waarbij ion-selectieve membranen worden gebruikt voor terugwinnen van zuur of loog;
- drukgedreven membraanfiltratietechnieken: microfiltratie, ultrafiltratie, nanofiltratie en omgekeerde osmose (hyperfiltratie). Deze worden al op zeer grote schaal toegepast, elke techniek met zijn eigen, specifieke toepassingen. Scheiding vindt plaats op basis van afmetingen van deeltjes of moleculen. Onder invloed van een drukverschil wordt water of oplosmiddel door de poriën van het membraan geperst. Deze technieken verschillen hoofdzakelijk door de afmetingen van de poriën van de toegepaste membranen. De specifieke scheidingsbehoefte, afhankelijk van afmetingen en aard van de te scheiden deeltjes en/of moleculen, bepaalt welk proces het beste kan worden ingezet. Zie *figuur 1*.

Concentreren van (proces)stromen en/of scheiden in specifieke bestanddelen is hierbij het doel. In de milieutechnologie is het aantal toepassingen nog groeiende. Een belangrijke groeimarkt is de bereiding van drinkwater, zowel uit zee- als uit oppervlaktewater. Bereiding

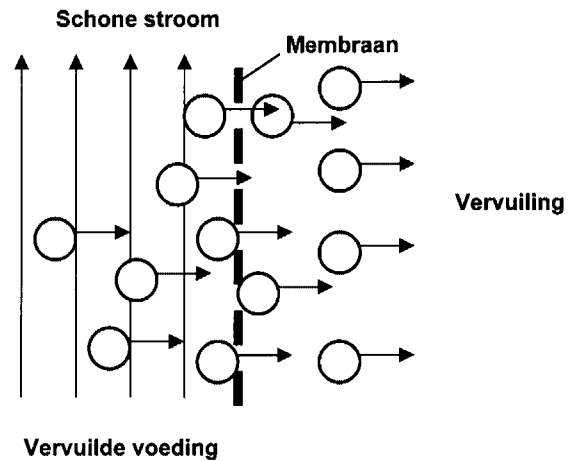


Figuur 1 Membraanfiltratieprocessen

- en recirculatie van proceswater is sterk in opkomst. Voor membraanfiltratieprocessen in organische media zijn de laatste jaren ook verschillende membranen beschikbaar, zowel op basis van polymere materialen als op basis van keramiek;
- elektro - membraantechnieken. Hiertoe behoren onder meer membraanelektrolyse en elektro-dialyse. Als enige membraanprocessen hebben deze technieken een elektrisch potentiaalverschil als drijvende kracht. Onder invloed van dit potentiaalverschil kunnen ionen of geladen moleculen al dan niet door positief of negatief geladen membranen worden getransporteerd. De hieraan verbonden stroomkosten zijn evenredig met de hoeveelheid te verwijderen of te scheiden stof. Daar staat tegenover dat tevens een zeer bijzondere selectiviteit bereikt kan worden:
 - bij membraanelektrolyse wordt conventionele elektrolyse gecombineerd met een scheidingsproces op basis van membranen. Door de ontwikkeling van speciale kationselectieve membranen heeft dit proces een belangrijke plaats ingenomen in het chlooralkaliproces voor de bereiding van chloor en natronloog uit natriumchloride;
 - elektro-dialyse sluit aan op het membraanelektrolyseproces. Door gebruik te maken van zowel kation- als ook anionselectieve membranen kunnen zeer interessante toepassingen ontwikkeld worden. Sinds de ontwikkeling van zogenaamde bipolaire membranen is de bruikbaarheid van deze systemen ver

der verbeterd. In bipolaire membranen treedt splitting van water op in H^+ en OH^- . De mogelijkheden van terugwinning van zuur en loog uit zoutstromen zijn door de toepassing van bipolaire membranen sterk verbeterd;

- gasscheidingsmembranen, pervaporatie en damppermeatie zijn op dezelfde scheidingsprincipes gebaseerd ('oplos-diffusie' mechanisme in polymere membranen), doch verschillen in de te behandelen stromen en in te scheiden componenten:
 - bij gasscheidingsmembranen wordt de voeding als gas aangeboden. Door verschil in snelheid van permeatie door het membraan van de verschillende gasvormige componenten kan een scheiding worden bereikt. Waterdamp gedraagt zich daarbij als zeer 'snel' gas.
 - Gasscheidingsmembranen werden aanvankelijk vooral ingezet bij terugwinning van waterstof in diverse chemische processen. In de USA worden deze membranen veel ingezet voor afscheiding en recirculatie van CO_2 . In de milieutechnologie zijn diverse toepassingen denkbaar, maar nog niet tot ontwikkeling gekomen. Combinatie van gasscheidingsmembranen met droogprocessen zou eveneens tot een aantrekkelijke en energie-efficiënte procesvoering kunnen leiden;
 - pervaporatie is een techniek waarbij vanuit een vloeistofmengsel selectief bepaalde componenten door een membraan worden verdampt. De selectiviteit wordt bereikt doordat een bepaalde component sneller door het membraan permeëert dan andere. De selectiviteit van een pervaporatiemembraan kan geheel anders zijn dan van het vloeistof-dampevenwicht bij destillatie, waardoor het mogelijk wordt rechtstreeks azeotropen te breken zonder toevoeging van hulpstoffen. Aanvankelijk waren alleen polymere pervaporatiemembranen beschikbaar voor procesvoering bij temperaturen beneden $100^\circ C$. Recent zijn echter ook keramische membranen beschikbaar gekomen, waardoor nu ook bij hogere temperaturen kan worden geopereerd. Een nadeel van pervaporatie kan zijn dat de verdampingswarmte continu moet worden toegevoerd om afkoeling aan het membraan te voorkomen;
 - damppermeatie is op hoofdlijnen vergelijkbaar met pervaporatie, met dit verschil dat de voeding hier in oververhitte dampvorm wordt aangevoerd. Hierdoor vindt aan het membraan geen afkoeling door verdamping plaats. Het scheidingsmechanisme en de toepassingsmogelijkheden zijn gelijk aan die van pervaporatie. Zowel pervaporatie als damppermeatie kunnen uitstekend gecombineerd worden met destillatie tot een hybrideprocesvoering;
- bij membraancontactoren is de functie van het membraan geheel verschillend van bovenbeschreven processen. Het membraan heeft hierin geen scheidende functie, doch wordt gebruikt om verschillende stromen gescheiden te houden en tegelijkertijd oppervlak voor



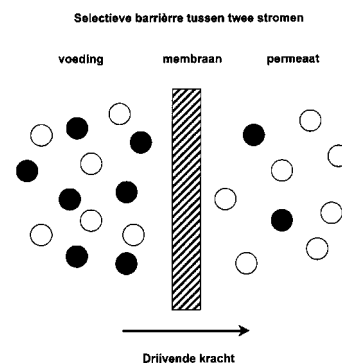
Figuur 2 Membraanstofoverdrachtsprocessen

stofoverdracht tussen deze stromen aan te bieden. Onder deze groep (zie *figuur 2*) vallen pertractie en membraan-gasabsorptie:

- bij pertractie vindt op deze wijze stofoverdracht tussen twee vloeistoffasen plaats. Pertractie kan vergeleken worden met vloeistof-vloeistofextractie door een membraan. Voordeel boven klassieke extractieprocessen is dat met holle vezelmembranen een zeer groot uitwisselend oppervlak bereikt kan worden zonder extra (energie)kosten voor het maken en weer opbreken van een emulsie, zoals vaak nodig is bij de klassieke methode;
- bij membraangasabsorptie vindt stofoverdracht tussen een gasfase en een vloeistoffase plaats. Het proces is gebaseerd op de principes van normale gasabsorptieprocessen, maar het gas-vloeistofcontact vindt plaats in de poriën van holle vezelmembranen. Ook hier kan door het grote oppervlak van holle vezelmembranen een zeer efficiënte stofoverdracht bereikt worden. De contactapparatuur kan hierdoor een factor 10 à 100 kleiner worden dan de conventionele. Door optimalisatie van de membraangasabsorptieapparatuur kan een zeer lage drukval over het apparaat bereikt worden, met evenredig lage energiekosten.

3 Membranen

Een membraan kan worden gedefinieerd als een (al dan niet) selectieve barrière tussen twee stromen. Zie *figuur 3*.



Figuur 3 Membraan

Voor het karakteriseren van een membraan voor praktische toepassingen zijn vooral twee eigenschappen van belang: flux en selectiviteit:

- flux is gedefinieerd als de hoeveelheid vloeistof, opgeloste stof of gas dat door een membraan wordt getransporteerd per eenheid van membraanoppervlak en per eenheid van tijd;
- selectiviteit van een membraan wordt, afhankelijk van het soort scheidingsproces, uitgedrukt als retentie of als scheidingsfactor.

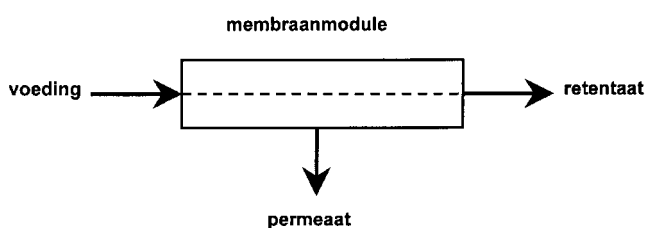
Voor het afscheiden van een lage concentratie van een opgeloste stof uit een oplosmiddel ligt het voor de hand de prestaties van het membraan te betrekken op de hoeveelheid tegengehouden materiaal. De retentie (R) is gedefinieerd als de verhouding $\{ \text{Concentratie Voeding}(C_f) - \text{Concentratie Permeaat}(C_p) \} / \{ \text{Concentratie Voeding}(C_f) \}$, ofwel

$$R = (C_f - C_p) / C_f.$$

Voor het scheiden van gas- of dampmengsels en voor het scheiden van vloeistofmengsels (met componenten A en B) wordt de selectiviteit meestal uitgedrukt in de scheidingsfactor (α). Deze scheidingsfactor is de verhouding tussen de samenstelling van het permeaat (y) en van de voeding (x), ofwel

$$\alpha (A/B) = (y_A/y_B) / (x_A/x_B)$$

Bij membraanprocessen wordt in het algemeen een voedingsstroom door het membraan opgesplitst in een retentaastroom ('tegengehouden') en een permeaatstroom ('doorgelaten'). Zie *figuur 4*.



Figuur 4 Principe van Membraanproces

Om een scheiding door middel van membranen te kunnen realiseren is altijd een drijvende kracht nodig. Dit kan zijn, zie tabel 1:

- drukverschil;
- partieel drukverschil;
- elektrisch potentiaalverschil;
- concentratieverschil;
- temperatuurverschil.

	Proces	Stroom 1 / 2	Drijvende kracht
RO (HF)	Omgekeerde osmose	L / L	p
NF	Nanofiltratie	L / L	p
UF	Ultrafiltratie	L / L	p
MF	Microfiltratie	L / L (G / G)	p
D	Dialyse	L / L	c
ED	Elektrodialyse	L / L	E
GS	Gasscheiding	G / G	p
PV	Pervaporatie	L / G	p
VP	Damppermeatie	G / G	p
MD	Membraandestillatie	L / G (L)	T / p
PT	Pertractie	L / L	c
MGA	Membraangasabsorptie	G / L	c

Tabel 1 Membraanproces: drijvende kracht

De scheidings eigenschappen van membranen kunnen op vele manieren worden beïnvloed, zoals door:

- de morfologie van het membraan;
- de toegepaste materialen;
- de modulaire opbouw;
- vervuiling en concentratiepolarisatie.

De selectiviteit en de daarbij bereikte flux bepalen tezamen de scheidingsprestatie van een bepaald scheidingsproces. Uitzondering hierbij zijn nieuwe, hybride membraanprocessen, waarin het membraan vooral als taak heeft twee verschillende fasen gescheiden te houden en tegelijkertijd uitwisselingsoppervlak voor transport tussen de beide fasen te verschaffen. Als een voorbeeld van een hybride membraanproces kan de reeds eerder genoemde membraangasabsorptie genoemd worden.

3.1 Morfologie

Scheidingsmechanismen in het membraanproces zijn onder andere afhankelijk van de morfologie van het gebruikte membraan:

- poreuze membranen : vertonen selectiviteit op basis van de afmetingen van de poriën. Hier treedt dus nog de echte filtratiewerking op. Deeltjes en/of moleculen met afmetingen groter dan de poriën worden tegengehouden. De kleinere moleculen worden in principe doorgelaten, zoals bijvoorbeeld in ultra- of microfiltratie. Daarnaast wordt dit type membraan ook gebruikt in membraancontactoren voor extractie en gasabsorptie;
- homogene membranen : vertonen een dermate dichte structuur dat van daadwerkelijke, microscopische poriën geen sprake meer is. Het (af)scheidingsvermogen van deze membranen kan daarom niet meer op basis van een filtratieproces worden verklaard. Het transport door deze membranen kan op basis van het zogenaamde oplos-diffusie-mechanisme worden beschreven, waarbij een molecuul eerst oplost in het membraanmateriaal en vervolgens onder invloed van een concentratiegradiënt door het membraanmateriaal diffundeert. De permeabiliteit van het membraanmateriaal is dan ook het product van oplosbaarheid en diffusiesnelheid. Polymere gasscheidingsmembranen werken in het algemeen volgens dit principe;
- actief transport membranen : bevatten specifieke moleculen ('carriers') welke slechts met bepaalde moleculen (of ionen) een binding kunnen aangaan en deze door

het membraan kunnen transporteren (vergelijk hemoglobine in bloed voor zuurstoftransport). Bij optimale condities wordt het membraan aan de voedingskant opgeladen en aan de permeaatzijde ontladen.

3.2 Materiaalkeuze

Naast de morfologie van het membraan is de keuze van het membraanmateriaal voor de scheiding zeer belangrijk. De belangrijkste materiaalgroepen zijn:

- organische, polymere membranen;
- anorganische membranen, zoals keramische, glas- of metaalmembranen.

De keuze voor bepaalde membraanmaterialen zal vooral worden ingegeven door eigenschappen van de af te scheiden stoffen aan het membraanoppervlak, procescondities, verbindingstechnieken en afdichtingen.

- Samenstelling en procescondities van het te behandelen medium. In een waterig milieu kunnen andere materialen worden toegepast dan in een organisch milieu. Bepaalde (hoogmoleculaire) organische verontreinigingen kunnen sterke invloed hebben op levensduur en prestaties van een (polymeer) membraan. Een medium met hoge of lage pH kan ook een keramisch of metalen membraan aantasten.
- Hydrofiel of hydrofoob: vooral van belang indien vervuiling kan optreden in een waterig milieu zoals bij verschillende membraanfiltratieprocessen. Om vervuiling tegen te gaan wordt in deze processen veelal de voorkeur gegeven aan sterk hydrofiele materialen.
- Stabiliteit van membranen is van belang om een lange gebruiksduur te kunnen realiseren. Naast thermische en chemische invloeden op het membraan kunnen op polymere membranen ook mechanische krachten inwerken. De membraaneigenschappen kunnen dan door compressibiliteit of krimp in ongewenste richting veranderen.

De intrinsieke materiaaleigenschappen van de verschillende polymere membraanmaterialen zijn vooral belangrijk bij scheidingen volgens het oplosdiffusiemechanisme. Voor gas-scheidingen is daarom het polymere membraanmateriaal van primair belang voor het kunnen behalen van een bepaalde scheiding.

3.3 Modulaire opbouw

Om de verschillende soorten membranen daadwerkelijk in de processen te kunnen toepassen zijn diverse modules ontwikkeld. Deze zijn dikwijls ontstaan in het verlengde van de beschikbare vorm van het membraan:

- als vlakke plaat. Vlakke plaat membranen kunnen ook in de vorm van 'spiraalgewonden' modules worden toegepast. Deze hebben een veel gunstiger verhouding membraanoppervlak/volume dan de traditionele gestapelde vlakke plaat modules;
- als buis. Buizen-modules zijn bijna ongevoelig voor ver-

stoppen en kunnen dan ook gemakkelijk suspensies verwerken;

- als capillair. Capillaire modules hebben een zeer gunstige membraanoppervlak-/volume-verhouding, maar zijn sterk gevoelig voor verstoppingen en blokkeringen; een voorfiltratiestap is dan ook dikwijls nodig;
- als holle vezel. Holle vezels hebben ongeveer dezelfde eigenschappen als de capillaire modules.

Vooraf bij sterk vervuilende voedingen is de modulekeus van groot belang om een langdurig gebruik van het membraan te kunnen garanderen en daarbij speelt de vraag of de module goed terug te spoelen is een grote rol.

Nieuwe modulevormen dienen zich vooral aan voor toepassingen buiten de traditionele membraanfiltratieprocessen, zoals elektrolyse, pervaporatie/dampermeatie, pertractie en membraangasabsorptie.

3.4 Vervuiling en concentratiepolarisatie

Operationele factoren zoals vervuiling van het membraan of concentratiepolarisatie kunnen de benodigde drijvende kracht nadelig beïnvloeden en daarmee ook het benodigde energiegebruik voor het scheidingsproces.

- Vervuiling treedt op als bestanddelen uit de te behandelen voedingsstroom zich afzetten op het membraanoppervlak of in de poriën van het membraan. Hierdoor kan de flux door het membraan afnemen of kunnen de scheidingseigenschappen van het membraan veranderen. Vervuiling kan worden bestreden door aanpassing van de procesvoering en door periodiek reinigen van het membraan. Fluxafname wordt dikwijls tegengegaan door verhoging van de druk over het membraan ('transmembraandruk'), echter ten koste van de energie-efficiency.
- Concentratiepolarisatie treedt op indien één of meer van de in de voedingsstroom aanwezige componenten niet door het membraan kan worden getransporteerd met het permeaat. Als de aanvoer van deze component naar het membraanoppervlak sneller is dan het terugtransport naar de 'bulk' van de voeding, dan vindt een zekere ophoping aan het membraanoppervlak plaats. Dit belemmert de doorstroming van het permeaat. Vooral bij ontzoutingsprocessen leidt dit tot een lokaal hogere osmotische druk, welke ook door een hogere transmembraandruk moet worden overwonnen ten koste van de energie-efficiency.

4 Toepassingsmogelijkheden van membraanprocessen

De belangrijkste huidige toepassingsmogelijkheden zijn hieronder per membraantechniek aangegeven.

4.1 Dialyse en diffusiedialyse (D, DD)

- medische toepassingen;
- productie van laagalcoholische dranken (bier);
- terugwinning van zuren en basen uit afvalstromen.

4.2 Microfiltratie (MF)

- 'koude sterilisatie' van farmaceutische producten;
- afscheiding van cellen (gisten, bacteriën), biotechnologie;
- voorfiltratie ultrapuur water;
- (afval)waterbehandeling;
- scheiding olie-water-emulsies;
- terugwinning watergedragen verfcomponenten;
- concentreren van waterige slurries.

4.3 Ultrafiltratie (UF)

- terugwinning, scheiding enzymen en eiwitten;
- terugwinning kleurstoffen;
- scheiding emulsies;
- (afval)waterbehandeling;
- concentreren van waterige slurries (bijvoorbeeld koolien);
- voorbehandeling omgekeerde osmose;
- terugwinning elektroforese lakverf uit spoelwater;
- terugwinnen latexemulsies;
- afscheiding wascomponenten uit (lagere) paraffinen;
- oplosmiddel terugwinnen in ontasfalteringsinstallaties.

4.4 Nanofiltratie (NF)

- waterontharding;
- proceswaterbereiding;
- terugwinning kleurstoffen;
- concentreren van waterige oplossingen;
- concentreren van polymeeroplossingen.

4.5 Elektrodialyse en Membraanelektrolyse (ED, ME)

- ontzouten brak water;
- scheiding aminozuren;
- productie specifieke zouten;
- (terug)winning organische zuren;
- (terug)winning zuur/loog uit zout;
- (terug)winning metalen uit zouten.

4.6 Pervaporatie en Damppermeatie (PV, VP)

- verwijderen van water uit organische oplosmiddelen;
- breken van azeotropen (bijvoorbeeld EtOH - H₂O);
- toekomstig: organisch - organisch scheidingen (bijvoorbeeld MeOH - Tolueen, EtOH - Esters);
- terugwinnen oplosmiddelen uit waterstromen (bijvoorbeeld ethanol, butanol, aceton);
- terugwinnen vluchtige verontreinigingen uit afvalwaterstromen;
- (terug)winnen van geur- en smaakstoffen uit waterige extractiestromen.

4.7 Membraangasscheiding (MG)

- terugwinnen H₂ bij NH₃-synthese; idem uit diverse processtromen;
- scheiding O₂/N₂, bijvoorbeeld inert gasbereiding;
- scheiding CO₂/H₂S van CH₄;
- drogen van gassen en/of (pers)lucht;
- terugwinnen van organische dampen uit lucht.

4.8 Pertractie (PT)

- verwijdering/terugwinning (zware) metalen uit waterige stromen;
- terugwinning organische oplosmiddelen uit water;
- winning fermentatieproducten.

4.9 Membraangasabsorptie (MGA)

- rookgasreiniging (SO₂, CO₂, etc.);
- CO₂/H₂S uit CH₄;
- VOC's uit afgassen;
- NH₃ uit lucht;
- ontluchten/ontgassen van vloeistofstromen.

Voor wat betreft de toekomstverwachtingen van de membraantechnologie kan verwezen worden naar een rapport over anorganische membranen dat in opdracht van Novem is opgesteld, ref. 8.

5 Energiegebruik en energie-efficiency

5.1 Drukgedreven membraanfiltratietechnieken

5.1.1 Energiegebruik

Membraanfiltratieprocessen zijn drukgedreven processen en verbruiken daardoor van nature zelf ook energie. Het energiegebruik hangt sterk af van het soort proces, van het type module en van de wijze van opereren.

Bij micro-, ultra- en nanofiltratie en omgekeerde osmose worden tijdens bedrijf de 'poriën' van het membraan steeds kleiner en zal de drukval over het membraan toenemen.

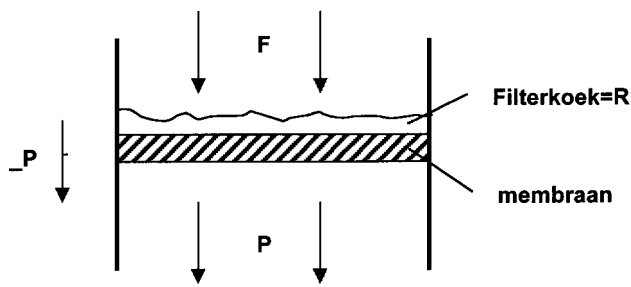
Het energiegebruik kan daarom toenemen van 0,5 kWh/m³ permeaat (micro- en ultrafiltratie in recirculatiesystemen) tot 10 kWh/m³ permeaat voor hoge druk omgekeerde osmose systemen (eventueel met energietrugwinning).

Vooraf bij microfiltratiesystemen is door een grootschalige toepassing (bijvoorbeeld in drink- en proceswaterbereiding) het energiegebruik sterk te verbeteren door de wijze van procesvoering.

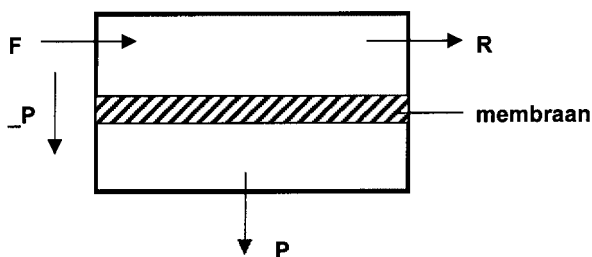
Tot in het midden van de jaren '90 werd microfiltratie uitsluitend in langsstroomrecirculatie ('Cross-flow')-systemen toegepast. Hierbij wordt de voeding (F) met hoge snelheid door de module gepompt en gerecirculeerd, teneinde door een hoge vloeistofsnelheid afzetting van vervuiling te voorkomen. Deze recirculatie van de voeding kost veel energie. Voor elke m³ permeaat (product P) wordt ongeveer 10 m³ voeding rondgepompt.

Voor grootschalige toepassing in drinkwater- en proceswaterbereiding is sindsdien op verschillende wijzen een semi 'dead-end' manier van opereren geïntroduceerd waarbij de voeding direct en zonder recirculatie wordt gefiltreerd, zie *figuur 5*. Ter voorkoming van vervuiling zijn terugspoel- en doorspoelprocedures ontwikkeld en worden soms ook modules met lucht doorgeblazen.

Door toepassing van deze nieuwe semi 'dead-end' technieken kan het energiegebruik met een factor 5 - 10 worden teruggebracht.



Eindpuntfiltratie ("dead-end")



Langsstroombfiltratie ("cross-flow")

Figuur 5 'Dead-end' versus 'Cross-flow'-filtratie

5.1.2 Energie-efficiency in vergelijking met indamping

De drukgedreven membraanfiltratietechnieken (micro-, ultra- en nanofiltratie en omgekeerde osmose) worden veel toegepast voor het concentreren van processtromen. Zowel voor waterige stromen als voor organische oplosmiddelen zijn deze technieken zeer goed toe te passen als vervanging van, of als voorschakeling bij, indampprocessen om oplosmiddel te concentreren of terug te winnen.

De energiebesparing kan hierbij aanzienlijk zijn. Het energieverbruik van de verschillende membraanfiltratieprocessen ligt in de orde van grootte van 4 tot 70 kJ/kg afgescheiden oplosmiddel. Deze getallen gelden voor verdunde oplossingen, hetgeen direct aangeeft dat bij verder concentreren de hogere viscositeit van de in te dikken oplossing of slurry relatief meer energie zal vragen, ref. 1.

Het energieverbruik van membraanfiltratieprocessen dient te worden vergeleken met dat van indampingsprocessen. De verdampingswarmte van water bij 1 bar is 2260 kJ/kg en voor veel organische oplosmiddelen ligt de verdampingswarmte tussen 400 - 800 kJ/kg.

Vooraf door het combineren van voorconcentratie door membranen en daarna indampen kan dus een aanzienlijke energie-efficiency bereikt worden.

Bovengenoemde getallen zijn slechts geschikt voor een eerste benadering en optimalisatie van de procesvoering. Zoals reeds gemeld zal de viscositeit en temperatuur van de oplossing of slurry een grote invloed hebben op het energiegebruik van het membraanproces. Daarnaast zullen factoren als vervuiling en concentratiepolarisatie hun uitwerking hebben op de flux van het proces en dus ook op het daaraan gerelateerde energiegebruik. Ook zal optimalisatie van het indampproces door terugwinning van verdampingswarmte verder leiden tot een hogere energie-efficiency.

Bij de bereiding van drinkwater uit zeewater heeft in de afgelopen decennia, door concurrentie tussen de indampstechnieken enerzijds en membraantechnieken (omgekeerde osmose) anderzijds, een sterke verbetering en optimalisatie plaatsgevonden van zowel de indampprocessen als ook van het membraanproces. Qua energieverbruik is het membraanproces echter nog altijd aanmerkelijk zuiniger. Indien restwarmte tegen lage kostprijs beschikbaar is, kunnen de totale kosten van indampingsprocessen echter concurrerend zijn, ref. 2.

5.2 Elektro-membraanprocessen

De elektro-membraanprocessen (elektrodialyse en membraanelektrolyse) kunnen voor specifieke toepassingen en toepassingsgebieden tot een aanmerkelijke energiebesparing leiden.

Voor het verwijderen van zouten uit processtromen kan elektrodialyse een zeer energiezuinige technologie zijn, vooropgesteld dat slechts lage concentraties zout aanwezig zijn. Bij zoutconcentraties beneden 5 g/l is elektrodialyse efficiënter dan omgekeerde osmose of indampen. Bij zeer lage concentraties (< 0,5 g/l) is ionenwisseling goedkoper, ref. 3. De verklaring hiervoor is, dat het stroomverbruik van elektrodialyse recht evenredig is met de te verwijderen hoeveelheid ionen, terwijl bij omgekeerde osmose en indampen het water wordt verwijderd.

Voor chlooralkaliprocessen is gebleken dat elektrodialyse een aanmerkelijke energiewinst met zich meebrengt ten opzichte van de oudere kwikceltechnologie. Voor de oudere technologie lag het gemiddelde energieverbruik op ongeveer 3500 kWh/ton chloor, terwijl na invoering van membraancellen het energieverbruik is gedaald tot minder dan 2400 kWh/ton chloor.

Verdere verbeteringen liggen nog in de lijn der verwachting, ref. 4.

5.3 Membraangasscheiding

Membraangasscheidingsprocessen worden in toenemende mate ingezet voor terugwinning van koolwaterstoffen uit lucht, afgassen en dampbevattende processtromen. Vooral bij de op- en overslag van organische oplosmiddelen wordt deze technologie met succes ingezet. De efficiency wordt vooral bepaald door de hoeveelheid van de teruggewonnen oplosmiddelen of brandstoffen (bijvoorbeeld benzine). De toepasbaarheid van membraantechnologie voor dergelijke toepassingen wordt sterk bepaald door het volume van de te behandelen stroom en de concentratie van de terug te winnen component. In de praktijk worden membraanprocessen inge-

zet voor dampstromen van enige m³/h tot enige duizenden m³/h. Om aan stringente milieueisen te kunnen voldoen wordt dikwijls een combinatie van membraantechnologie met adsorptie toegepast.

Afhankelijk van de waarde van de teruggewonnen oplosmiddelen kan de investering voor de membraaninstallatie binnen enkele maanden rendabel zijn, ref. 5.

Gasscheidingsmembranen worden op grote schaal toegepast voor het terugwinnen van waterstof uit processtromen. Waterstofrijke afgasstromen kunnen hierdoor worden gebruikt als bron van waterstof, waar voorheen deze stromen slechts als brandstof konden worden ingezet. Tot nu toe worden vooral polymere gasscheidingsmembranen op industriële schaal toegepast. Met de ontwikkeling van keramische gasscheidingsmembranen zal het mogelijk zijn op hogere temperatuur waterstof terug te winnen. Hierdoor wordt de inzet van gasscheidingsmembranen in membraan-reactoren mogelijk. Gedacht kan worden aan (de)hydrogenerings- en (de)hydrateringsreacties. Door de inzet van membranen kan het te bereiken reactie-evenwicht sterk beïnvloed worden. Hiermee kunnen energiebesparingen tot ongeveer 80% bereikt worden, ref. 6.

5.4 Pervaporatie en damppermeatie

Pervaporatie en damppermeatie hebben een groot potentieel voor energiebesparing in de chemische industrie. Voor ontwatering van organische oplosmiddelen is pervaporatie al operationeel. Zowel polymere als keramische membranen zijn hiervoor beschikbaar. Vooral in combinatie met destillatie als hybride-technologie liggen hier voor membranen grote kansen, bijvoorbeeld in het breken van azeotropen. Toevoeging van een derde component kan achterwege blijven bij een combinatie van destillatie-pervaporatie/damppermeatie.

Geschat wordt dat hierdoor een energiebesparing van 30 tot 35% per installatie kan worden bereikt, ref. 6.

Voor het vervangen van destillatie worden in de nabije toekomst veel mogelijkheden gezien voor pervaporatie en damppermeatie. Een nieuwe klasse membranen voor organisch-organisch scheiding is hiertoe in ontwikkeling. Verwacht wordt dat hiermee vooral 'moeilijke' destillatieve scheidingen zullen kunnen worden vervangen. Naar verwachting kunnen dergelijke membraanprocessen binnen 10 jaar operationeel zijn en zal hiermee een energiebesparing tot ruim 80% per installatie bereikt kunnen worden, ref. 6.

5.5 Membraangasabsorptie

Membraangasabsorptie wordt momenteel ontwikkeld voor toepassingen op industriële schaal. Ten opzichte van conventionele gasabsorptiesystemen is het energieverbruik aanmerkelijk lager door enerzijds het compacte ontwerp van de absorber en anderzijds vooral door de zeer lage drukval in de voedingsstroom. Vooral voor de behandeling van zeer grote afgasstromen kan dit aspect in de toekomst belangrijk zijn. Voor de terugwinning van CO₂ uit rookgassen is aangetoond dat membraangasabsorptie een zeer efficiënt proces is, ref. 7.

6 Referenties

1. M. Mulder, 'Energy Requirements in Membrane Separation Processes', In: J.G. Crespo and K.W. Böddeker (Eds.), 'Membrane Processes in Separation and Purification', Kluwer (1994), p. 445-475.
2. N. Wade, 'Desalination Technologies compared', In: 'The Membrane Alternative. Energy Implications for Industry', J.A. Howell (Ed.), Watt Committee Report Nr. 21, Elsevier, London (1990), p.19-30.
3. H. Strathmann, 'Electrodialysis. Design and Cost Estimates'. In: W.S. Ho and K.K. Sirkar (Eds.), 'Membrane Handbook', Chapman & Hall, N.Y. (1992), p.253.
4. S. Kelham, 'Electrochemical Process Applications', In: 'The Membrane Alternative. Energy Implications for Industry', J.A. Howell (Ed.), Watt Committee Report Nr. 21, Elsevier, London (1990), p. 9-18.
5. K. Ohlrogge, J. Wind, K. Stürken en E. Kyburz, 'Membrane Applications to separate VOC's. NPT Procestechologie, (2000), nr. 1, p. 25-30.
6. J.L. Humphrey, A.F. Seibert and R.A. Koort, 'Separation Technologies. Advances and Priorities'. DOE Report 1991, (DOE/ID/12920-1 // DE91010024)
7. P.H.M. Feron e.a., 'Capture of CO₂ using Membrane Gas Absorption and Reuse in the horticultural Industry'. Energy Convers. Mgmt, Nr. 36, (1995), p. 411-414.
8. Krekel van der Woerd Wouterse B.V., 'Anorganische membranen; een toekomstverkenning', Novem rapport, 1996.