

Szemelvények a Vegyipari műveletek II. jegyzetből a Környezetbarát eljárások tárgyhoz

1.9. Membránszeparációs műveletek (Mizsey Péter, Cséfalvay Edit)

1.9.1. Bevezetés

A membrán szó latin eredetű, jelentése héj, hártya. Első közelítésként mindenkinek a sejtmembrán jut eszébe, amely az élőlényeket alapjaiban felépítő sejteket határolja. A vegyészmérnöki gyakorlatban azonban a membrán egy természetes, vagy mesterséges eredetű permszelektív gát két fázis között, amely egy adott komponens számára átjárható (permeabilitás), míg a többi komponenst visszatartja (szelektivitás), és ezáltal komponensek elválasztását valósítja meg.

A membránszeparáció olyan nem-egyensúlyi elválasztási műveletek összességét jelenti, amelyekben a membrán, szelektív válaszfalként, a komponensek kémiai átalakulása nélküli szétválasztást tesz lehetővé. Az adott membránszeparációs művelettől, az elválasztandó komponensektől és a műveleti paramétereiktől függően a membrán aktív vagy passzív résztvevője az anyagtranszportnak, de mindenképpen közbenső fázisként van jelen a két fázis elválasztásakor. Ez a megfogalmazás összhangban van a European Society of Membrane Science and Technology, *ESMST*, azaz az Európai Membrántudományi és Technológiai Társaság terminológiájával (Fonyó és Fábry, 1998).

1.9.2. A membránok csoportosítása



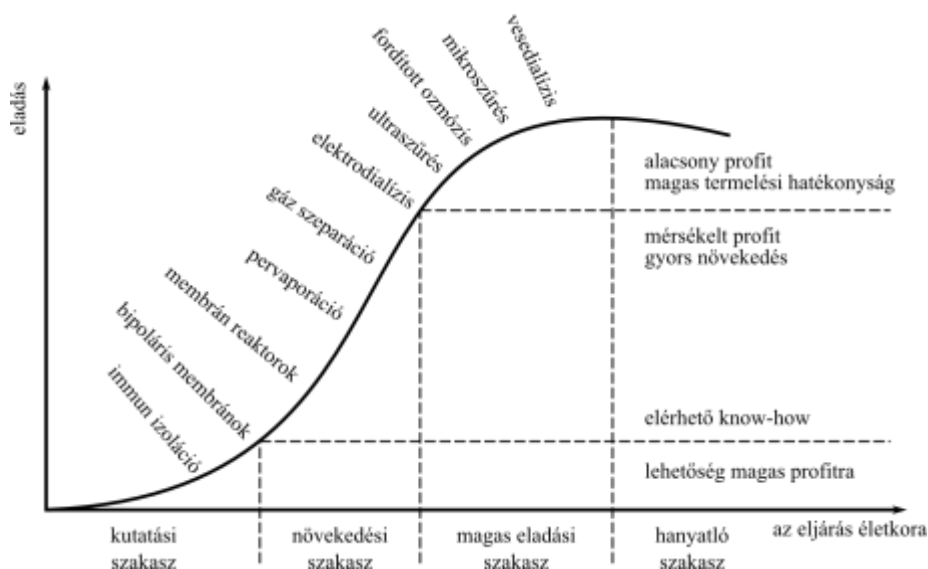
1.9.1. ábra. A membránok csoportosítása

A membránok eredetét tekintve az alábbi csoportosítás írható fel (1.9.1. ábra). A membránok elsősorban szilárd halmazállapotúak, és eredetük alapján csoportosíthatjuk őket, mint természetes és mesterséges membránok. A vegyiparban szintetikus membránokat alkalmaznak, amelyek lehetnek szerves és szervetlen alapúak egyaránt. A nagy nyomást és hőmérsékletet igénylő membránműveleteknél fontos a mechanikai és kémiai stabilitás, ezért főként kerámia- vagy fémmembránokat, a jobb szelektivitás érdekében felületkezelt, felületmódosított kerámia- vagy fémmembránokat alkalmaznak. Moderált körülményeket igénylő műveletek esetén többnyire polimer membránokat alkalmaznak. A polimer membránok közül a legelterjedtebbek a cellulóz-nitrát, poliszulfon, poliéter-szulfon, regenerált cellulóz, poliamid, polivinilidén-fluorid, akril, poliakril-nitril, polivinil-alkohol.

A polimer membránok a finomabb elválasztást lehetővé tevő membránszeparációs eljárásoknál alkalmazott membránok, úgynevezett **kompozit membránok**, amelyek két rétegből állnak: egy vékony, szelektív aktív rétegből, és egy robusztusabb, pórusos támasztórétegből. A felső, vékony aktív réteg jelenti a membránra táplált oldat áthaladásának áramlási ellenállását, és ez valósítja meg a szelektív elválasztást, míg a támasztóréteg a kompozit membrán mechanikus stabilitását biztosítja (Fonyó és Fábry, 1998).

1.9.3. Membránműveletek életciklusa

Az 1.9.2. ábra mutatja az egyes membránműveletek életciklusát, vagyis azt, hogy jelenleg a különböző membránműveletek a fejlesztés, illetve a fejlettség, valamint az eladás milyen stádiumában vannak.



1.9.2. ábra. A membránműveletek fejlettsége és eladási volumene

Látható, hogy a széles körben alkalmazott membránműveletek, mint pl. membránszűrések, már kidolgozottak, meglehetősen elterjedtek és szerényebb profittal árulják ezeket. Ugyanakkor pl. a pervaporáció a növekedés fázisában van, kisebb az eladási volumen, de nagyobb haszonnal adhatók el.

Ez a görbe tulajdonképpen minden termékre, nemcsak a membránműveletekre, illetve membránberendezésekre igaz. Általánosságban mondva a még kevésbé hozzáférhető, kevésbé elterjedt technológia alkalmazásával előállított termékek eladásával nagyobb haszon érhető el, mivel a gyártó cég monopolhelyzetben van. Ugyanakkor azt, amit már sokan gyártanak, már csak szerényebb haszonnal lehet eladni. Egy bizonyos piaci telítettség után pedig hanyatlás következik be az eladásokban.

1.9.4. Membránszeparációval kapcsolatos alapfogalmak

A membránszeparációs műveletek részletesebb tárgyalásához meg kell ismerkednünk a membránműveletek terén honos terminológiával, ezért ebben az alponban az alapfogalmak ismertetése kerül sorra.

Permeát, permeátum

A membránon átment anyagáramot permeátnak, permeátumnak, membránszűrés esetén szűrletnek nevezzük.

Retentát, retentátum

A membrán betáplálásoldalán visszamaradt anyagot retentátnak, retentátumnak, membránszűrés esetén koncentrátumnak nevezzük.

Fluxus

A membrán egységnyi felületén egységnyi idő alatt a membránon keresztüláramlott anyagmennyiség, tömeg vagy térfogat.

Általánosságban jele J . Meghatározása történhet az alábbi összefüggések alapján:

$$J_v = \frac{1}{A} \cdot \frac{dV}{dt}, \quad (1.9.1)$$

$$J_m = \frac{1}{A} \cdot \frac{dm}{dt}, \quad (1.9.2)$$

$$J_{n,i} = \frac{1}{A} \cdot \frac{dn_i}{dt}, \quad (1.9.3)$$

ahol A a membrán felülete (m^2),
 V a permeátum térfogata (m^3),
 m a permeátum tömege (kg),
 n a permeátum i komponensének mólszáma (mol).

Ezek szerint megkülönböztetünk térfogatáram, tömegáram, illetve anyagáram alapján számolt fluxust.

Transzmembránnnyomás (Δp vagy TMP)

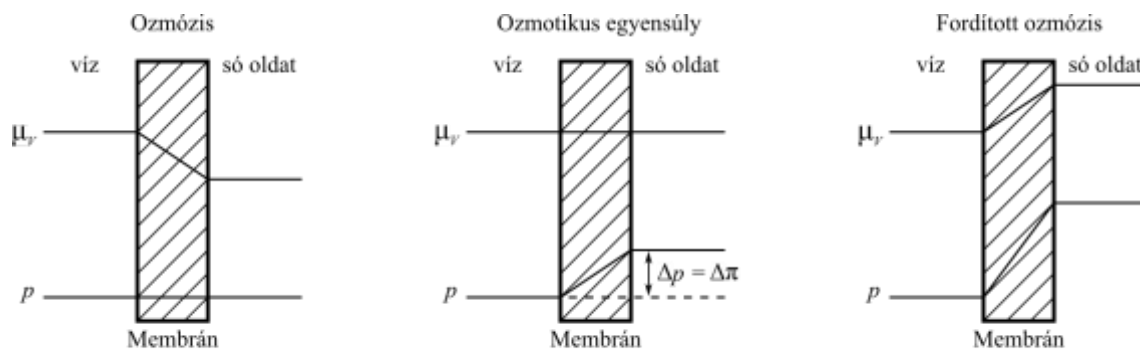
A membrán betáplálás-és permeátoldalán mért átlagos nyomások közti különbség. A membrán felületétől, a modul kialakításától függően nyomásesés lép fel a belépő áram és a betáplálásoldalt elhagyó retentátum között is, ezért a transzmembránnnyomás az alábbi képlet segítségével számítható.

$$\text{TMP} = \frac{p_f + p_r}{2} - p_p, \quad (1.9.4)$$

ahol $(p_f + p_r)/2$ a betáplálásoldal átlagos nyomása (Pa),
 p_p a permeátoldali nyomás (Pa).

Ozmózis

Az ozmózis, ozmotikus egyensúly és fordított ozmózis jelenségét mutatja be az 1.9.3. ábra. Ha egy membránnal elválasztunk egy sóoldatot tiszta víztől, akkor a tiszta víz átáramlik a membránon a két oldal közötti kémiai potenciál különbség miatt. Ez az ozmózis jelensége. (A membrán permszelektivitását az adja, hogy amíg az oldott anyagot visszatartja, addig a víz képes átáramlani rajta.) Ha a sóoldatra a sóoldat ozmózisnyomásával megegyező nagyságú nyomást gyakorolunk, akkor megállíthatjuk a tiszta víz oldaláról a víz átáramlását. Ez a jelenség az ozmotikus, avagy ozmózisegyensúly. Ha a sóoldat felől az ozmózisnyomásnál nagyobb nyomást gyakorolunk, akkor ozmózis iránya megfordítható, azaz a sóoldatból vízmolekulákat tudunk átnyomni a tiszta víz oldalra. Ez az úgynevezett fordított vagy reverz ozmózis (Bélafiné, 2000).



Feltételezve, hogy a víz tökéletesen szelektív, csak a víz kémiai potenciálját mutatjuk be
 μ_v : víz kémiai potenciálja, p : nyomás, π : ozmózisnyomás

1.9.3. ábra. Ozmózis, ozmotikus egyensúly és fordított ozmózis jelensége

Visszatartás (R)

A membrán szelektivitásának köszönhetően a permeát egy adott komponensben szegényedik, míg a retentát dúsul. A visszatartás mértékét a kiindulási és a permeátumkoncentráció ismeretében az alábbi képlettel számoljuk:

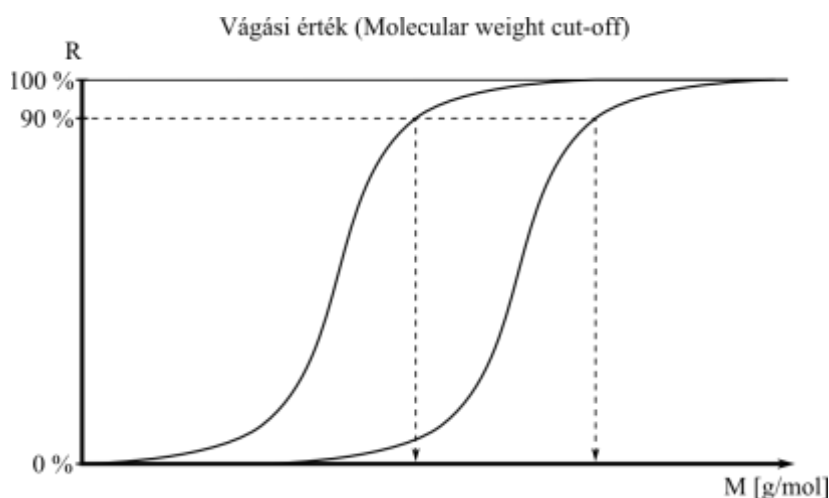
$$R = \frac{c_f - c_p}{c_f} = 1 - \frac{c_p}{c_f}, \quad (1.9.5)$$

ahol c_p a permeátum koncentrációja (mol/m³),
 c_f a betáplálás koncentrációja (mol/m³).

A visszatartást %-ban is meg lehet adni.

Vágási érték (Molecular weight cut-off)

A vágási érték, definíció szerint, az a molekulatömeg, amelyet a membrán 90%-ban visszatart. A vágási értéket célszerű fenntartásokkal kezelni, hiszen ha megnézzük az 1.9.4. ábrát, arról jól látható, hogy egy membrán visszatartása egy adott molekulatömeg-tartományban mozog. Léteznek éles vágási értékkel rendelkező membránok, amelyeknél a visszatartott molekulák tömege egy szűk tartományon belül mozog, azonban léteznek „diffúz” vágási értékkel rendelkező membránok, amelyeknél ez a tartomány kiszélesedik (Bélafiné, 2000).



1.9.4. ábra. A vágási érték: a visszatartás ábrázolása a visszatartott vegyületek móltömegének függvényében

Besűrítési érték/arány (Volume reduction factor=VRF)

$$\text{VRF} = \frac{V_f}{V_r}, \quad (1.9.6)$$

ahol V_f a kiindulási oldat térfogata (m³),
 V_r a retentát térfogata azonos mértékegységben (m³).

Tisztavíz-áteresztő képesség (Pure water permeability)

Tiszta oldószer jelenlétében a transzmembrán nyomás növelésével a permeátum térfogati fluxusa arányosan növekszik, amely alapján az feltételezhető, hogy a membrán egy ideális pórusos közeg. Az arányossági tényező (L_p) az úgynevezett hidraulikus permeabilitási tényező, amely a membrán saját valódi karakterisztikájától függ, mint például porozitás, pórusméret-eloszlás, vastagság és hidrofil jelleg. Ez a paraméter jelenti azt az oldószer-térfogatot, amely áthalad a membrán adott felületén, adott idő alatt. Desztillált vízzel végzett kísérlet alapján a membrán permeabilitása a Darcy-egyenlet alapján számítható.

$$J_v = \frac{L_p \cdot \Delta p}{\eta} = \frac{\Delta p}{\eta \cdot R_m}, \quad (1.9.7)$$

ahol J_V az oldószer térfogatáram-sűrűsége ($\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$),
 L_p a membrán hidraulikus permeabilitása (m),
 η a tiszta oldószer dinamikai viszkozitása ($\text{Pa}\cdot\text{s}$),
 Δp transzmembránnyomás (Pa),
 R_m a membránellenállás ($1/\text{m}$).

A membrán permeabilitási koefficiensének méréséhez szükséges a térfogatáram-sűrűség mérése különböző nyomásokon. Ha az alkalmazott nyomások függvényében ábrázoljuk a fluxusokat, egy origóból induló egyenes vonalat kell kapnunk addig a nyomásértékig, amíg a limitáló fluxust el nem érjük. A linearitástól való eltérés oka lehet a membrán kompressziója vagy szennyező komponensek jelenléte. Az (1.9.7) egyenletből jól látszik, hogy a hidraulikus permeabilitás a membrán ellenállásának reciprokértéke.

Limitáló fluxus

A membránszűrés egyik jellemzője a limitáló fluxus. Az a maximális fluxus, amely adott kiindulási oldat membránszűrése esetén érhető el, és nem növelhető tovább a transzmembránnyomás növelése esetén sem.

Porozitás és tortuozitás

Ezen két paraméter a pórusos mikroszűrő, ultraszűrő és nanoszűrő membránokra jellemző érték. Fontos, hogy ezen értékeket együtt kezeljük, hiszen azonos porozitású membránok pórusainak kialakítása akár nagymértékben is különbözhet. Definíció szerint.

Porozitás (ϵ)=pórusok térfogata/test térfogata; átlagos porozitás: 0,3–0,7.

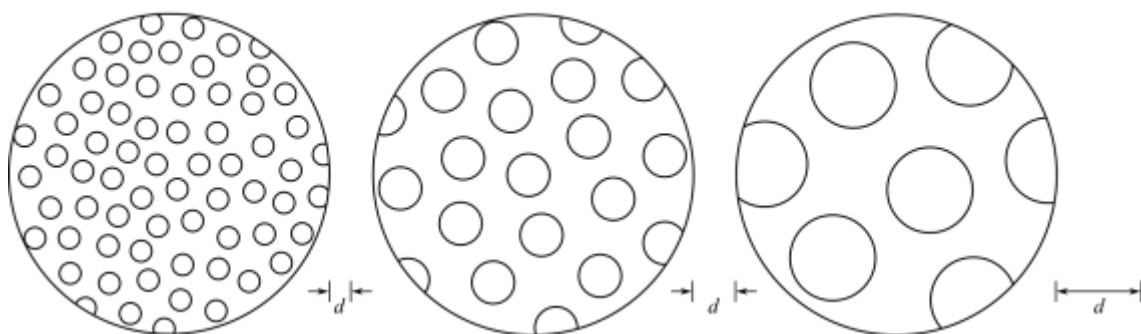
Tortuozitás (τ)=átlagos pórushossz/membrán vastagság (Baker, 2004).

A pórusátmérőt (d) különbözőképpen adják meg a különböző szűréseknél:

- mikroszűrésnél: legnagyobb molekula átmérője, amely áthatol a membránon,
- ultraszűrésnél: egy tartomány átlagos értéke.

Azonos porozitású membránok pórusmérete jelentősen különbözhet egymástól. Ezt szemlélteti az 1.9.5. ábra.

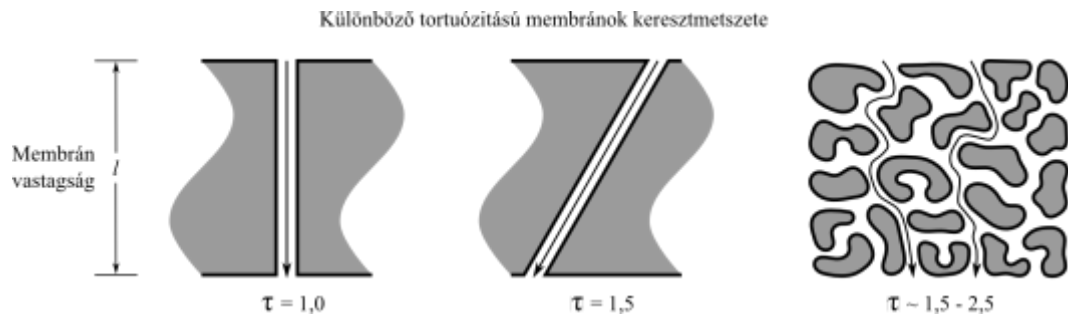
Azonos porozitású különböző pórusméretű membránok felületi képe



1.9.5. ábra. Azonos porozitású membránok pórusátmérőjének alakulása

Az 1.9.6. ábráról látható, hogy azonos tortuozitású membránok belső szerkezete nem feltétlenül azonos. Ideális esetben hengeres pórusokkal jellemezhetjük a membránokat, de valóságban szabálytalan mikropórusokból áll. A bal oldalon a membrán vastagságára merőleges egyenes hengeres pórus látható 1-es értékű tortuozitással, középen a membrán vastagságával merőlegestől eltérő szöveget bezáró pórus látható, amelynek tortuozitása 1,5. Az ábra jobb oldalán szabálytalan mikropórusokat

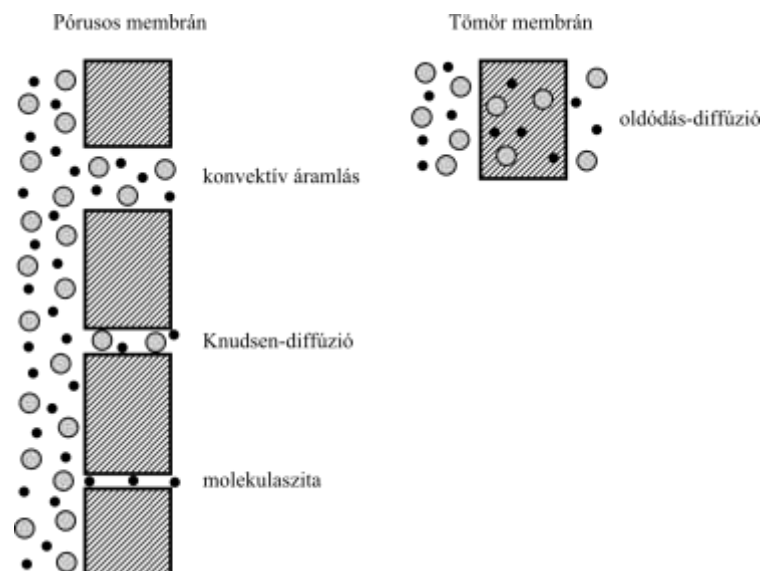
tartalmazó membrán keresztmetszeti képe látható, amelynek tortuozitása az 1,5–2,5 tartományban mozog.



1.9.6. ábra. Különböző tortuozitású membránok keresztmetszete

A permeáció mechanizmusai

Az 1.9.7. ábra mutatja a permeáció mechanizmusait.



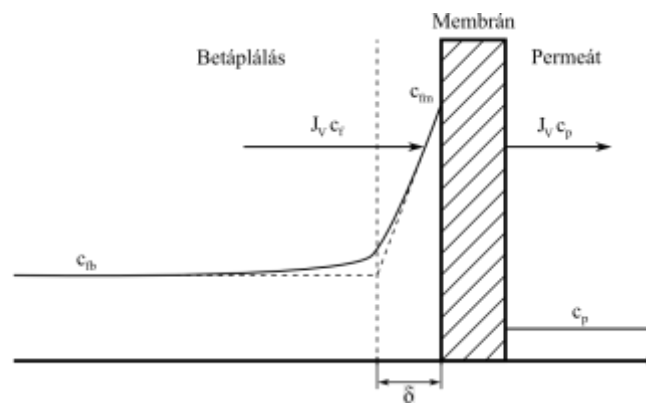
1.9.7. ábra. A permeáció mechanizmusai

Amint az az 1.9.7. ábráról látható, kis molekulák átjutása a membránon jelentősen függ attól, hogy a membrán pórusos, vagy sem. Pórusos membrán esetén a mechanizmus nagyban függ attól, hogy a molekula és a pórus mérete hogyan viszonyul egymáshoz.

Koncentrációpolarizáció membránszűrésnél

Koncentrációpolarizáció jelensége lép fel, ha például egy makromolekulákat tartalmazó oldatot szűrünk. Az oldószer áthalad a membránon, és ez a térfogatáram magával ragadhatja a makromolekulák egy részét ($J_V c_p$). A membrán felületén feldúsulnak a makromolekulák, koncentrációjuk folyamatosan növekszik mindaddig, amíg el nem éri az ún. gélképződési koncentráció szintjét és így kialakul a gélréteg. Ezért a membránfelületen kialakult határrétegben a membrántól távolodva egy csökkenő koncentrációprofil alakul ki. A membrán felületén kialakult maximális koncentráció, azaz a gélképződési koncentráció c_{fm} , a membrán és a makromolekula függvénye. A feldúsulás miatt koncentrációkülönbség lép fel a membrán felületén és a betáplálásoldal főtömege között mért koncentrációk között, és az oldószerárammal ellentétes irányú diffúzió indul meg. Jelentse J_c azt a komponensáramot, ami a membrán felé halad, de nem jut át a membránon.

A koncentráció-polarizációt szemlélteti az 1.9.8. ábra.



1.9.8. ábra. A koncentráció-polarizáció jelensége membránszűrésnél

A koncentráció-polarizáció, az anyagi tulajdonságok mellett, nagymértékben függ az áramlási viszonyoktól is.

Eltömődés (fouling)

Szimmetrikus pórusú mikroszűrő membránok esetén a pórusok belseje eltömődhet szűrés közben, amely fluxuscsökkenéshez vezet. Ultraszűrő membránok esetén a fluxuscsökkenést azonban nem ez okozza, hanem azok részecskék, amelyek már nem vesznek részt az anyagtranszportban, hanem feldúsulnak a membrán felületén, így csökkentve a membrán aktív szűrőfelületét és a fluxust. Azonban a koncentráció-polarizáció következményeként némely anyag irreverzibilisen lerakódik a membrán felszínén, amely eltömődést okoz. Az eltömődés jellemzésére szolgál az eltömődési ellenállás, amelyet a koncentráció-polarizáció szabályozásával lehet csökkenteni.

Szűrési típusok, áramlási/áramoltatási módok

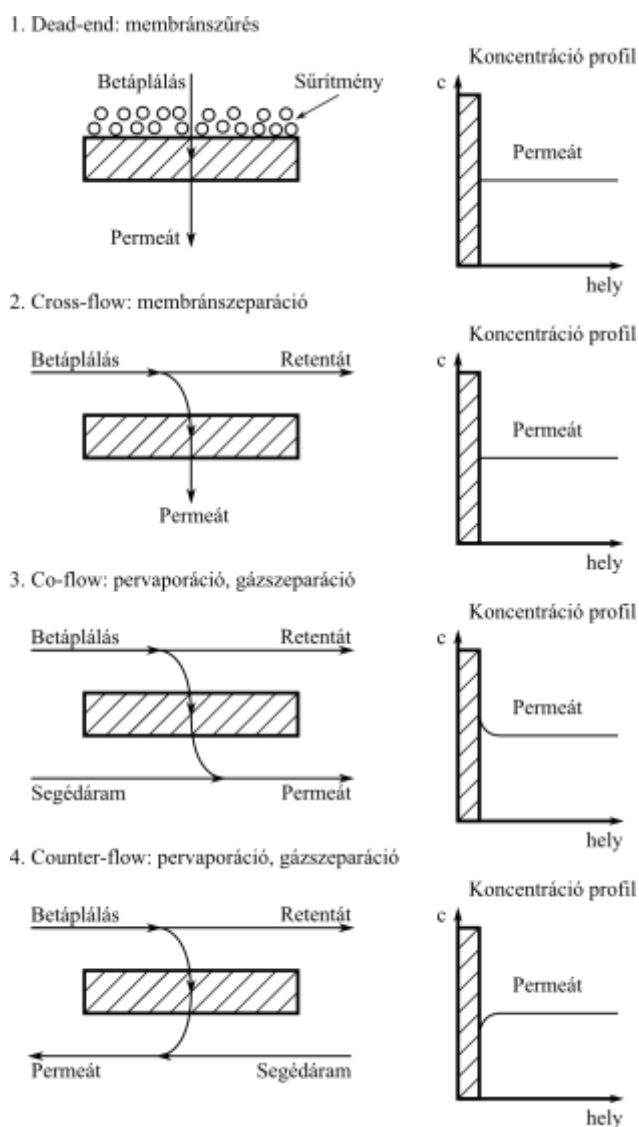
A membránszűrésnek alapvetően két típusa létezik: az úgynevezett dead-end (hagyományos) és az úgynevezett cross-flow (keresztáramú szűrés). Membránszűrésen kívüli membránszeparációs műveleteknél (ezen belül is elsősorban a gázszerációnál, gőzpermeációnál, illetve pervaporációnál) további két áramlási típus létezik: az úgynevezett co-flow (egyenáramú), és az úgynevezett counter-flow (ellenáramú) áramlás. Ezen megnevezések azt szemléltetik, hogy a tisztítandó anyag és a membránon áthaladt, tisztított permeátum a membrán felületére merőlegesen, vagy azzal párhuzamosan áramlik, és az alkalmazott segédáram (ha van) merre áramlik a tisztítandó áramhoz és a permeátumhoz képest. Az egyes áramlási típusokat mutatja be az 1.9.9. ábra.

Az 1.9.9. ábra 1. pontjában látható a dead-end szűrési típus leírása. Dead-end szűrés esetén a betáplálási áram a membrán felületére merőlegesen érkezik, a permeálódó komponensek permeátumként a membránon átjutva, szintén membránra merőleges irányban távoznak. Az összes betáplált oldatot túlnyomás segítségével átnyomják a membránon, és a kiszűrt részecskék a membrán felszínén vagy a membránban gyűlnek össze, amely így a hagyományos szűréshez hasonlóan egy plusz ellenállást, és plusz szűrőközeget hoz létre. A dead-end szűrés egy tipikusan szakaszos művelet, mivel az eltömődés miatt a fluxus szinte nullára csökken, és a membránt tisztítani kell.

Az 1.9.9. ábra 2. pontja szemlélteti a keresztáramú membránszeparáció megvalósítását. A cross-flow vagy keresztáramú szűrés szakaszos és folyamatos üzemmódban is megvalósítható művelet. A betáplálási áram a membrán felületével párhuzamosan áramlik, míg a permeálódó komponensek a membránra merőleges irányban távoznak. A betáplálás iránya egyben csökkenti a koncentráció-polarizáció kialakulásának valószínűségét, mivel a kiszűrt molekulák nem maradnak ott a membrán felszínén, hanem a betáplálási árammal lemosódnak a felületről. Emiatt egy hosszabb ideig megvalósítható szűrést lehet elérni, illetve a permeátum térfogatárama is időben sokkal kisebb csökkenést mutat, mint a hagyományos szűrés esetén.

Az alapvető különbség a dead-end és cross-flow szűrések között a kitermelés és membrán betáplálásoldalán visszamaradt anyagmennyiségek. A dead-end szűrés esetén a kitermelés közel száz százalék, hiszen az összes betáplált folyadék átmegy a membránon. Cross-flow szűrés esetén viszont a betáplált áram a membrán mellett áramlik, így a szűrlet mindössze húsz százaléka a betáplált anyagmennyiségnek. A kitermelés növelése érdekében a cross-flow szűrés esetén recirkulációt alkalmaznak.

A másik különbség a két szűrési mód között, hogy különböző az energiaigényük. A cross-flow szűrésnek sokkal nagyobb az energiaigénye, mint a dead-end szűrésnek, mivel a folyadéknak keresztül kell áramolnia a membránon, továbbá a recirkulációt biztosító szivattyúnak is van energiaigénye.



1.9.9. ábra. Áramlási típusok az egyes membránszeparációs műveleteknél

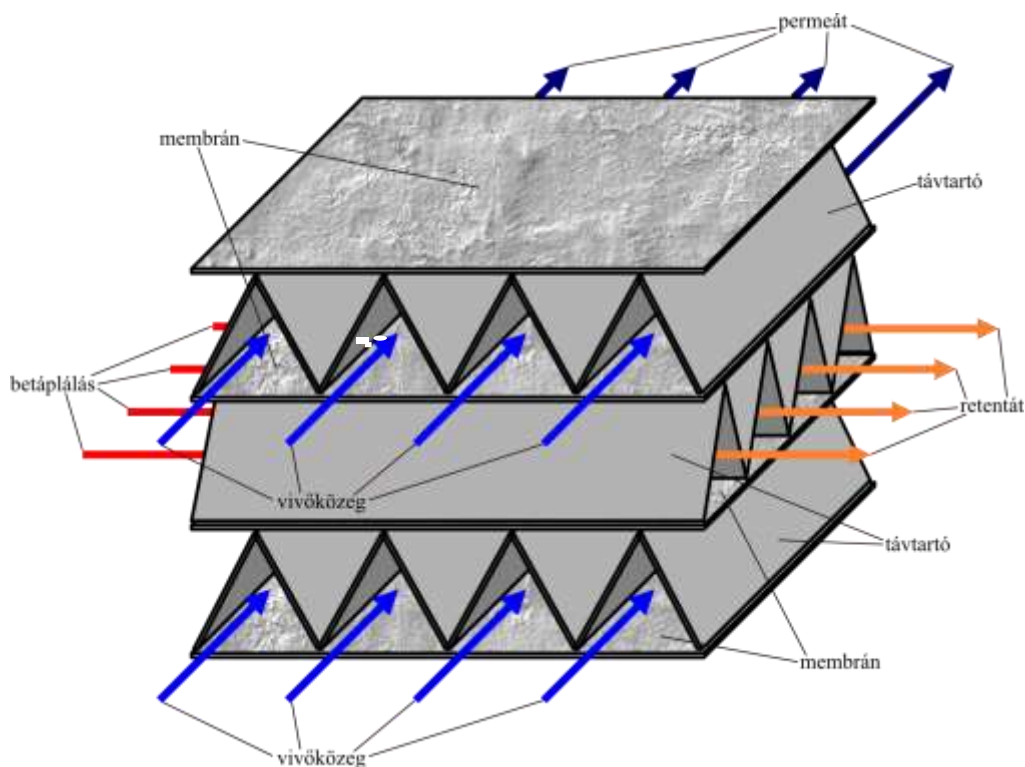
Gázszerparációnál, illetve pervaporációnál további kivitelezési módok lehetségesek. Gáz- és gőzhalmazállapotú komponensek permeálódása esetén a permeátoldalán vákuum alkalmazása helyett, inertgáz-áramlásos technikát is alkalmazhatnak. A betáplálásoldalán túlnyomáson érkező gázelegy egyes komponensei áthatolnak a membránon. A permeátoldalán áramló gázelegy úgymond elragadja magával a membrán permeátoldalára átdiffundált komponenseket. A permeátoldalán áramló inert gáz a betáplálási áramhoz képest egyen-, illetve ellenáramban is működhet, ezeket sorban co-flow (lásd 1.9.9. ábra 3. pont), illetve counter-flow (lásd 1.9.9. ábra 4. pontja) áramlásnak nevezzük (Baker, 2004).

Az áramlási viszonyok nagymértékben befolyásolják a membrán felületén kialakuló koncentráció-polarizációt.

Membránmodulok

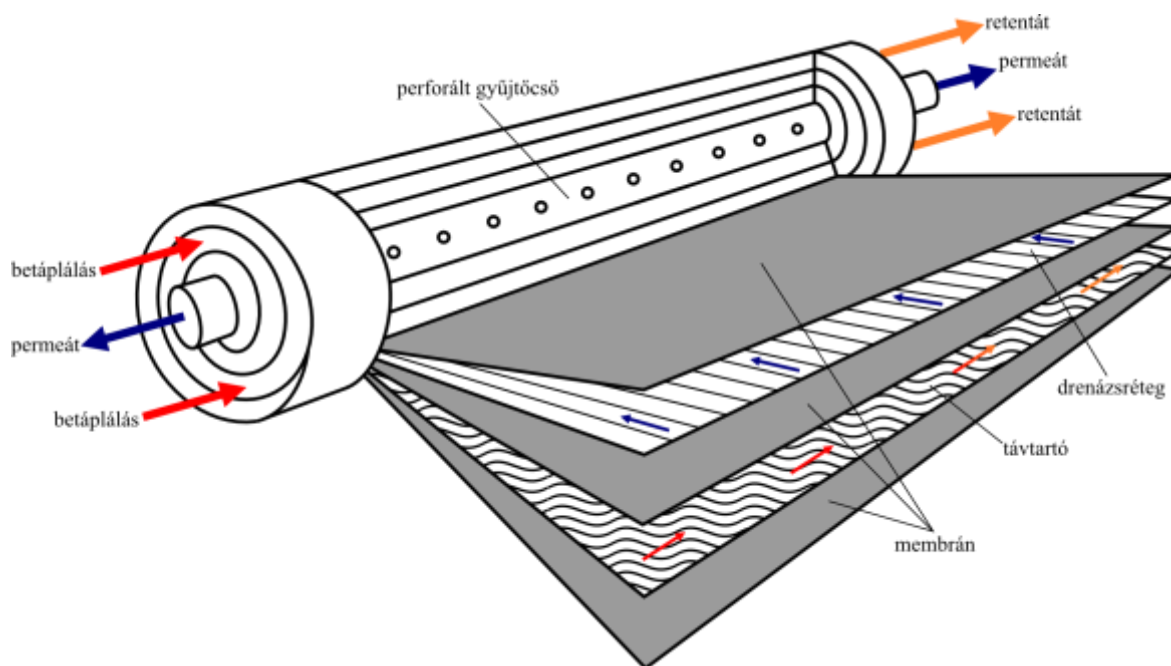
A membránszűrő egységeknek (moduloknak) több típusa ismeretes: a síkmembránt tartalmazó lapmembrán és spiráltekerceses modul, valamint a cső alakú membránokból álló cső-, kapilláris- és üregesszál-modul.

A **lapmembrán-modul** (plate-and-frame system) felépítése a szűrőpréshez, illetve a lemezes hőcserélőhöz hasonlít (1.9.10. ábra). A síkmembrán lapokat porózus hordozók (support plate) és távolságtartók (spacer) választják el egymástól. A betáplált oldat és a permeátum 0,5–1 mm magasságú csatornában áramlik, a koncentrátumoldali csatornában az áramlási sebesség elérheti a 2 m/s értéket is. A síkmembrán modulok hátránya, hogy viszonylag drágák, üzemeltetésük jelentős szivattyúzási energiát igényel. További hátrány, hogy kicsi a térfogategységre eső membránfelület nagysága, szerelésük nehézkes és időigényes.



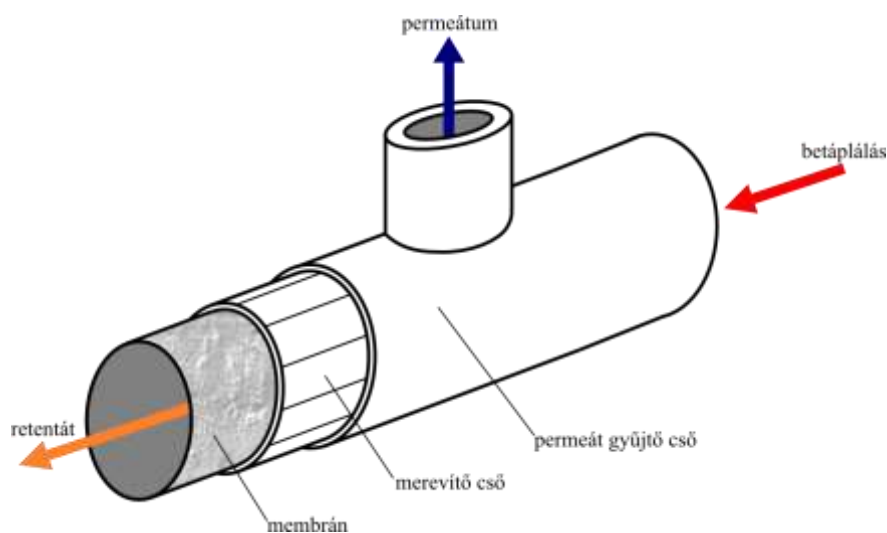
1.9.10. ábra. A lapmembrán (plate and frame) modul sematikus ábrája

A **spiráltekerceses** (spiral wound) modul felépítését az 1.9.11. ábra szemlélteti. E modul típusnál a szendvicsszerűen összerakott lapokat (membrán, távartó, szűrlet gyűjtőréteg) egy perforált cső köré tekerelik. A spiráltekerceses modult kompozit membránból készítik.



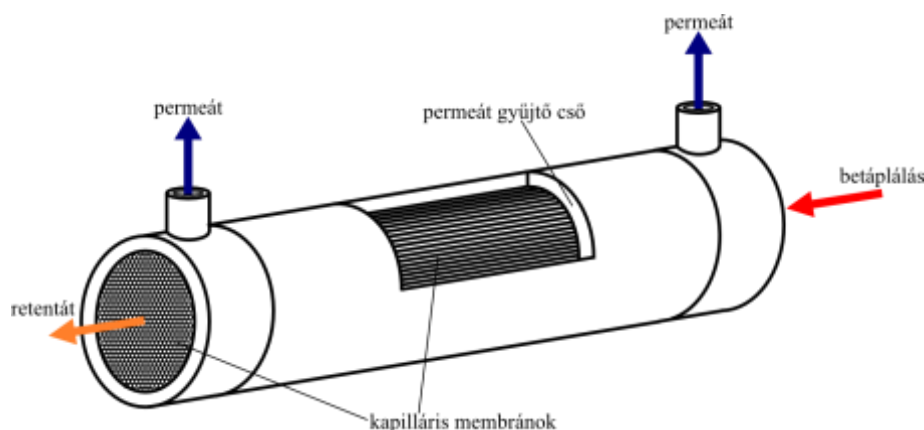
1.9.11. ábra. A spiráltekercs modul sematikus ábrája

Csőmembrán modul (tubular system) mutat be az 1.9.12. ábra. A csőmembránok belső átmérője 10–25 mm. Az áramlás a csőben turbulens, az áramlási sebesség 2–6 m/s. A viszonylag kis térfogategységre eső membránfelület ($20\text{--}500\text{ m}^2/\text{m}^3$) miatt csak szuszpenziók koncentrációja esetén gazdaságos a használatuk. A csőmembránok egyaránt használhatók fordított ozmózisra, ultra- és mikroszűrésre.



1.9.12. ábra. A csőmembrán modul sematikus ábrája

A **kapilláris modul** felépítése a csőkegyes hőcserélőhöz hasonlít, amelyet az 1.9.13. ábra szemléltet. A kapillárismembrán belső átmérője 0,5–4 mm. A kapilláris membránoknál nincs tartó vagy hordozó réteg, mint a sík- és csőmembránoknál, hanem maga a csőfal biztosítja a szükséges mechanikai szilárdságot. A falvastagság 120–180 μm . Az ilyen típusú membránoknál az üzemeltetési nyomás kisebb, mint pl. az azonos célra használt spiráltekercses modulnál, mivel mechanikai stabilitása kisebb (nincs hordozó réteg). Az alacsonyabb üzemeltetési nyomás sok esetben gazdaságosabb is, kisebb a szivattyúzási munka (Sawinsky és Deák, 2000).



1.9. 13. ábra. A kapilláris modul sematikus ábrája

1.9.5. Mikroszűrés

1.9.5.1. Bevezetés

A nyomáskülönbségen alapuló eljárások esetén a membránon keresztüli transzport hajtóereje a membrán betáplálás-és permeátoldala közötti nyomáskülönbség. A legtöbb esetben ennek megvalósítása a membrán betáplálásoldalán létrehozott túlnyomás segítségével történik, és a permeátoldalt pedig légköri nyomáson hagyják. Természetesen van lehetőség arra is, hogy a permeátoldalon vákuumot hozzunk létre, míg a betáplálásoldalon a szürendő oldat hidrosztatikai nyomása jelenti a többletnyomást. Ezen utóbbi megvalósítást főként a membrán bioreaktoroknál alkalmazzák (lásd az 1.9.17.2. fejezetet).

A nyomáskülönbségen alapuló eljárások közé soroljuk a mikroszűrést, ultraszűrést, nanoszűrést és fordított ozmózist. A membránszűrési műveletek jellemzőit az 1.9.1. táblázatban foglaltuk össze.

A nyomáskülönbségen alapuló eljárások alapvetően szűrési mechanizmus, más néven szitahatás elvén működnek, amely során a szétválasztás határát a membrán pórusmérete jelenti. Ezzel ellentétben a fordított ozmózis tisztán anyagátadási folyamat, amelyet az oldódás és a diffúzió határoz meg.

1.9.1. táblázat. A nyomáskülönbségen alapuló membránszeparációs eljárások összefoglalása

Művelet	Membrántípus	Hajtóerő	Mechanizmus	Alkalmazási terület
Mikroszűrés (MF)	Szimmetrikus mikropórusos, 1–10 μm	Hidrosztatikus nyomáskülönbség, 10–500 kPa	Szűrési mechanizmus	Steril szűrés
Ultraszűrés (UF)	Aszimmetrikus mikropórusos, 5–500 nm	Hidrosztatikus nyomáskülönbség, 0,1–1 MPa	Szűrési mechanizmus	Makromolekulák elválasztása oldatban
Nanoszűrés (NF)	Aszimmetrikus pórusos vagy bőrtípusú, 1–10 nm	Hidrosztatikus nyomáskülönbség, 0,6–4 MPa	Szűrési mechanizmus	Sűrítés, betöményítés
Fordított ozmózis (RO)	Aszimmetrikus bőrtípusú	Hidrosztatikus nyomáskülönbség, 2–10 MPa	Oldódás és diffúzió	Sók, mikro-részecskék elválasztása oldatban

1.9.5.2. Elméleti háttér

A mikroszűrés szűrési mechanizmuson alapuló, nyomáskülönbség hajtóerővel megvalósított membránszűrés. A mikroszűrő membránok pórusosak, legtöbb esetben szimmetrikus mikropórusokat tartalmaznak, amelyek méretüket tekintve 0,1–10 µm tartományban mozognak. Összehasonlításképp 0,1 µm megfelel 1000 Å átmérőjű részecskének, azaz pl. az influenzavírus méretének. Példaként említhető, hogy a ciroknövényben található keményítő átlagos granulátummérete 10,5 µm, amely kiszűrhető egy 10 µm pórusméretű mikroszűrő membránnal.

Fontos a pórusok egységes mérete, hiszen a membrán a legnagyobb pórusnál kisebb molekulákat nem tartja vissza megbízhatóan, csak az annál nagyobb molekulákat. A kisebb pórusok azonban lecsökkentik az áramlási sebességet. A Poiseuille-törvénynek megfelelően, ha egy pórus méretét annak 90%-ára csökkentjük, akkor a rajta keresztül menő áramlás sebessége kétharmadára csökken. A pórusok hossza/mélysége is befolyásolja az áramlást. A pórusok hossza minimalizálható, ha a δ vastagságú aktív réteget – ahol a pórusok átmérője minimális – a lehető legkisebbnek választjuk.

Mikroszűrésnél a dead-end és a cross-flow szűrés egyaránt alkalmazott szűrési módszer. Attól függően, hogy mekkora a szürendő oldat lebegőanyag-koncentrációja, és mekkora visszatartást kell biztosítani az adott részecskére vonatkozóan, változik, hogy dead-end vagy cross-flow szűrést alkalmaznak.

Dead-end szűrés esetén az összes betáplált oldatot nyomás alkalmazásával átnyomják a membránon, és a kiszűrt részecskék a membrán felszínén vagy a membránban gyűlnek össze.

Amint az [1.9.4. Membránszeparációval kapcsolatos alapfogalmak](#) című alfejezetben láthattuk, cross-flow szűrés esetén a betáplált oldat a membrán felületével párhuzamosan áramlik, a membrán pórusméreténél kisebb molekulák pedig a membránon keresztül áramolva szűrletként távoznak. A retentátban feldúsulnak a kiszűrt részecskék. Ha a betáplálásoldalon nagy áramlási sebességet hozunk létre, így az megakadályozza a részecskék membránfelületen történő kiülepedését. Minél nagyobb a szürendő oldat lebegőanyag-tartalma, annál valószínűbb, hogy cross-flow szűrést alkalmaznak. A 0,5%-nál nagyobb részecsketartalmú áramok szűrésekor cross-flow üzemmód az elterjedt. Nagy lebegőanyag-tartalmú oldatok cross-flow mikroszűrésekor jelentkező koncentráció-polarizáció is kedvezően hat a membrán eltömődésének csökkentésére, hiszen a visszatartott részecskék feldúsulása által a membrán felületén kialakult nagy koncentráció miatt egy visszaáramlás indul meg a betáplálásoldal főtömegébe, ezáltal csökkentve a felületi koncentrációt. A kiszűrt részecskék anyagi minősége nagymértékben befolyásolja a koncentráció-polarizáció által létrehozott vissza irányú diffúziót. Pl. a visszatartott kolloid részecskék diffúziója alacsony.

1.9.5.4. Alkalmazás

A mikroszűrést először a II. világháború végén alkalmazták tiszta ivóvíz előállítására. Az ivóvízellátást biztosító vízművek nagy része elpusztult a háború alatt, ezért a tiszta víz biztosítása érdekében szükség volt szűrőkre. A szűrők kutatását az USA hadserege finanszírozta, később pedig a Millipore Corporation vette át, amely az első és legnagyobb membrángyártó.

A mikroszűrést lebegő részecskék, baktériumok, vírusok és kolloidok oldatból történő elválasztására alkalmazzák. Az alkalmazási területeket az 1.9.2. táblázat foglalja össze. Amint az a táblázatból is látható, a mikroszűrést főként mikrométer méretű részecskék folyadékból, többnyire vízből történő eltávolítására használják.

1.9.2. táblázat. Mikroszűrés alkalmazási területei

Iparág	Alkalmazási terület	Megjegyzés
Élelmiszeripar/biotechnológia	Sejtek kinyerése	Fermentációs elegyekből
Gyógyszeripar	sterilizálás	Hőérzékeny anyagokra
Mikroelektronikai ipar	Részecskeeltávolítás	Integrált áramkörök, félvezetők gyártásához használt oldószerhez

Mikroelektronikai ipar	Ultratiszta víz előállítása	
Energiaipar	Részecskeeltávolítás	Nukleáris energiatermelés során a primer kör hűtővizének tisztítása

1.9.6. Ultraszűrés

1.9.6.1. Bevezetés

Az ultraszűrés a mikroszűréshez hasonlóan szűrési mechanizmus elvén működő, nyomáskülönbség hajtóerő hatására végbemenő membránszeparációs művelet. Aszimmetrikus pórusos membránokat alkalmaznak a szubmikron méretű kolloidrészecskék kiszűrésére, amelyek 5–500 nm pórusátmérővel rendelkeznek. Az ultraszűrő membránok jobban jellemezhetők a vágási értékkel (MWCO, molecular weight cut off), amely 1–1000 kDa tartományba esik. A komponensek elválasztása az úgynevezett szitahatás alapján történik, azaz a pórus átmérőjénél nagyobb átmérőjű molekulákat a membrán visszatartja, míg az ennél kisebb méretűeket átengedi. Megjegyzendő azonban, hogy léteznek mélységi szűrés elvén működő ultraszűrő membránok is, amelyek a kiszűrendő molekulákat a pórusok belső felületén kötik meg. Az ilyen membránok átlagos pórusátmérője a permeálódni képes komponensek átmérőjének általában tízszerese. Különböző irodalmak különböző alkalmazható nyomástartományt adnak meg ultraszűrés esetére, ezért minden esetben a membránygyártó által javasolt nyomástartományt vegyük figyelembe. Tipikus nyomástartományként az 1–10 bar adható meg, de lehet átfedés a mikroszűrésnél és a nanoszűrésnél megadott nyomástartománnyal is.

függ a tangenciális áramlási sebességtől és az oldott anyag minőségétől.

1.9.6.3. Alkalmazás

Az 1960-as, 70-es években úgy gondolták, hogy az ultraszűrés lesz az egyik leginkább alkalmazott technológia az ipari vizek tisztítása terén, azonban a kivitelezés nagy beruházási költség-igénye miatt így nem vált valóra. Ultraszűrést akkor alkalmaznak, ha az elválasztandó komponens értékesítéséből származó összeg fedezi legalább az elválasztási technológia költségét. Elsősorban az élelmiszer-ipari alkalmazása ismert a sajtgyártás terén, amelynek során a tejet ultraszűrik és a tej fehérjetartalmát 5–10%-ra koncentrálják (lásd pl. kisteleki sajtüzem). Szintén élelmiszer-ipari alkalmazás az alma, körte, narancs, szőlő gyümölcslevek tükrösre szűrése ultraszűréssel. Közelítőleg 200 üzem épült már az Egyesült Államokban, amely ezt a technológiát alkalmazza almalégyártáshoz. Magyarországon is alkalmazzák ezt a technikát gyümölcslelégyártásban. A hagyományos gyümölcslelégyártáshoz hasonlítva az ultraszűrés esetén feldolgozott gyümölcs 97%-a kerül lé formájában a piacra a korábbi 90%-hoz képest.

Az ultraszűrés jellemző alkalmazási területeit az 1.9.3. táblázatban foglaltuk össze.

1.9.3. táblázat. Az ultraszűrés alkalmazási területei

Iparág	Alkalmazási terület	Megjegyzés
Élelmiszeripar	Sajtgyártás	Fehérjekoncentráció
Élelmiszeripar	Üdítőital-gyártás	Gyümölcslé-tisztítás
Gépgyártás	Kenés és hűtés esetén alkalmazott olaj-víz emulziók	Vízvisszaforgatás
Élelmiszeripar/biotechnológia	Enzimek tisztítása/vírusok kiszűrése	Fermentációs elegyekből
Autóipar	Elektrovezeték festékek	Festékek visszanyerése és újrafelhasználása

1.9.7. Nanoszűrés

1.9.7.1. Bevezetés

A nanoszűrés a mikroszűrést és ultraszűrést követő finomabb membránszűrési eljárás, amellyel 1000 Da alatti molekulásúlyú komponenseket is ki lehet szűrni, mint pl. a cukrokat vagy akár a két vegyértékű ionokat. A nanoszűrés egy körülbelül húsz évvel ezelőtt megjelent kifejezés, amely az ultraszűrés és a fordított ozmózis közötti szűrési tartományt fedi le. Valójában a nanoszűrés egy nagyon finom ultraszűrés, másik oldalról megközelítve pedig egy tág értelemben vett fordított ozmózis (Schäfer, 2004). Mivel a nanoszűrés az ultraszűrés és fordított ozmózis határművelete, ezért egyaránt alkalmaznak pórusos és bőrtípusú membránokat is. A pórusos membránok pórusmérete 1–10 nm is lehet.

1.9.7.2. Elméleti háttér

A nanoszűrésnél, annak ellenére, hogy határműveletről van szó, mégis inkább a kémiai potenciál különbségnek a nyomáskomponense, azaz a membrán betáplálás-és permeátoldala közötti nyomáskülönbség lesz a hajtóerő. A különböző irodalmak különböző nyomástartományokat adnak meg, ami szintén jelzi, hogy nincs éles határ a műveletek alkalmazhatósági tartománya között. A nyomáskülönbség megválasztásánál azonban szerepet játszik a membrán két oldala között fellépő ozmózisnyomás-különbség is, ezért mindenképp a szűrendő oldat ozmotikus nyomásánál nagyobb nyomást kell választani ahhoz, hogy a művelet végbemenjen. A nyomástartomány 6, de inkább 10 és 40 bar közé tehető.

A pórusos membránok egyik jellemzője a vágási érték, amely nanoszűrő membránoknál 100–1000 Da között mozog. A pórusmentes, bőrtípusú membránok jellemzésére a konyhasó-visszatartást használják, melynek jellemző értéke 30–70% között mozog.

Pórusos membránok esetén érvényesül a **szitahatás**, amely a molekulák méret szerinti elválasztását teszi lehetővé. Azonban a nem-pórusos membránok elválasztási mechanizmusa az oldódás–diffúzió elvén működik, amelynek hajtóereje a **kémiai potenciálkülönbség**.

1.9.7.4. Alkalmazás

A nanoszűrés egy széles körben alkalmazott membránszeparációs művelet. Nanoszűrést alkalmaznak a víztisztításnál, az élelmiszeriparban, a vegyiparban, a papíriparban, a textiliparban, bioreaktoroknál, fotokatalitikus nanoszűrő reaktoroknál, fém- és vasvisszanyerésnél, és hulladéklerakók csurgalékvizeinek kezelésénél is. A teljesség igénye nélkül felsoroltunk néhány alkalmazási lehetőséget.

A nanoszűrés élelmiszer-ipari és ivóvíz-tisztítási alkalmazása már elterjedt az elmúlt 20-30 évben, A nanoszűrés további alkalmazási lehetőségeit az 1.9.4. táblázatban mutatjuk be.

1.9.4. táblázat. A nanoszűrés alkalmazási területei

Iparág	Alkalmazási terület	Megjegyzés
Víztisztítás	Ivóvíz-előállítás	Vízlágyítás, Ca ²⁺ , Mg ²⁺ ionok eltávolítása, zavarosságot okozó komponensek eltávolítása
Élelmiszeripar	Tejipar	Tejsavó-koncentráció, savó sómentesítése
Élelmiszeripar	Cukorgyártás	Híg cukorlé koncentráció, dextrózsirup-koncentráció, Alternatív édesítőszer gyártása

Élelmiszeripar	Étolajgyártás	Oldószer alapú nyálkátlanítás, növényolaj-finomítás
Vegyipar	Szerves kémiai ipar	Szerves oldószerek, pl. alkoholok, észterek, éterek, alkánok vizes elegyeinek kezelése
Vegyipar	Petrolkémiai ipar	Ásványolaj savmentesítése, másodlagosolaj-visszanyerés
Energiaipar	Nukleáris erőművek	Radioaktív izotópot tartalmazó vizek szűrése
Gyógyszeripar	Antibiotikumgyártás	Hatóanyag-koncentráció
Papíripar	Technológia több lépésénél	Nyers víz előkészítése, hántolás, finomító örlés, fehérités, technológiai vizeinek tisztítása
Textilipar	Páclé kezelése	Festékkomponensek koncentrációja, só elválasztása a festékkomponensektől
Mezőgazdaság	Anaerob rothasztók	Szennyvizek, elfolyó vizek KOI-csökkentése

1.9.8. Fordított ozmózis

1.9.8.1. Bevezetés

A membránszűrés legfinomabb elválasztást lehetővé tevő eljárása a fordított ozmózis vagy idegen szóval reverz ozmózis. Míg a mikroszűrés és ultraszűrés kizárólag a szítathatás elvén, méret alapján történő elválasztást valósított meg, addig a pórusmentes membránokkal végzett nanoszűrés egy határterületként átvezetett minket az oldódás-diffúzió elvén működő, de még a membránszűrés eljáráshoz sorolt fordított ozmózishoz. A fordított ozmózis (RO) tisztán anyagátadási folyamatnak tekinthető, melyben a diffúzió, a kémiai potenciálkülönbség, az elektrosztatikus kölcsönhatások játszzák a meghatározó szerepet.

A fordított ozmózisnál az alkalmazott membrán olyan szelektív hártaként működik, amely csak a vizet engedi áthaladni, az ionokat visszatartja. A fordított ozmózisnál (az ultraszűréssel és mikroszűréssel szemben) a méret, az adszorpciós, oldhatósági és diffúziós tulajdonságok egyaránt szerepet játszanak a szétválasztásban (Fonyó és Fábry, 1998).

A fordított ozmózis membránok minden esetben bőrtípusú, nem-pórusos membránok. A legújabb kutatási terület a fordított ozmózis alkalmazása szerves komponensek egymástól való eltávolítása. A tudomány ezt a területet megkülönbözteti a sómentesítési eljárásoktól, ezért a fordított ozmózis szerves vegyületek elválasztásával foglalkozó ágát **hiperszűrésnek** nevezték el.

1.9.8.4. Eltömődés szabályozás

A fordított ozmózis rendszerekben fluxuscsökkenésnek és a termék minőségromlásának legfőbb oka a membrán eltömődése, ezért az eltömődés szabályozása az elsődleges szempont a fordított ozmózis rendszerek tervezésénél és működtetésénél. Az eltömődés nagyban függ a szűrendő oldat minőségétől. Általánosságban az eltömődés okának a következőket tekinthetjük: vízkő, iszap, baktériumok és szerves vegyületek.

Az eltömődés szabályozása magában foglalja a szűrendő oldat előkezelését, hogy minimalizálható legyen az eltömődés, de sajnos az eltömődés ennek ellenére kialakul. Az eltömődést okozhatják

részecskék, amelyek iszapot hoznak létre, baktériumok és szerves vegyületek, mint például olaj. Ezek hatását megfelelő előkezeléssel, előtisztítással szabályozni lehet. A vízkő által okozott eltömődés még rosszabb, főleg, ha koncentráltabb kiindulási oldatokkal párosul. A vízkő általi eltömődés az oldott fémionok kicsapódása miatt jelenik meg a membrán felszínén. Amint a sómentes permeátum eltávozik, a betáplálásoldalon a só koncentrációja nő egészen az oldhatósági határig, majd azt elérve kicsapódik a membrán felszínén, vízkövet okozva (Baker, 2004).

1.9.8.5. Fordított ozmózis alkalmazása

A fordított ozmózis alkalmazása több területen is elterjedt. Alkalmazzák például

- tengervíz sótalanítására, elsősorban arab országokban;
- ipari víz előkészítésére;
- kazán tápvíz előszítésére;
- ultratiszta vizek előállítására pl. oltóanyagok készítéséhez;
- tej besűrítésére a tejporgyártás első lépéseként.

Az emberiség megfelelő minőségű ivóvízzel történő ellátása nagy kihívást jelent az egyre inkább

1.9.9. Pervaporáció

A pervaporáció az egyébként nem túl régi membránműveletek közül is az újabbak közé tartozik. Bár már a XIX. században is foglalkoztak vele, de komolyabb ipari alkalmazásai és kutatása a XX. század második felére tehető.

Erre a membránszeparációs műveletre is jellemző, hogy kíméletes körülmények között, idegen anyag hozzáadása nélkül valósít meg elválasztást. A pervaporáció esetén ez egy többkomponensű, de általában biner folyadékelegy elválasztását jelenti viszonylag alacsony hőmérsékleten. A pervaporáció alkalmazása az 1980-as években kezdődött meg az etanol–víz elegy elválasztásával. Ez az elegy azért különösen fontos, mert minimális forráspontú azeotrópot tartalmaz, tehát hagyományos rektifikálással nem választható szét tiszta, illetve közel tiszta komponensekre. Azóta több pervaporációs üzem épült erre a feladatra, melyeket ma a bioetanol-gyártásra is alkalmaznak.

A pervaporációra mechanizmusára jellemző, hogy rendkívül összetett, sokféle, de alapvetően három jellemző lépésből áll:

1. a permeálódó oldószer-molekulák oldódása a membránban (szorpció),
2. az oldott molekulák diffúziója a membránon keresztül,
3. elpárolgás a membrán másik oldalán (deszorpció).

Az, hogy milyen jellegű molekula oldódik a membránban, az a membrán aktív rétegének tulajdonságától függ. A molekula diffúziója után bekövetkező deszorpciót sokféleképp érhetjük el, melyről a pervaporáció kivitelezésénél írunk.

A pervaporációs üzemeket alapvetően két feladattípusra használják:

1. vizet távolítanak el szerves anyag mellől, mely lehet nagyobb mennyiségű víz eltávolítása is, mint az említett etanol víztelenítési feladat, de lehet más szerves folyadék vízmentesítése is, valamint azeotróp elegyek elválasztása (**hidrofil pervaporáció**),
2. kis mennyiségű illékony szerves anyagot (Volatile Organic Compound, VOC) távolítanak el vízből, ahol is a VOC szennyező anyagnak tekinthető (**organofil pervaporáció**).

A fentiek alapján néhány fontos műveleti jellemzőt megállapíthatunk a pervaporációról:

- többnyire biner elegyet választanak szét,
- a biner elegy egyik komponense mindig víz, a másik pedig szerves vegyület. Ezért a permeálódó komponens szerint beszélünk organofil és hidrofil pervaporációról,

- az elválasztandó komponensek nagyon gyakran közeli forráspontúak és/vagy azeotrópot képeznek egymással,
- nem ismeretesek olyan ipari pervaporációs megoldások, ahol szerves/szerves elválasztást végeznének (bár megvannak rá az eszközök, és fülüzemi kísérletek is folytak/folytak), ugyancsak nem ismeretes terner vagy még összetettebb elegyek pervaporációjának ipari megvalósítása, bár vannak kutatások ezeken a területeken,
- a pervaporáció általában kis molekulatömegű anyagok elválasztására szolgál, ezért a pervaporációs membránok aktív rétege tömör, pórusmentes polimer membrán.

Pervaporációra alkalmazott membrántípusok és főbb alkalmazási területeik

A pervaporációnál alkalmazott membránok általában kompozit membránok. Két rétegből állnak:

- permszelektív aktív réteg, és egy
- mechanikai szilárdságot biztosító, porózus támasztóréteg.

A membrán viselkedése alapvetően az aktív réteg anyagától függ. Ez az esetek döntő többségében valamilyen polimer. Az aktív réteg tulajdonsága dönti el, hogy a membrán organofil, vagy hidrofil pervaporációra alkalmazható. Általában az amorf polimerek a vízre szelektívek, míg az elasztomer polimerek a szerves anyagokra szelektívek. Harmadik membrántípus az ioncserélő membrán, amely a vízzel, fenollokkal és a szerves savakkal lép kölcsönhatásba.

Pervaporáció esetén a gőz–folyadék egyensúly nem korlátozza az elválasztást, ezért alkalmas olyan elválasztásokra, amelyeket rektifikálással nem lehetne megoldani, pl. azeotróp elegyek elválasztása. A pervaporáció alkalmazása három fő csoportba sorolható:

- szerves oldószerek vízmentesítése,
- szerves anyagok kinyerésére vizes elegyekből,
- szerves elegyek elválasztása.

Az ipari méretekben is alkalmazható pervaporációs membránok és berendezések a közelmúlt fejlesztésének eredményei. A kereskedelembe megvásárolható pervaporációs berendezések elsősorban az alábbi fő területeken alkalmazhatók:

- alkoholok kinyerése vizes elegyekből (általában folyamatos hidrofil pervaporáció),
- szerves oldószerek vízmentesítése (általában szakaszos hidrofil pervaporáció),
- vízből a kis mennyiségben előforduló illékony komponensek (VOC) kinyerése (szakaszos vagy folyamatos organofil pervaporáció).

1.9.10. Gázszeparáció

A gázszeparáció, más néven gázpermeáció az elmúlt 20 évben nyert komoly teret a membrántechnikai kutatásokban és alkalmazásokban. A gázszeparáció egyik első ipari alkalmazása az 1940-es évekre tehető, amikor is uránizotópot választottak el egymástól. Ennek elve az $U^{235}F_6$ és az $U^{238}F_6$ gázszeparációs membránművelettel való elválasztása volt. Ez az alkalmazás, illetve az ehhez felhasznált mikropórusos membrán volt az első és egyben legnagyobb ipari megvalósítás.

Az 1960-as évekre tehető a gázszeparáció egy más területen történő komoly ipari alkalmazása, amikor is hidrogént nyertek ki gázelegyből, mint pl. az ammónia-szintéziskörből. Másik ilyen terület a 80-as évekre tehető, amikor is nitrogén levegőből történő kinyerésére fejlesztettek ki gázszeparációs membránt, és azt ipari méretekben alkalmazták.

Jelenleg a gázszeparációt egyre szélesebb, akár kisebb volumenű gyártások esetére is alkalmazzák, így pl. levegő dehidratálására, szerves gázok pl. gáz-halmazállapotú szénhidrogének, illetve szerves gőzök (VOC) levegőből vagy nitrogénből történő kinyerésére. A gázszeparáció kutatása és alkalmazása dinamikus fejlődik, és egyre nagyobb teret kap az elválasztás technikában.

Pórusos és nem-pórusos, tömörnek tekinthető polimer membránok egyaránt használhatók gázszeparációra. Az elválasztás mechanizmusa ilyenkor eltérő, természetesen függ a membrántól (lásd A permeáció mechanizmusa c. ábrát, 1.9.7. ábra).

Pórusos, elsősorban szervesetlen alapú membránok esetében a gázelegy összetevői a membrán két oldalán lévő nyomáskülönbség hatására haladnak át a membránon. A szeparáció hajtóereje tehát a nyomáskülönbség. A membránon történő áthaladás függ a molekula és a pórusméret viszonyától.

A gázszeparáció egyik ígéretes alkalmazási területe lehet a jövőben a levegő két fő komponensének, az oxigénnek és a nitrogénnek az elválasztása. Így ugyanis elkerülhető lenne a kriogénelválasztás, ami egyszerűsítene az elválasztási technikát. Ez a technológia jelenleg még fejlesztés alatt van.

1.9.11. Gőzpermeáció

A gőzpermeáció vagy gőzszeparáció a gázszeparáció speciális esete, ahol a folyadékelegyet gőzfázisba viszünk, azaz elpárologtatunk, és gőzfázisban oldjuk meg az elválasztást. A gázszeparációnál megismertek mellett itt még gondolni kell arra is, hogy a gőz, illetve pára kondenzálódhat a membrán felületén és/vagy pórusaiban, ami nehézséget okozhat.

A gőzpermeáció kivitelezése és mechanizmusa igen hasonlít a pervaporációhoz, ezért számos esetben a pervaporációra alkalmas berendezéseket és membránokat használnak.

1.9.12. Dialízis

Dialízisnél gyakrabban előforduló membránok: celofán, cellulóz, poliakrilsav, poli(vinil-alkohol), poliéter, etilén és vinil-acetát kopolimerje, poli(metil-metakrilát) stb. (Bélafiné, 2002). A membrántechnológia folyamatos fejlődésével újabb és újabb membránok kerülnek ezen a területen kifejlesztésre és alkalmazásra.

A dialízist ma elterjedten alkalmazzák a biotechnológiában és a gyógyszeriparban is nemkívánatos kis molekulájú szennyezések eltávolítására, pl. sómentesítésre. Használják a dialízist az élelmiszeriparban is pl. alkoholmentes sör előállítására.

Mivel a dialízis alapvetően diffúzió alapuló membránművelet, ezért egy lassú eljárás. Gyorsításra külső hajtóerőt alkalmaznak, így ultraszűrést és elektrodialízist alkalmaznak. Az elektrodialízisről később lesz szó.

A dialízis leggyakoribb és legjellemzőbb alkalmazása a mesterséges veseként történő alkalmazás, amikor is a beteg vérért tisztítják meg a mérgező szennyezésektől, mint pl. karbamid, húgysav, nitrogén-, kálium-, foszfor ionok, kreatinin. A dialízisnek ez a humán alkalmazása az úgynevezett hemodialízis. A világon több mint 100 millió ilyen berendezés van. A berendezésekben alkalmazott membrán mérete kb. 1-2 m². Elsőként celofán- (cellulóz) membránt alkalmaztak, melyet még ma is alkalmaznak. A hemodialízis során a membrán másik oldalán fiziológiás sóoldatot áramoltatnak. Ide jutnak át az eltávolítandó anyagok.

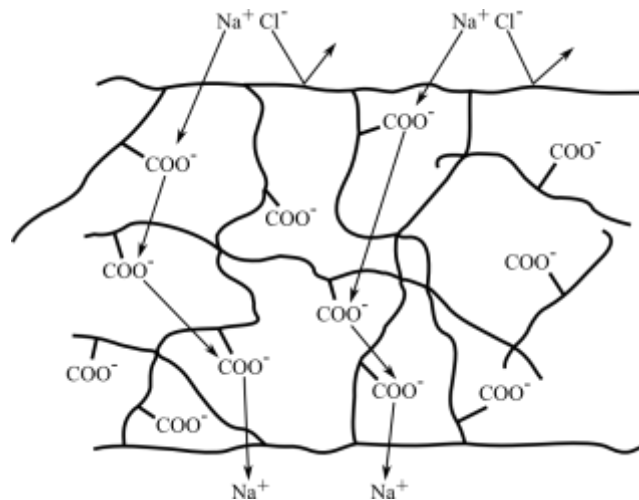
A vérben megjelenő nagyobb móltömegű szennyezések eltávolítására pórusos membránokat is használnak, mely inkább a membránszűrésre jellemző mechanizmussal távolítja el a szennyezéseket, ezért ezt hemoszűrésnek nevezik.

1.9.14. Elektrodialízis, tüzelőanyag-cella

Az ioncserélő membránok alkalmazásának egyik területe az elektrodialízis, melynek hajtóereje az elektromos potenciálkülönbség. Ha egy ionos sóoldatot elektromos potenciálkülönbség alá helyeznek, a kationok a katód, az anionok pedig az anód felé vándorolnak. Töltéssel nem rendelkező részecskékre nincs hatással az elektromos potenciálkülönbség.

Elektromosan töltött ioncserélő membránok esetében szabályozni tudjuk az ionok vándorlását, permeációját. A kationcserélő membránok a pozitív töltésű kationokat engedik át, míg az anioncserélő membránok pedig az anionokat, azaz a negatív töltésű membránokat. Az 1.9.26. ábra mutat erre egy

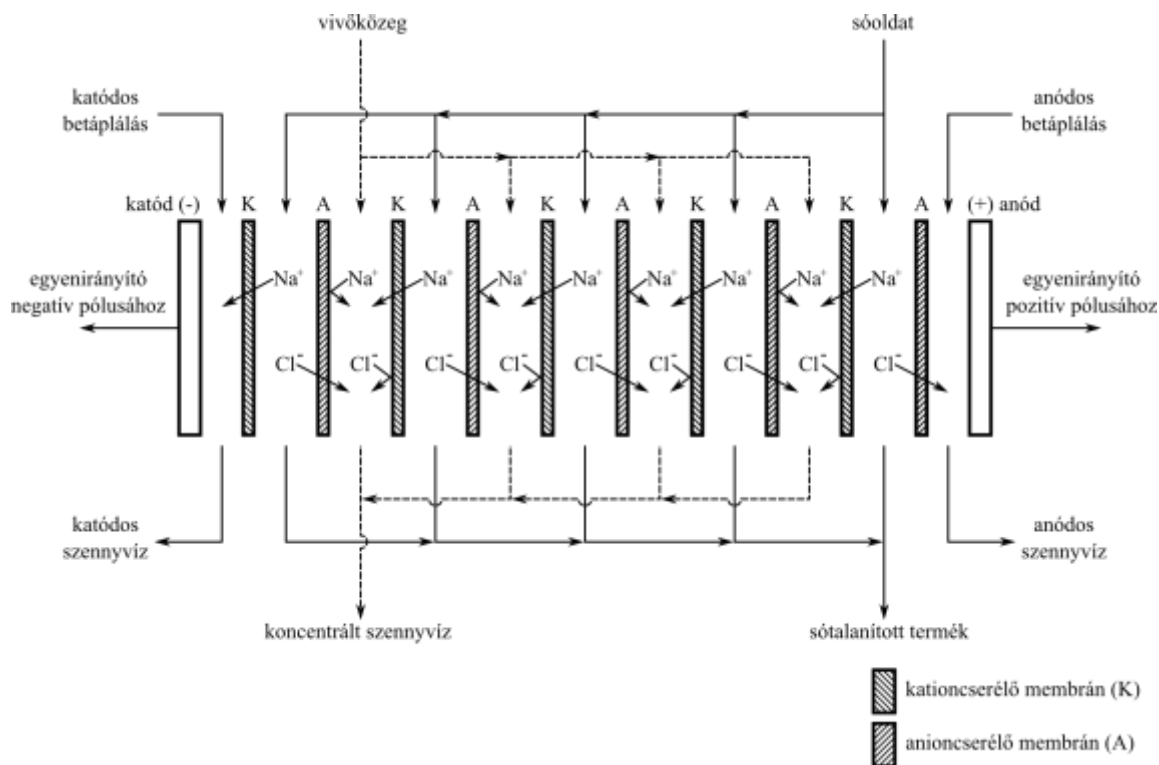
példát, amikor is kationcserélő membrán fix negatív töltésű csoportokkal meggátolja a negatív töltésű anion permeációját, de átengedi a pozitív töltésű kationt.



1.9.26. ábra. Ionszelektív permeáció

Az elektrodialízis folyamán elektromos potenciálkülönbség közé anion- és kationszelektív membránokat helyeznek váltakozó elrendezésben (1.9.27. ábra). Mindegyik anion- és kationszelektív membrán egy cellapárt képez. Ionos sóoldatot táplálnak a membráncellákba, míg az elektromos potenciálkülönbséget pedig állandóan biztosítják. Az elektromos potenciálkülönbség hatására ionvándorlás következik be. A pozitív töltésű kationok áthaladnak a negatív töltésű kationszelektív membránon, de nem tudnak áthaladni a pozitív töltésű anionszelektív membránokon. A negatív töltésű anionok esetében ugyanez a helyzet, csak fordítva. Az egész folyamat eredménye az lesz, hogy az ionok koncentrációja minden második cellában megnő, és ahonnan „elvándoroltak”, ott pedig az oldószer víz megtisztul. Összességében hígabb és töményebb oldatot tartalmazó cellák alakulnak ki, melyek esetében a folyadékvezetést természetesen meg kell oldani.

Az elektródokon mindeközben pedig elektrolízis történik. Amennyiben a sóoldat egyik komponense szintén gázként keletkezhet az anódon, pl. nátrium-klorid-oldat kezelésekor klórgáz, akkor az ilyen jellegű gázképződéssel is számolni kell.



1.9.27. ábra. Elektrodialízis kivitelezése

Az elektrodialízis alkalmazásakor fontos a helyes feszültség, illetve áramsűrűség megválasztása, ugyanis a berendezés kapacitását növelni lehet az alkalmazott áramsűrűséggel. Az elektrodializáló elrendezés celláinak van egy adott ellenállása, és az áramsűrűség növelésekor van egy úgynevezett ohmikus szakasz, ahol az áram, illetve áramsűrűség a feszültséggel arányos. Nagyobb áramsűrűség több ion vándorlásához vezet. A berendezés kapacitását növelni lehet az alkalmazott áramsűrűséggel. Nagyobb áramsűrűség több ion vándorlásához vezet. Ezt azonban csak egy kritikus értékig lehet megtenni, ugyanis itt elérkezünk egy úgynevezett platóhoz, aminek oka, hogy a cellák ellenállása nő, és hiába próbáljuk növelni a berendezésben az áramsűrűséget. Ha mégis növeljük a feszültséget, akkor az áramsűrűség már nem nő, de fellép a vízbontás jelensége.

Az elektrodialízist eredetileg víz sótalanítására dolgozták ki az Egyesült Államokban. Ugyanakkor só előállítására is használják ezt az elvet. A tengervizet kb. 18-20%-os sótartalomig koncentrálnak, majd ezt követően kristályosító beállítással állítják elő a sót.

Az elektrodialízis alkalmazásánál nagyon kell ügyelni a lerakódásokra és az esetleges eltömődésekre, vízkőképződésre. Ezért az elektrodialízist csak kismértékű betöményítésre használják, ahol a sókiválás még nem jelentős. Ennek ellenére szükséges a sókiválás és a vízkőkiválás ellen fokozottan védeni a rendszert.

A hetvenes években áttérés volt az elektrodializáló rendszerek tervezésében és alkalmazásában az az elv, hogy az elektródok polaritását óránként kettő, maximum négyszer megváltoztatták. Ugyanekkor ügyeltek a cellákba történő adagolás és az elvétel megfelelő átállítására is. Így a lerakódásokat ki lehet öblíteni, mielőtt azok megkövesednek a rendszerben. Az ilyen rendszerek sokkal megbízhatóbbak, mint az állandó elektródpolaritással dolgozók.

Az elektrodialízis egyre nagyobb mértékben terjed napjainkban. Nagymértékben használják sóeltávolításra és ultratiszta víz előállítására. Ugyanakkor ivóvíz tisztítására, pl. nitrát mentesítésére is használják.

Újabbban nagy figyelmet fordítanak az úgynevezett „bipoláris” membránokra. A bipoláris membránok kationcserélő és anioncserélő membránréteget egyaránt tartalmaznak. A két réteg közé egy támasztóréteget helyeznek. Elektromos térerő hatására a membrán a víz disszociációját segíti elő, és

hidrogén, valamint hidroxilionok keletkeznek a membrán belsejében. Ezt a jelenséget használják ki savak és lúgok ionos sókból történő előállítására.

Felhasznált irodalom

- Baker, R. W.: *Membrane Technology and its Applications*, Wiley, Menlo Park, California, 2004.
- Bélafiné Bakó K.: *Membrános műveletek*, Veszprémi Egyetemi Kiadó, Veszprém, 2002.
- Cerini, L.: *US Patent 1,719,754* (July 1929).
- Drioli, E., Giorno, L.: *Comprehensive Membrane Science and Engineering* (IV Volumes), Elsevier, Milan, 2010.
- Field, R.: *Fundamentals and models: limiting, critical and sustainable fluxes*, Conference proceedings, Permea 2007, Siófok, Hungary.
- Fonyó Zs., Fábry Gy.: *Vegyipari művelettani alapismeretek*, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1998, 2004.
- Koczka K.: *Elválasztástechnikai folyamatok környezetközpontú tervezése és ipari alkalmazása*, PhD értekezés, BME, Budapest, 2009.
- Mizsey P., Newson, E., J.: *Power Sources*, 102, 205 (2001).
- Mizsey P., Cuellar, A., Newson E., Hottinger, P., Truong, T. B., von Roth F.: *Comput. Chem. Eng.*, 23, S 371 (1999).
- Mizsey P., Koczka K., Deák A., Fonyó Zs.: *Magyar Kémikusok Lapja*, 60, (7), 239 (2005).
- Rautenbach, R., Herion, C., Meyer-Blumentoth, U.: *Pervaporation membrane separation processes*, in: Huang, R. Y. M. (Ed.), *Membrane Science and Technology Series*, vol. 1. Chapter 3, Elsevier, Amsterdam, 1990.
- Rautenbach, R., Herion, C., Meyer-Blumentoth, U.: *Pervaporation membrane separation processes*, in: Richardson, J. F., Harker, J. H., Backhurst, J. R.: *Coulson and Richardson's Chemical Engineering*, Volume 2, Fifth Edition, Butterworth-Heinemann, An imprint of Elsevier Science, Oxford, 2002.
- Sawinsky J., Deák A.: *Vegyipari félüzemi praktikum*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000.
- Schäfer, A. L., Fane, A. G., Waite, T. D.: *Nanofiltration, Principles and Applications*, Elsevier, Amsterdam, 2005.
- Wijmans J. G., Baker, R.W.: *J. Membrane Sci.*, 107, 1, 1 (1995).