



Best Practice Membraantechnologie

1. Inleiding

Membraantechnologie is een verzamelnaam voor diverse scheidingsprocessen met als overeenkomsten, dat er een fysieke barrière bestaat tussen twee fasen (het membraan) en dat de, te scheiden deeltjes, kleiner zijn dan ca. 1 μm . In de afgelopen jaren heeft membraantechnologie zich ontwikkeld tot een volwaardige scheidingstechnologie, met name op het gebied van drink- en proceswaterbereiding. De kracht van membraantechnologie is gelegen in het feit dat deze technologie modulair kan worden opgebouwd (opschaalbaar), een relatief lage energiebehoefte heeft en met een eenvoudige procesvoering kan worden bedreven.

Bij beschouwing van de diverse membraanprocessen valt op dat de diversiteit groot is en dat er een groot verschil is in technologische ontwikkelingsfasen. Deze *Best Practice* is gericht op de meest gebruikte membraantechnieken in de procesindustrie. Dit zijn de drukgedreven membraanprocessen (microfiltratie (MF), ultrafiltratie (UF), nanofiltratie (NF) en omgekeerde osmose (RO)) en de elektro-membraantechnieken (elektrodialyse).

2. Vuistregels

Hieronder worden enige vuistregels gegeven voor het gebruik van membraantechnologie. Deze regels hebben zowel betrekking op het gebruik van bestaande membraansystemen als voor toekomstige inzet van membraantechnologie:

- Gebruik een membraansysteem voor de specifieke toepassing waarvoor deze is gebouwd. Voor inzet van de installatie in een 'vergelijkbare' toepassing kan een aanpassing van procesomstandigheden en membranen nodig zijn.
- Zorg voor een goede [voorbehandeling](#). Niet elke voeding is direct geschikt voor behandeling met een membraansysteem.
- Optimaliseer de voorbehandeling op de, door het membraansysteem te behandelen, vloeistof-stroom en niet op de droge-stof van de voorbehandeling.
- Zorg bij een complexe voeding voor een goede optimalisatie van de [gehele](#) scheidingstrein. Vaak werkt een membraaninstallatie (en de hele scheidingstrein) beter als een voorbehandeling onder mildere omstandigheden werkt.
- Vermijd onnodig hoge drukken en hoge drukval in het systeem vooral bij crossflow micro- en ultrafiltratiesystemen; drukverhoging werkt vaak averechts.
- Toepassing van [backflush](#)/backpulse is effectiever bij keramische membranen (deze zijn namelijk niet vervormbaar onder druk).
- Vermijd hoge drukvallen bij spiraalgewonden systemen; dit is energetisch ongunstig en kan leiden tot onherstelbare membraanbeschadiging (*telescoping*).
- Bij [spiraalgewonden](#) membranen: stem moduletype (met name spacertype en -dikte) af op viscositeit en vuilgraad van de voeding.
- Kijk kritisch naar het gebruik van [antisclalants](#) en flocculanten. Deze middelen zijn effectief, maar overdosering geeft vaak meer (vervuilings)problemen dan een te lage dosering.
- Voer [tijdig](#) een reiniging uit en wacht niet tot het systeem zwaar vervuild is: een tijdige (preventieve) reiniging kost minder tijd en geld dan een uitgestelde reiniging.
- Kies de juiste reinigingsmiddelen en de volgorde van gebruik van deze middelen. Het loont zich om u te laten adviseren door een membraan(reinigings)specialist.

- Voor het specifiek ontzouten van een processtroom is elektrolyse de best beschikbare techniek. Bij zoutconcentraties lager dan 5 g/l is elektrolyse efficiënter dan omgekeerde osmose of indampen. Bij zeer lage concentraties (< 0,5 g/l) is ionenwisseling goedkoper.
- Voor het terugwinnen van (sterke) zuren uit processtromen in de oppervlaktebehandelende industrie is [diffusie-dialyse](#) een goede en energetisch gunstige oplossing.

3. Componenten van het systeem

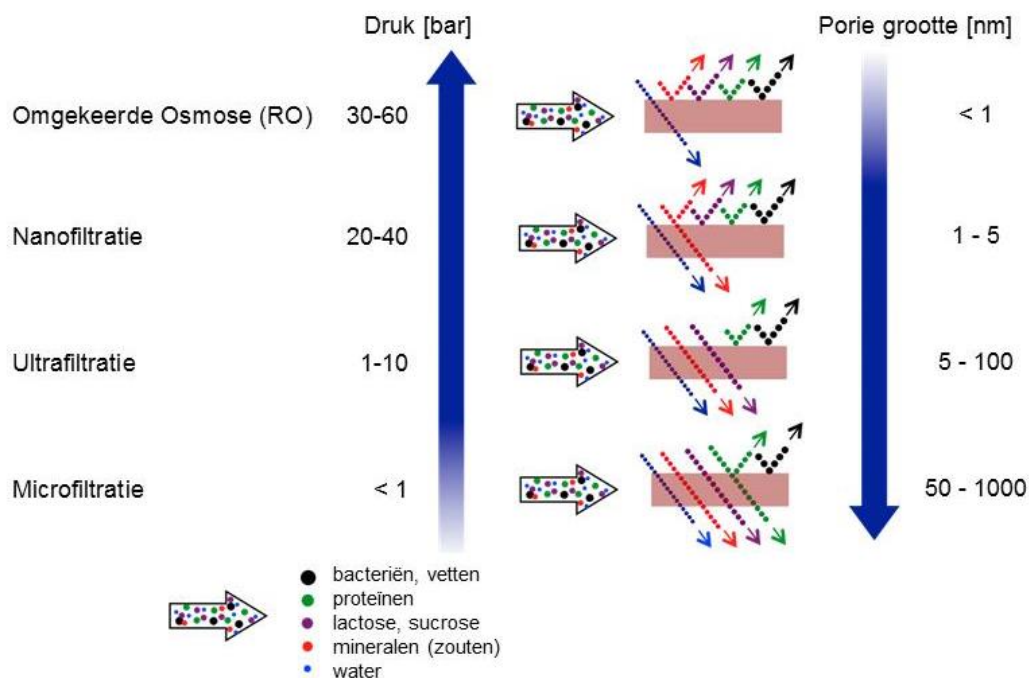
In deze sectie wordt eerst kort een overzicht gegeven van alle membraantechnieken. Daarna wordt aan de hand van de verdere componenten van het membraansysteem, zoals membraan- en moduultype dieper ingegaan op de meest toegepaste technieken, zijnde drukgedreven en elektro-membraanprocessen.

3.1. Membraantechnieken

Membraantechnieken worden veelal onderscheiden volgens de navolgende indeling:

- Drukgedreven membraantechnieken
- Elektro-membraantechnieken
- Gas- en dampscheidingsmembranen
- Membraancontactoren
- Diffusie-gedreven membraanprocessen.

Drukgedreven membraanprocessen zijn microfiltratie (MF), ultrafiltratie (UF), nanofiltratie (NF) en omgekeerde osmose (RO). Deze technieken worden reeds op grote schaal toegepast, waarbij elke techniek zijn eigen specifieke toepassingen heeft. Scheiding vindt plaats op basis van afmetingen van deeltjes of moleculen. Onder invloed van een drukverschil wordt het permeaat door (de poriën van) het membraan geperst. De 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.



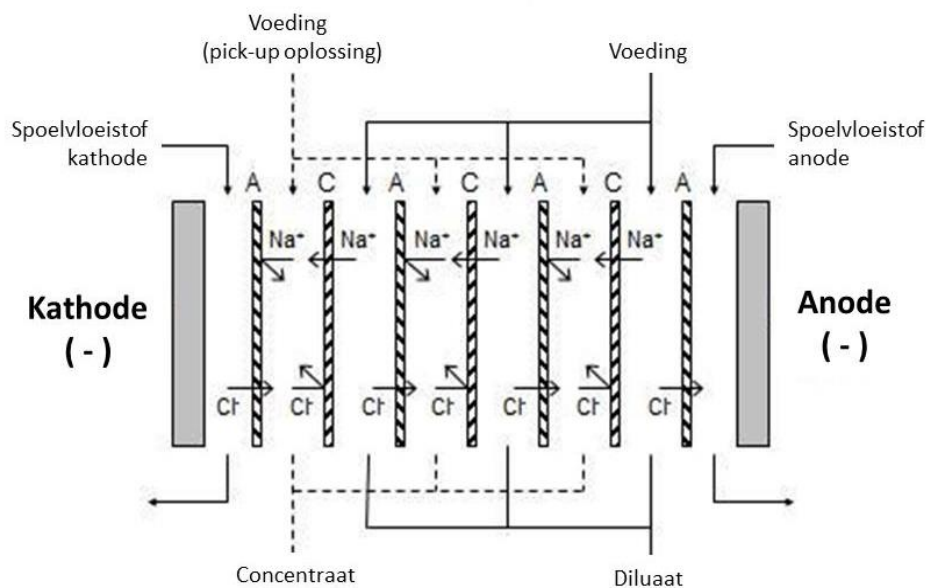
Figuur 1: Schematisch overzicht van filtratieprocessen

Concentreren van (proces)stromen en/of scheiden in specifieke bestanddelen is hierbij het doel. De belangrijkste markt voor de drukgedreven membraanprocessen is de bereiding van drinkwater, zowel uit zee- als uit oppervlaktewater (met name UF en RO). In de procesindustrie is de bereiding en recirculatie van proceswater de belangrijkste toepassing (vooral RO). MF wordt vooral ingezet voor 'koude' sterilisatie (farmaceutische industrie), afscheiden van cellen en gisten (biotechnologie) en het concentreren van waterige slurries. UF vindt vooral toepassing voor het afscheiden van eiwitten (onder andere zuivelindustrie), terwijl NF ingezet wordt voor waterontharding en het concentreren van waterige oplossingen (bijvoorbeeld zuivel- en suikerindustrie).

Voor membraanfiltratieprocessen in organische media zijn de laatste jaren verschillende membranen beschikbaar gekomen, zowel op basis van keramiek (MF, UF) als polymeer (met name NF) [4].

Tot de elektro-membraantechnieken behoren ondermeer membraanelektrolyse en elektrodialyse. Deze technieken worden gekenmerkt door een elektrisch potentiaalverschil als drijvende kracht, waarbij onder invloed van dit potentiaalverschil ionen of geladen moleculen door positief of negatief geladen membranen worden getransporteerd:

- 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 chloor-alkaliproces voor de bereiding van chloor en natronloog uit natriumchloride.
- Het elektrodialyseproces maakt gebruik van zowel kation- als anionselectieve membranen [5]. Dit proces wordt in de industrie in Nederland vooral gebruikt voor het ontzouten van processtromen, zoals in de zuivelindustrie (ontzouten van wei).



Figuur 2: Schematische weergave van het elektrodialyseproces

- Reversed Electrolyse. Een bijzondere toepassing van elektrodialysemembranen is het zogenaamde 'Blue Energy' proces waarbij een verschil in zoutconcentratie wordt gebruikt voor het winnen van elektrische energie [6].

Gasscheidingsmembranen, pervaporatie en damppermeatie zijn op dezelfde scheidingsprincipes gebaseerd (het zogenaamde 'oplos-diffusie mechanisme' in polymere membranen), doch verschillen in de te behandelen stromen en in de te scheiden componenten:

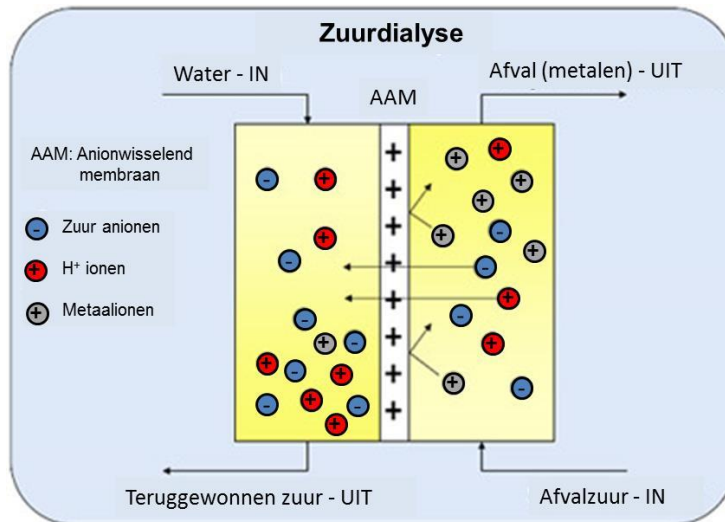
- Bij gasscheidingsmembranen wordt de voeding als gas aangeboden. Door verschil in snelheid van permeatie door het membraan van de verschillende gasvormige componenten kan een scheiding worden bereikt.
Gasscheidingsmembranen werden aanvankelijk vooral ingezet bij terugwinning van waterstof in diverse chemische processen, zoals bijvoorbeeld bij het terugwinnen van H₂ bij NH₃-synthese. Andere toepassingen zijn de scheiding O₂/N₂, bijvoorbeeld inert gasbereiding, of het verwijderen van CO₂ en H₂S uit CH₄ (bijvoorbeeld in vergisters). Het terugwinnen van organische dampen uit lucht is een typische milieutoepassing. Combinatie van gasscheidingsmembranen met droogprocessen zou eveneens tot een aantrekkelijke en energie-efficiënte procesvoering kunnen leiden (bijvoorbeeld drogen van gassen en/of (pers)lucht).
- 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 sterk afwijken 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°C. Tegenwoordig zijn ook keramische membranen beschikbaar, waardoor bij hogere temperaturen kan worden geopereerd [7]. Een nadeel van pervaporatie is 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 als (oververhitte) damp 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 worden gecombineerd met destillatie tot een hybrideprocesvoering.
Toepassingen van pervaporatie en damppermeatie zijn: verwijderen van water uit organische oplosmiddelen, breken van azeotropen (bijvoorbeeld ethanol-water), terugwinnen van vluchtige verontreinigingen uit afvalwaterstromen, (terug)winnen van geur- en smaakstoffen uit waterige extractiestromen.

Bij membraancontactoren is de functie van het membraan geheel verschillend van boven beschreven processen. Het membraan heeft hierin geen scheidende functie, doch wordt gebruikt om verschillende stromen gescheiden te houden en tegelijkertijd oppervlak voor stofoverdracht tussen deze stromen aan te bieden. Onder deze groep vallen pertractie en membraangasabsorptie:

- 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 kan worden bereikt zonder extra (energie)kosten voor het maken en weer opbreken van emulsies.
- bij membraangasabsorptie vindt stofoverdracht tussen een gasfase en een vloeistoffase plaats. Het proces is gebaseerd op de principes van normale gasabsorptieprocessen, maar het gas-vloeistof-contact vindt plaats in de poriën van holle vezel membranen. Door het grote oppervlak van holle vezel membranen kan een zeer efficiënte stofoverdracht worden bereikt. De contactapparatuur kan hierdoor een factor 10 à 100 kleiner worden gedimensioneerd. Door optimalisatie kan een lage drukval over het apparaat worden bereikt, met evenredig lage energiekosten.
- Een bijzondere toepassing van een membraancontactor is de *membrane oxygenator*: een medisch apparaat dat tijdens een (hart)operatie zuurstof toedient aan het bloed en CO₂ afvoert [8].

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 (ook wel zuurdialyse genoemd), waarbij anionselectieve membranen worden gebruikt voor terugwinnen van zuur.



Figuur 3: Schematische weergave van het zuurdialyseproces

Diffusiedialyse is een proces dat vergelijkbaar is met (nier)dialyse. Hierbij is een concentratieverschil over het membraan de drijvende kracht voor de scheiding. Bij zuurdialyse wordt een anionwisselend membraan gebruikt om sterke zuren terug te winnen uit afvalstromen, zoals etsbaden in de galvanische industrie. Evenals bij elektrolyse worden geladen membranen toegepast die zodanig zijn aangepast dat ze H^+ -ionen doorlaten, maar een goede retentie hebben voor positieve metaalionen in de voeding. Sinds 2000 reinigt een galvaniseerbedrijf in Nederland zijn zwavelzuurhoudende anodiseerbaden met een combinatie van diffusiedialyse en omgekeerde osmose. Het anodiseerbad bevat ca. 25% zwavelzuur en wordt continu met diffusiedialyse behandeld. Zo wordt een groot percentage van het zwavelzuur teruggewonnen en wordt de kwaliteit van het anodiseerbad op peil gehouden hetgeen tot 60% minder afkeur heeft geleid. Het spoelwater van het tweede spoelbad (1,5 - 3 g/l zwavelzuur) wordt behandeld met omgekeerde osmose [9].

3.2. Scheidingseigenschappen

Een membraan is een (al dan niet) selectieve barrière tussen twee stromen. Voor praktische toepassingen zijn vooral twee eigenschappen van belang, zijnde flux en retentie:

- 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.

- retentie (R) is gedefinieerd als:

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

waarbij C_f de concentratie van de tegengehouden component in de voeding is en C_p de concentratie van de tegengehouden component in het permeaat.

De retentie en de flux bepalen tezamen de scheidingsprestatie van een bepaald scheidingsproces.

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

- membraantype (morfologie, membraanmateriaal);
- moduletype;
- procesvoering;
- vervuiling en concentratiepolarisatie.

3.3. Membraantypen

Scheidingsmechanismen in het membraanproces zijn onder andere afhankelijk van de morfologie van het gebruikte membraan. Hierbij worden de volgende typen onderscheiden:

- Poreuze membranen. De selectiviteit wordt verkregen op basis van de afmetingen van de poriën. Deeltjes en/of moleculen met afmetingen groter dan de poriën worden tegengehouden. De kleinere moleculen worden in principe doorgelaten, zoals bijvoorbeeld in micro- en ultrafiltratie. Meestal zijn de membranen asymmetrisch van structuur, waarbij de dunne toplaag de scheidings eigenschappen verzorgt en de onderliggende laag voor de mechanische stabiliteit van het membraan zorgt. Deze membranen worden gebruikt bij micro-, ultra- en nanofiltratie.
- Homogene membranen. Bij omgekeerde osmose vertonen de membranen een dermate dichte structuur dat van microscopische poriën geen sprake meer is. De permeërende moleculen (in de regel water) bewegen zich tussen de interstitiële ruimte van de polymeer ketens volgens het zogenaamde oplos-diffusie-mechanisme, waarbij een molecuul eerst in het membraanmateriaal absorbeert en vervolgens onder invloed van een drijvende kracht door het membraan diffundeert.
- Ionogene (geladen) membranen. Deze membranen worden toegepast bij elektrisch gedreven membraanprocessen en diffusiedialyse. Deze membranen worden gekenmerkt doordat ze ofwel positief of negatief geladen zijn, waardoor ze de eigenschap hebben dat ze alleen anionen of alleen kationen doorlaten. Bij elektrodialyse worden deze membranen alternerend toegepast; bij diffusiedialyse (zuurdialyse) worden alleen anionwisselende membranen toegepast.

Naast de morfologie van het membraan heeft men ook te maken met het membraanmateriaal. De hoofdklassen waarin membranen in de regel worden onderverdeeld zijn:

- Polymere membranen.
Polymeren zijn de meest toegepaste grondstof voor membranen. Voor alle membraanprocessen zijn polymere membranen beschikbaar. De keuze voor een bepaald membraanmateriaal wordt vooral ingegeven door eigenschappen van de af te scheiden stoffen in relatie tot het membraanoppervlak (bijvoorbeeld hydrofiel - hydrofob met name bij MF en UF) en de procescondities (thermische en chemische bestendigheid).
- Keramische membranen.
Bij keramische membranen is men altijd afhankelijk van poriën in het membraanmateriaal. Om de permeabiliteit van het membraan voldoende hoog te houden, wordt de poriestructuur laag-voor-laag opgebouwd. Bijvoorbeeld voor het vervaardigen van een microfiltratie-structuur zijn in de regel twee lagen op een grofporeuze drager nodig. Voor het vervaardigen van nanofiltratie- of pervaporatiemembranen is een opbouw in ca. vijf lagen noodzakelijk. Dit is één van de redenen waarom keramische nanofiltratiemembranen duurder zijn dan polymere nanofiltratiemembranen. Keramische membranen hebben een hogere temperatuurstabiliteit en zijn bij uitstek geschikt indien organische media dienen te worden gefiltreerd. Een medium met hoge of lage pH kan ook een keramisch of metalen membraan aantasten.
- Andere materialen (glas, metaal).
Weinig toegepast en vrijwel uitsluitend microfiltratie; vergelijkbare eigenschappen als keramiek.

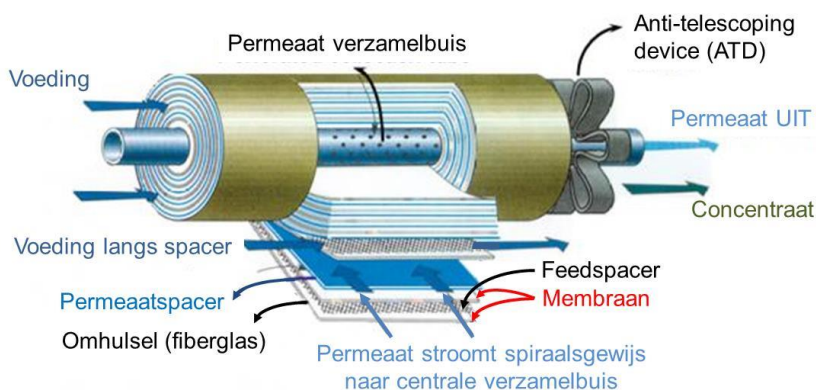
3.4. Moduletypen

Verschillende moduletypen zijn ontwikkeld om de membranen in processen te kunnen toepassen. In sommige gevallen is een modulevorm een 'gegeven', zoals bij elektrodialyse. Om een spanningsveld te kunnen toepassen dienen de membranen in de vorm van vlakke platen te worden toegepast, de zoge-

naamde 'vlakke-plaat-module'. Aangezien deze modulevorm kostentechnisch relatief ongunstig is, wordt deze zelden toegepast bij drukgedreven processen.

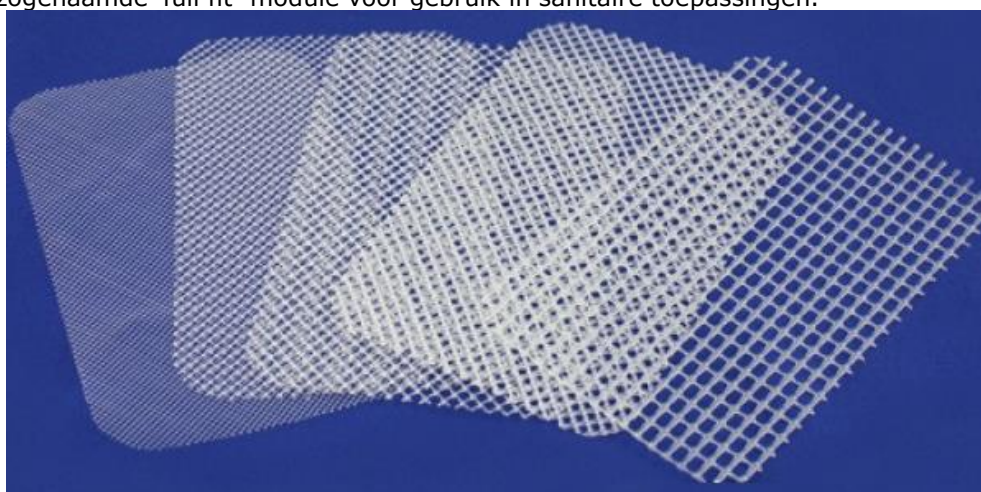
Bij drukgedreven processen wordt de modulevorm vaak ingegeven door de beschikbare vorm van het membraan:

- Vlakke membranen. Vlakke membranen worden in drukgedreven processen vrijwel uitsluitend in de vorm van *spiraalgewonden modules* toegepast. Deze modules hebben een gunstiger verhouding membraanoppervlak/volume dan de traditionele gestapelde vlakke-plaat-modules en zijn aanmerkelijk goedkoper te construeren.



Figuur 4: Schematische weergave van een spiraalgewonden module

Een belangrijke parameter bij spiraalgewonden modules is de keuze van de *feed spacer* (een gaasachtige structuur die ervoor zorgt dat de afstand tussen de verschillende membraanplaten behouden blijft; zie figuur 5). De dikte van deze spacer kan variëren van 0.5 mm tot 1.2 mm (*viscous flow spacer*). De meest gebruikte dikte zit tussen 0.66 en 0.81 mm. Een dikkere spacer betekent dat het membraanoppervlak per volume-eenheid sterk afneemt. Ook de vorm van de spacer is een ontwerpparameter. Meestal wordt een ruitvormige spacer gebruikt (geeft de meeste steun, werkt als turbulentiepromotor, is goedkoop en eenvoudig te installeren). Voor visceuze voedingen en/of voedingen met een hoge droge-stofgehalte worden ook longitudinale (*parallel*) spacers toegepast. Hierbij wordt de drukval beperkt (nodig voor visceuze voedingen) en is de kans op verstopping door deeltjes kleiner. Meestal worden de membranen uitgevoerd met een fiberglas omhulsel; dit geeft de membranen stabiliteit en voorkomt beschadigen bij het monteren. Daarnaast bestaat ook een zogenaamde 'full fit'-module voor gebruik in sanitaire toepassingen.



Figuur 5: Type spacer (links: ruitvormige ('diamond') spacer voor schone voedingen;

rechts: parallel flow spacer voor vervuilende voedingen

- Buismembranen (interne diameter > 5 mm). Buizenmodules zijn minder gevoelig voor verstoppingen en kunnen suspensies verwerken;
- Capillairmembranen (1 mm < interne diameter < 5 mm). Capillaire modules hebben een gunstige membraanoppervlak/volume-verhouding, maar zijn gevoeliger voor verstoppingen en blokkeringen. Hierdoor is een voorfiltratiestap dikwijls nodig;
- Holle vezel membranen (interne diameter < 1 mm). Holle vezels worden uitsluitend toegepast bij relatief 'schone stromen' (bijvoorbeeld zeewaterontzouting) of in gevallen dat er veel oppervlak nodig is bij een klein volume (bijvoorbeeld een kunstnier).

De modulekeuze is sterk afhankelijk van de voeding en het type proces dat men wil uitvoeren. Als vuistregel worden bij microfiltratieprocessen buismembranen (voor sterk vervuilde stromen) en capillairen (minder vervuilde stromen) toegepast; bij ultrafiltratie worden capillairen en spiraalgewonden membranen met longitudinale spacer gebruikt. Voor nanofiltratie en omgekeerde osmose worden spiraalgewonden membranen toegepast.

4. Overige operationele aspecten

4.1. Procesvoering

Naast een juiste keuze van membraan- en moduletype, is met name de procesvoering van belang. In sommige gevallen wordt de temperatuur ingegeven door externe factoren (voeding heeft al een hoge temperatuur). In dergelijke gevallen dient hierbij rekening te worden gehouden met membraan- en modulekeuze.

Andere factoren die van belang zijn voor de procesvoering (druk, cross-flow, backflush) dienen door (pilot)onderzoek en/of ervaring (vergelijkbare installaties die eerder zijn gebouwd) te worden bepaald. Een keuze voor, met name, backflush en crossflow zal vooraf dienen te worden gemaakt bij de bouw van de installatie.

Bij de overige operationele aspecten wordt aandacht besteed aan de procesparameters, die van invloed zijn op het goed functioneren van membraanprocessen.

4.1.1. Concentratiepolarisatie

Concentratiepolarisatie treedt op indien één of meer van de in de voedingsstroom aanwezige componenten door het membraan worden tegengehouden. Als de aanvoer van deze component naar het membraanoppervlak sneller is dan het terugtransport naar de 'bulk' van de voeding, dan vindt een ophoping van deze componenten aan het membraanoppervlak plaats. Dit belemmert de doorstroming van het permeaat. Vooral bij ontzoutingsprocessen (omgekeerde osmose) leidt dit tot een lokaal hogere osmotische druk, welke door een hogere transmembraandruk moet worden overwonnen ten koste van de energie-efficiëntie.

In tegenstelling tot membraanvervuiling is concentratiepolarisatie reversibel. Met andere woorden indien de voeding wordt vervangen door water worden de originele flux- en retentiewaarden hersteld.

4.1.2. Membraanvervuiling

Membraanvervuiling treedt op als bestanddelen uit de 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. Als gevolg hiervan neemt de energie-efficiëntie van het membraanproces af.

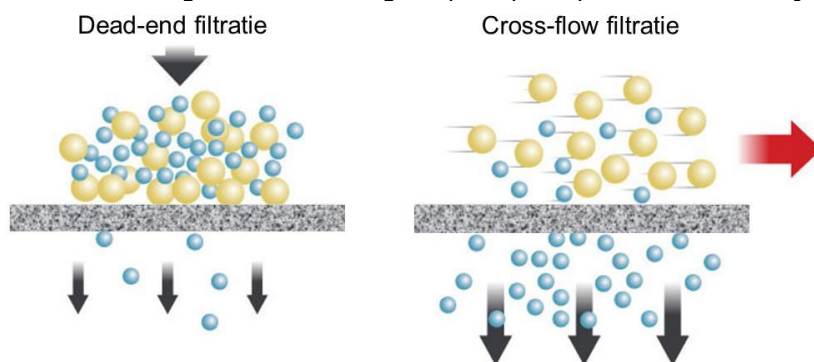
Bij membraanvervuiling wordt onderscheid gemaakt in vier typen vervuiling, zijnde (i) *colloïdaal* (o.a. silica, ijzer- en aluminiumoxiden), (ii) *scaling* (o.a. calciumcarbonaat en -sulfaat), (iii) *organisch* (o.a. olie, vetten, eiwitten) en (iv) *biologisch* (door bacteriële groei). Elk type vervuiling vraagt om zijn eigen aanpak; voor een overzicht wordt verwezen naar de literatuur [3, 10].

4.2. Aanpassingen in de procesvoering

Vervuiling kan worden bestreden door aanpassing van de procesvoering. Hiervoor zijn verschillende opties mogelijk, die hieronder worden besproken. Voor verdere informatie over aanpassingen in procesvoering, membraanreiniging en andere methoden voor het voorkomen van vervuiling wordt verwezen naar het artikel van Franken [3].

4.2.1. Cross-flow

Bij cross-flow wordt de voeding met hoge snelheid langs het membraan geleid waardoor er een continue verversing van voeding aan het membraanoppervlak optreedt. Energetisch is dit proces ongunstig aangezien alle energie die in het langstromen wordt gestopt in principe niet effectief bijdraagt aan de filtratie.



Figuur 6: Schematische weergave van dead-end filtratie en cross-flow filtratie

4.2.2. Turbulentiepromotors

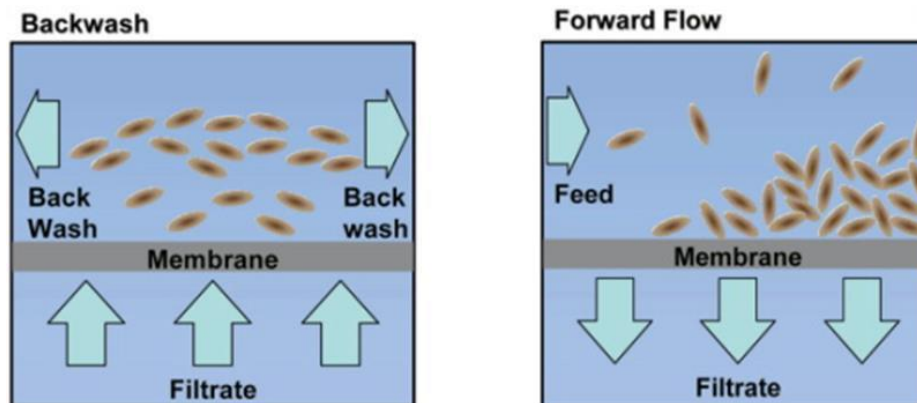
Turbulentiepromotors of 'static mixers' dragen bij aan een betere verversing van het membraanoppervlak. Dit effect treedt onder andere op bij de feed-flow spacers in spiraalgewonden membranen. Een nadeel van het toepassen van turbulentiepromotors is het toenemen van de drukval over de module.

4.2.3. Backflush/backwash/backshock

Bij deze procesuitvoering wordt de vervuiling die zich heeft afgezet op het membraan periodiek teruggespoeld. Dit proces wordt vaak toegepast indien een filterkoek zich afzet op het membraan. Het *terugspoelen* van de filterkoek wordt dan uitgevoerd met permeaat, waarbij een deel van het product (permeaat) verloren gaat.

4.2.4. Forward flow

Dit is een methode die, onder andere, wordt toegepast bij het bereiden van drinkwater of proceswater bij omgekeerde osmose. Hierbij wordt aan de voedingszijde van het membraan periodiek bij lagere druk een hogere snelheid in de membraanmodules gecreëerd om mogelijke aanslag weg te spoelen. Deze procedure is kort en geeft een minimale verstoring van de procesvoering.



Figuur 7: Schematische weergave van backwash (4.2.3) en forward flow (4.2.4)

4.2.5. Speciale uitvoeringen

Voorbeelden van speciale uitvoeringen zijn roterende- en vibrerende membraansystemen. Bij beide systemen zijn de afschuifkrachten aan het membraanoppervlak meer dan het tienvoudige dan bij cross-flow filtratie. Hierdoor vindt een continue verversing aan het membraanoppervlak plaats waardoor het effect van concentratiepolarisatie en membraanvervuiling drastisch wordt verminderd. De energiebehoefte van dergelijke systemen is vaak beduidend lager dan bij cross-flow systemen. Het nadeel van dergelijke systemen zijn de hoge investeringskosten en de speciale bouw (minder compact) van dergelijke systemen. Voor geselecteerde toepassingen kunnen deze systemen echter een uitkomst bieden [3].

4.3. Membraanreiniging

Eén van de belangrijkste onderdelen van het onderhoud van een membraaninstallatie is het periodiek reinigen van de membraaninstallatie. Hierbij is het belangrijk dat de installatie als geheel wordt gereinigd (dus ook pompen en leidingwerk) en niet alleen de membraanmodule. Het uitvoeren van een reiniging kan op verschillende manieren, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen preventieve en curatieve methoden.

4.3.1. Preventieve methoden

Onder preventieve methoden valt het toevoegen van chemicaliën aan het proces. Het bekendste voorbeeld hiervan is de toepassing van zogenaamde 'anti-scalants' bij omgekeerde osmose ter voorkoming van het neerslag van calciumzouten aan de voedingszijde.

Daarnaast wordt bij micro- en ultrafiltratie soms gebruik gemaakt van filtratiehulpmiddelen (floculanten) ter verbetering van de flux en selectiviteit. Deze worden met name toegepast bij drinkwaterbereiding. Voor beide methoden geldt dat het toepassen van chemicaliën met 'beleid' dient te geschieden. Overdosering kan vaak een negatief effect hebben vanwege het vormen van gelachtige deeltjes die dan op zich een vervuilend effect hebben. Goede doseersystemen zijn hierbij onontbeerlijk. Een voordeel ten opzichte van de curatieve reiniging is dat het membraanproces niet hoeft te worden onderbroken voor het toepassen van anti-scalants of filtratiehulpmiddelen.

4.3.2. Curatieve methoden

Periodieke (chemische) reiniging met specifieke (membraan)reinigingsmiddelen is een noodzakelijkheid voor het onderhoud van membraaninstallaties.

Het reinigen van een membraaninstallatie is in feite vergelijkbaar met het doen van de was. Zoals voor verschillende typen kleding (katoen, wol, zijde, etc.) en verontreinigingen verschillende wasmiddelen en wasprogramma's nodig zijn, zo zijn voor verschillende membraanmaterialen (celluloseacetaat, polyamides, polypropyleen, etc) verschillende reinigingsmiddelen en -processen nodig.

In het algemeen zijn bij het reinigen van membraaninstallaties de volgende parameters van belang:

- a. Reinigingsmiddel.
De keuze van het reinigingsmiddel hangt af van het membraanmateriaal en het type verontreiniging. In sommige gevallen kunnen meerdere stappen noodzakelijk zijn.
- b. Mechanische ondersteuning.
Goede mechanische ondersteuning in de vorm van hoge langstroomsnelheid bevordert reiniging. Bij buismembranen kunnen sponsbolletjes worden toegepast voor mechanische ondersteuning.
- c. Temperatuur.
De temperatuur van een reiniging wordt meestal bepaald door het type membraanmodule. Voor de meeste spiraalgewonden modules wordt een maximum temperatuur van 45°C aangegeven; een temperatuur van 35-40°C geeft voor de meeste middelen een goed resultaat. Bij keramische membranen kunnen hogere temperaturen en vaak ook extremere omstandigheden (bijvoorbeeld een hogere pH) worden gebruikt.
- d. Tijd.
Het liefst kiest men de duur van een reiniging zo kort mogelijk. Bij zware verontreinigingen kan het echter nodig zijn om langere tijden te hanteren. Daarom is het van het grootste belang om een reiniging tijdig uit te voeren. Te lange intervallen tussen reinigen resulteren in een slechtere membraanprestatie in het laatste deel van het interval én een langere reinigingstijd (geen productie mogelijk).

4.3.3. Installatie als geheel beschouwen

Bij het reinigen van een membraaninstallatie is het belangrijk de installatie als geheel te beschouwen. Vaak wordt bij het reinigen de aandacht gelegd op het reinigen van het membraan en vergeet men de (toevoer)leidingen en de pompen. Op het moment dat het proces na de reiniging weer in gebruik wordt genomen, komen de verontreinigen direct weer in het membraansysteem terecht. Vooral bij bacteriële verontreinigingen is het van belang een goede desinfectie uit te voeren. Indien dit niet gebeurt, is het effect van membraanreiniging van korte duur. Bekende desinfectiemiddelen als chloorbleekloog zijn uitstekend geschikt voor het reinigen van toe- en afvoerleidingen van membraansystemen. Let hierbij wel op dat de membranen niet altijd geschikt zijn om met oxidatieve middelen te reinigen. De meeste micro- en ultrafiltratiemembranen kunnen wel met deze middelen worden gereinigd; de meeste nanofiltratie en omgekeerde osmose membranen zijn juist niet geschikt om met oxidatieve middelen (zoals bijvoorbeeld chloorbleekloog) te desinfecteren. Vaak loont het zich om een membraan(reinigings)specialist in te schakelen om een optimale reinigungsstrategie uit te stippelen. Een overzicht van leveranciers van membraanreinigingsmiddelen wordt gegeven in de bijlages van de literatuurstudie van Cornelissen [11].

4.4. Energetische aspecten

Hoewel membraanfiltratie in de regel relatief energiegunstig is, zijn er toch een aantal (operationele) aspecten die men dient te betrachten. De meeste aspecten hebben te maken met de concentratie-toename van de voeding en/of de opbouw van een vervuilingslaag op het membraan.

4.4.1. Crossflow versus (semi)dead-end (MF, UF)

In het geval van een relatief schone voeding, zoals bijvoorbeeld bij de bereiding van drink- of proces-water uit oppervlaktewater, kan dead-end filtratie worden toegepast. Ter voorkoming van vervuiling zijn terugspoel- en doorspoelprocedures ontwikkeld en worden soms ook modules met lucht doorgeblazen. Het energieverbruik voor microfiltratie (MF) of ultrafiltratie (UF) in een dergelijke toepassing bedraagt minder dan 0,1 kWh per m³ permeaat.

In sterk vervuilende voedingen of voedingen met een hoge concentratie aan vaste stof dient crossflow te worden toegepast. Het energieverbruik kan hierbij toenemen tot meer dan 10 kWh per m³ permeaat. In systemen voor mestverwerking zijn waarden in de orde van grootte van 15 kWh/m³ permeaat eerder regel dan uitzondering.

4.4.2. Nanofiltratie en omgekeerde osmose

Nanofiltratie en omgekeerde osmose worden vaak bedreven in een 'once-through' installatie. Hierbij wordt de voeding niet gerecirculeerd zoals bij cross-flow. Het energieverbruik bij nanofiltratie en omgekeerde osmose wordt dan vaak bepaald door de osmotische druk van voeding/retentaat.

Voor het bereiden van ultrapuur water uit kraanwater is het energieverbruik minder dan 1 kWh per m³ permeaat. Deze waarden nemen toe tot meer dan 10 kWh per m³ permeaat voor zeewaterontzouting vanwege de hoge osmotische druk van de voeding.

Voor toepassingen van voedingen met hogere viscositeit en/of hogere concentraties (bijvoorbeeld in de levensmiddelen- of chemische industrie) kan het energieverbruik ook aanzienlijk toenemen. De exacte waarde van het energieverbruik hangt sterk van de toepassing af.

4.4.3. Energie-efficiëntie 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 goed toe te passen als vervanging van, of als voorgeschakelde techniek 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; bij verder concentreren zal de hogere viscositeit van de in te dikken oplossing of slurry relatief meer energie zal vragen.

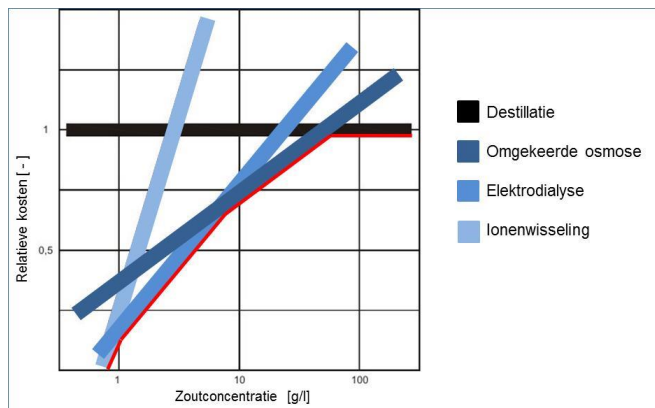
Als de bovenstaande waarde van het energieverbruik van membraanfiltratieprocessen wordt vergeleken met dat van indampingsprocessen wordt het grote verschil duidelijk. De verdampingswarmte van water bij 1 bar is 2260 kJ/kg en voor veel organische oplosmiddelen ligt de verdampingswarmte tussen 400 - 800 kJ/kg. Vooral door het combineren van voorconcentratie door membranen gevolgd door indampen kan dus een aanzienlijke energie-efficiëntie worden bereikt.

Bovengenoemde getallen zijn slechts geschikt voor een eerste benadering en optimalisatie van de procesvoering. Zoals eerder genoemd zal de viscositeit en temperatuur van de oplossing of slurry een grote invloed hebben op het energieverbruik 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-efficiëntie.

Bij de bereiding van drinkwater uit zeewater heeft in de afgelopen decennia een sterke verbetering en optimalisatie plaatsgevonden van zowel indampprocessen als membraanprocessen. 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.

4.4.4. Elektro-membraanprocessen

De elektromembraanprocessen (elektrodialyse en membraan elektrolyse) kunnen voor specifieke toepassingen en toepassingsgebieden een aanmerkelijke energiebesparing opleveren.



Figuur 8: Kostenvergelijking tussen diverse ontzoutingsprocessen

Voor het verwijderen van zouten uit processtromen is elektrolyse een energiezuinige technologie, indien lage concentraties zout aanwezig zijn. Bij zoutconcentraties lager dan 5 g/l is elektrolyse efficiënter dan omgekeerde osmose of indampen. Bij zeer lage concentraties (< 0,5 g/l) is ionenwisseling goedkoper. De verklaring hiervoor is, dat het stroomverbruik van elektrolyse recht evenredig is met de te verwijderen hoeveelheid ionen, terwijl bij omgekeerde osmose en indampen water wordt verwijderd. Diffusie-dialyse is het membraanproces dat energetisch het gunstigst is. In dit proces zijn enkel twee kleine pompjes noodzakelijk voor het drukloos rondpompen van de voeding en het permeaat.

5. Aandachtspunten bij aanpassing of vernieuwing van installaties

In deze sectie worden een aantal aandachtspunten beschreven bij het vervangen of aanpassen van een bestaand proces. Dit kan zowel betrekking hebben op processen waar membraaninstallaties als andere scheidingstechnologieën worden toegepast.

a) De-bottlenecking.

Hierbij wordt een membraaninstallatie toegepast in een bestaand proces, waarbij een deelstroom wordt behandeld met een membraansysteem. Zowel voor waterige stromen als voor organische oplosmiddelen zijn deze technieken goed toe te passen als voorgeschakelde techniek bij bijvoorbeeld indampprocessen om oplosmiddel terug te winnen en voorconcentratie van een productstroom te bewerkstelligen. Hiermee kan met een geringe investering de capaciteit van een bestaand proces worden vergroot.

b) Beschouw de gehele scheiding.

Bij vervanging van bestaande processen dient de gehele scheidingstrein te worden beschouwd vanaf de eerste filtratie tot de laatste fractionering. Alleen hiermee kan een optimaal scheidingsresultaat worden bereikt. Een veelgemaakte fout is om te proberen elke scheidingsstap apart te optimaliseren, bijvoorbeeld door te streven naar een hoog droge-stofgehalte van een filtraat. Hierdoor ontstaat vaak een filtraat wat sterker is verontreinigd en voor problemen zorgt in de nageschakelde stappen.

6. Aandachtspunten bij bestaande membraaninstallaties

De meeste aandachtspunten bij bestaande installaties zijn aan de orde gekomen bij het hoofdstuk 'vuistregels'. Enkele punten die specifiek van toepassing zijn op het bedrijven van een bestaande membraaninstallatie, zijn:

- *Membraanprestaties monitoren en, indien nodig, tijdig ingrijpen.*

Het monitoren van membraanprestaties flux en scheidingsrendement is voldoende. Vooral een afname van de flux als functie van de tijd is hierbij belangrijk. Dit is vaak een indicatie dat er vervuiling is opgetreden. Methoden van ingrijpen zijn, onder andere, toepassing van een antiscalant (eventueel aanpassen van de dosering). Voor een overzicht wordt verwezen naar de literatuur [10, 3].

- *Op tijd reinigen.*
Wacht vooral niet te lang met het uitvoeren van een reiniging. Tijdig reinigen gaat sneller en is uiteindelijk veel goedkoper. Bovendien kost het bedrijven van een vervuilde membraaninstallatie aanmerkelijk meer energie.
- *Laat eventueel een extra module plaatsen.*
Voor installaties die 'op de top van hun kunnen draaien' kan het handig zijn een extra membraanmodule te laten inbouwen. Het komt namelijk regelmatig voor dat bij uitbreiding van de productie een membraaninstallatie meer moet gaan leveren. Vaak wordt de installatie dan extra belast. Door een extra module te plaatsen kan dan meer product worden gemaakt tegen lagere pompkosten. De kosten van het plaatsen van een extra module zijn in de regel relatief laag.
- *Vraag een membraan(reinigings)specialist.*
Een membraan(reinigings)specialist kan met u de installatie doorlopen en aanbevelingen doen voor optimalisatie van de installatie en de procesomstandigheden.

7. Referenties

Dit is een publicatie van de Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO.nl).

In de periode 2000-2002 heeft de VNCI een reeks brochures uitgebracht onder de verzamelnaam 'Leidraad voor energie-efficiency'. Als onderdeel van de samenwerking met VNCI heeft RVO.nl een actualisatie van een deel van de documenten uitgevoerd. Deze Best Practice is een actualisering van het document 'Leidraad voor energie efficiency, Membraantechnologie'.

De huidige actualisering van de Best Practice is tot stand gekomen in het kader van meerjarenafspraken energie-efficiëntie MJA3 en MEE en met medewerking van Membraan Applicatie Centrum Twente (MACT). De meerjarenafspraken energie-efficiëntie MJA3 en MEE zijn overeenkomsten tussen de overheid en bedrijven, instellingen en gemeenten. Het ministerie van Economische Zaken (EZ), het ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties (BZK) en het ministerie van Infrastructuur en Milieu (I&M) stimuleren met deze afspraken het effectiever en efficiënter inzetten van energie. De Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO.nl) is verantwoordelijk voor de uitvoering van de meerjarenafspraken.

Naast documentatie van leveranciers en fabrikanten is gebruik gemaakt van de volgende publicaties:

1. M.H.V. Mulder; Basic Principles of Membrane Technology; Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1991.
2. M. Mulder; 'Energy Requirements in Membrane Separation Processes'. In: J.G. Crespo and K.W. Böddeker (eds.). 'Membrane Processes in Separation and Purification', Kluwer (1998), p. 445-475.
3. A.C.M. Franken; Prevention and Control of Membrane Fouling: Practical Implications and Examining Recent Innovations; DSTI report 2009. <http://www.ispt.eu/media/CS-01-02-Final-report-Prevention-and-reduction-of-membrane-fouling.pdf>
4. Solsep; Nanofiltratie voor het terugwinnen van oplosmiddelen; www.solsep.com
5. Elektrodialyse; <http://www.aquanederland.nl/Afvalwaterportal/Zuiveringstechnieken/Elektrodialyse>
6. Blue Energy; <http://www.deafsluitdijk.nl/projecten/blue-energy/>
7. Pervatech; www.pervaporation-membranes.com
8. M. Drummond et al.; Technological Evolution of Membrane Oxygenators; Braz J Cardiovasc Surg 2005; 20(4): 432-437; http://www.scielo.br/pdf/bjcv/v20n4/en_27921.pdf
9. A.C.M. Franken & J.P.P. Tholen; Hergebruik van anodiseerbade bij MIFA Aluminium; Novem project, 2001; www.mact.nl/reportanodiseerbade

10. L.Y. Dudley; Membrane Autopsies for Reversing Fouling in Reverse Osmosis; Membrane Technology 95 (1998) 9-12.
11. E. Cornelissen (KIWA); Membraanreiniging van NF/RO installaties, een literatuurstudie;
<http://www.kwrwater.nl/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=8521>

Kennisnetwerken:

- ISPT (Institute for Sustainable Process Technology); www.ispt.eu
- NL- GUTS (Netherlands Group of Users of Technology for Separation):
<http://www.rvo.nl/onderwerpen/tools/kennis/kennisnetwerken/nl-guts>

Colofon

Dit is een publicatie van:

Rijksdienst voor Ondernemend Nederland
Prinses Beatrixlaan 2 | 2595 AL Den Haag
Postbus 93144 | 2509 AC Den Haag
T +31 (0) 88 042 42 42
F +31 (0) 88 602 90 23
E info@rvo.nl
www.rvo.nl

Deze publicatie is tot stand gekomen in opdracht van het ministerie van Economische Zaken (EZ) het ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijkrelaties (BZK) en het ministerie van Infrastructuur en Milieu (I&M)

© Rijksdienst voor Ondernemend Nederland | augustus 2015
Publicatienummer: RVO-202-1501/RP-DUZA

De Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO.nl) stimuleert duurzaam, agrarisch, innovatief en internationaal ondernemen. Met subsidies, het vinden van zakenpartners, kennis en het voldoen aan wet- en regelgeving. RVO.nl werkt in opdracht van ministeries en de Europese Unie.

RVO.nl is een onderdeel van het ministerie van Economische Zaken.

Hoewel deze publicatie met de grootst mogelijke zorg is samengesteld kan RVO.nl geen enkele aansprakelijkheid aanvaarden voor eventuele fouten.