



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

# Membrándesztilláció

---

BIOTERMÉK IZOLÁLÁS IRODALMAZÁSI FELADAT

Készítette:

2018.11.12.

Altziebler Dániel

Balogh Ervin

Jakab Roberta

Samu Róbert

## Tartalomjegyzék

A membránesztilláció (MD) alapjai .....	2
Membrán szintézis membránesztillációhoz .....	5
Desztilláció napenergiával működő membrán desztillációs rendszerekkel .....	8
Festékoldatok tisztítása vákuum membrán desztillációval .....	10
Ivóvíz előállítása sós vízből légréses membrán desztillációval polivinilidén-fluorid nanoszál membrán használatával .....	13
Források.....	15

## A membránesztilláció (MD) alapjai [1] [2]

A legtöbb membránt használó anyagelválasztó művelet hajtóereje a két határfelület közti nyomáskülönbség (pl. reverzozmózis), a koncentrációkülönbség (dialízis), vagy egy elektromos mező. A membránok szelektivitása a pórusméret és visszatartott alkotórész kapcsolatán, a diffúziós koefficiensen vagy az elektromos polaritáson alapulhat. A membránesztillációhoz használt membránok meggátolják a folyékony víz áthaladását, mialatt átteresztőek a szabad vízmolekulákra, és így a vízgőzre. Ezek a membránok hidrofób szintetikus anyagok (pl. PTFE vagy PP) és 0,1-0,5 µm szabványos pórusátmérővel rendelkeznek.

Annak ellenére, hogy a pórusok jelentősen nagyobbak a molekuláknál, a folyadék fázis nem lép be a pórusokba a víz nagy felületi feszültsége miatt. A pórusokban nem nedvesítő meniszkusz alakul ki. Ezt a jelenséget kapilláris hatásnak nevezzük.

A hajtóerő, ami miatt a gőz átjut a membránon azért, hogy a permeát oldalon vízként gyűjthessük össze, az a parciális vízgőz nyomáskülönbségnek köszönhető a két határfelület között. Ez a nyomáskülönbség a két határfelület közti hőmérsékletkülönbség eredménye.

## Membránesztillációs technikák

### Közvetlen kapcsolatú membránesztilláció

Ezen módszer esetében a membrán mindkét oldala folyékony, forró vízzel van feltöltve a gőzoldalon, és lehűlt szűrlettel a permeát oldalon. A gőz kondenzációja a membránon áthaladás közben történik, közvetlenül a folyadékfázisban a membrán határfelületen. Hátránya a nagy mennyiségű hőveszteség, mivel az egyetlen réteg membrán szigetelő tulajdonsága meglehetősen alacsony.

### Légrésees membránesztilláció

A párologtató egysége hasonlít a közvetlen kapcsolatú technikához, ahol a permeátum a membrán és a hűtött fal közt fekszik. A légrésees technológiánál a membránon átjutott gőznek át kell haladnia egy légrése is, mielőtt a hűtött falon lekondenzálna. Ennek előnye, hogy nagyfokú termikus szigetelést ad, így minimalizálja a hőveszteséget. Azonban a légrése a berendezés hátránya is, mivel egy újabb akadály az anyagtranszport előtt.

## Levegő sztrippeléses membránesztilláció

Ezek a típusú berendezések egy olyan csatorna konfigurációt használnak, melyben egy üres rés található. A gőz lecsapása a membránesztillációs modulon kívül történik, egy külső kondenzátorban. A technika előnye a közvetlen kapcsolatú membránesztillációval szemben, hogy a tömegáram előtti akadály jelentősen csökken a kényszeráramlás során. Hátránya, hogy a gáz fázis miatt nagyobb a teljes tömegáram, ami miatt a kondenzátor kapacitásának növelésére van szükség.

## Vákuum membránesztilláció

Tartalmaz egy légréses csatorna elemet. Ha a gőz átjutott a membránon, egyszerűen „kiszívódik” a szűrletcsatornából és a berendezésen kívül kondenzál csakúgy, mint a levegő sztrippeléses berendezés esetén. Főként illékony anyagok vizes oldattól való elválasztása esetén vagy tiszta víz tengervízből történő előállításakor használják. A módszer előnye, hogy a membrán pórusait eltömítő feloldatlan inert gázok a vákuumnak köszönhetően eltávoznak, emiatt sokkal nagyobb hatékony membránfelület marad. Emellett a forráspont csökkenésének és a kisebb hőmérsékletkülönbségnek köszönhetően észrevehetően megnő a termék mennyisége. A módszer hátrányai közé tartozik, hogy összetett műszaki berendezést igényel.

## Felhasználások

Tengervíz sótalanítása

Víz tisztítás

Ammónia eltávolítás/koncentráció

Erőforrások koncentráció

Az elmúlt években a membrán elválasztó műveletek meglehetősen fontossá váltak mind tudományos, mind ipari szinten. Ez a széleskörű felhasználásuknak, hatékony elválasztásuknak és az újszerű és fejlett szintetikus membránok folyamatos fejlődésének köszönhető.

A membránműveleteket általában az irreverzibilis folyamatok termodinamikája felől kell megközelítenünk, ami tudvalevően nem nyújt leírást a molekuláris szinten történő

jelenségekre. Például, ha a membrán mindkét oldala közt hőmérsékletkülönbséget alkalmazunk, a hőáram a magastól az alacsony felé áramlik.

Ahogy már korábban is láthattuk, a membránesztilláció egy hő által irányított gőztranszport egy nem nedvesített hidrofób membránpóruson keresztül, ahol a hajtóerő a gőz nyomáskülönbsége a membrán két oldalán. A membránesztilláció által kezelt folyadékbetáplálás folyamatos közvetlen kapcsolatban kell, hogy legyen a membrán egyik oldalával, anélkül, hogy bejutna a száraz pórusokba. Emiatt a membránon keresztül alkalmazott hidrosztatikai nyomásnak alacsonyabbnak kell lennie, mint a folyadék belépési nyomása. Ez a belépési nyomás az áttörési nyomásnak (breakthrough pressure) nevezett minimum transzmembrán nyomás, ami ahhoz szükséges, hogy a desztillált víz vagy a betápláló oldat beléphessen a pórusba, legyőzve a membrán anyagának hidrofób erejét. Ez az érték minden membrán jellegzetessége, és olyan nagynak kell lennie, amennyire csak lehetséges. Ha nem megfelelően nagy, bekövetkezhet pórus nedvesedés, ami a termelt vízminőség romlásához vezet.

## Membrán szintézis membránesztillációhoz [3]

A hagyományos membrán szintézis technikák esetén eredendően hidrofób polimereket szoktak használni mikroporozus membránok előállításához.

### Értékelési szempontok

A membránesztilláció végső célja a nem illékony komponens megtartása és tisztított folyadék előállítása, vagy illékony komponensek elválasztása egy kevésbé illékonytól, főként olcsó, felesleges hő használatával. Kísérleti szempontból az értékelés a termelési kapacitáson, energiafelhasználáson, permeát minőségen és víztermelés áránalapszik.

### Optimális membrántulajdonságok

A kereskedelemben elérhető membránesztillációhoz alkalmazható membránok eredetileg membránszűréshez vagy más használatra készültek. A hidrofób természetnek és a mikroporozus szerkezetnek köszönhetően MD-hez is alkalmazhatóak. A leggyakrabban használt membránok anyaga nyújtott PTFE és PE, vagy inverz fázisú PVDF és PP. Kerámia membránokat csak szórványosan használnak MD-hoz, mivel jó hővezetőképességük miatt nagy hőveszteség társul hozzájuk, emellett a kerámiák gyakran drágák is.

A membránnak tartalmaznia kell legalább egy hidrofób réteget, amit nem nedvesít meg a betáp folyadék. Ha a membrán teremti meg a kapcsolatot a két fázis között, a nem illékony oldószerek visszatartása teljes (100%). A membrán nedvesedés hajlamának értékelése a folyadék belépő nyomásán alapszik. Az ingadozó nyomáson és hőmérsékleten történő megfelelő működéshez az áttörési nyomás értékének minimum 2,5 bar nyomás megválasztása javasolt.

### Membrán típusok

Membránesztillációhoz különböző struktúrák javasoltak. Ezen szerkezetek közös tulajdonsága, hogy mindegyik tartalmaz egy hidrofób réteget. A legtöbb membrán izotróp, ami azt jelenti, hogy az egész keresztmetszeten át egyforma a szerkezete. Egy vékonyabb aktív hidrofób rétegvastagság alternatívája az integráns aszimmetrikus

membrán vagy kompozit membrán. Ezek a membránoknak egy aktív MD felső réteggel rendelkeznek. Mindkét típus esetén találatunk egy támasztó alsó réteget, ami további mechanikai stabilitást nyújt a membránnak. Az integráns aszimmetrikus membrán egyetlen anyagból készül, míg a kompozit membrán aktív MD rétege egy másik anyagból készül, mint a membrán többi része.

## Hagyományos membrán előállító eljárások

### Nyújtás

Ez az oldószermentes eljárás félkristályos polimeranyagok esetén alkalmazható, mint például PTFE és PP. A polimert olvadáspontja fölé hevítik és a kívánt alakra extrudálják. A nyújtás merőleges az extrudálás irányára. Ezek a membránok manapság könnyen elérhetőek a kereskedelemben és általában ezt használják membránesztilláció során. A PTFE kiváló hidrofobicitással rendelkezik, emellett pedig egy nagy hatékonyságú vékony hordozós membrán. A kereskedelemben elérhető membránmodulok közül a Memsys, SolarSpring, Memstill és Scarab nevű gyárak mind PTFE membránokat használnak. Azonban a magas hidrofobicitás ellenére a PTFE nehezen alkalmazható membránok lezárására, mivel az anyag viszonylag drága, emellett pedig a vastag membránok előállítása is nagy kihívás. Ezeket a vastag membránokat több réteg nyújtott PTFE réteg laminálásával készítik, de a membránesztilláció során a vízmolekulák a rétegek között kondenzálnak le, ami nagy mértékben befolyásolja a teljesítményt.

### Inverz fázisú előállítás

Az izotróp inverz fázisú PP és PVDF membránok elérhetőek a kereskedelemben és alkalmasak membránesztillációhoz. A fázis inverziós művelet egy átmeneten alapul, két fázis között, melyet a polimer oldhatóságának változása indukál. Egy homogén keverékből kiindulva az összetételben történő változás vagy a körülmények szeparációt indukálnak, kialakul egy polimerben szegény és egy polimerben gazdag fázis. További elválasztás esetén a polimer oldhatósága csökken és kialakul egy szilárd fázis jellemző alakkal. Csak a feloldható polimerek alkalmasak a fázis inverziós műveletre, ez erősen korlátozza az anyagválasztást.

## Membránesztillációhoz előállított membránok

Az utóbbi időben számos új előállítási technológiát fedeztek fel, hogy javítsák a membrán teljesítményét a MD során.

### Elektrospinning technológia

Az elektrospinning technológiának köszönhetően a nanoanyagok egyedi osztályát állíthatjuk elő. Ez a nanoszálak nevezett technológia számos érdekes tulajdonsággal bír. Ezek a membránok 80 % feletti porozitással bírnak, összekapcsolódó, nyílt pórusos szerkezettel és magas felületi érdességgel rendelkeznek. A gőz permeabilitása bizonyos esetekben meghaladja a  $200 \text{ kg}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{bar})$  mennyiséget, míg más membránok csak  $180 \text{ kg}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{bar})$  értékre képesek.

### Karbon nanocsöves technológia

Ezen technológia kutatása napjainkban nagy népszerűségnek örvend, mivel számos sótalánítási folyamatban, többek között a membránesztilláció és a kapacitív deionizáció során használják. A karbon nanocsöveknek kiváló a tartóssága és különböző tanulmányok igazolják, hogy a jellemző üreges szerkezet javítja a gőzmolekulák transzportját. A karbon nanocsövek erősen hidrofóbok, emiatt csökkenti a nedvesedési hajlamot. Ezekről a csövekről ismert, hogy gyors szorpció és deszorpció kapacitással rendelkeznek, ezért aktiválja a diffúziót a membránon keresztül. A nanocső fala mentén bekövetkezhet felületi diffúzió is.

Összefoglalva, a nyújtott membránok jó membránesztillációs hatékonysággal rendelkeznek, de hátránya az összenyomhatóság. A PTFE rétegeket nehéz megfelelően összeragasztani, míg a PE alacsonyabb hidrofobicitást mutat. Emiatt vált igazán fontossá a fázis inverziós technika, amely membrán módosító műveleteket használ. Az elektrospinning nagyon magas porozitást eredményez, azonban ellenőrzést igényel a pórusméret esetében. Általánosságban elmondható, hogy a nagy mennyiségben, hibák nélkül és olcsón előállított membránok kulcsfontosságúak a művelethez.



## Desztilláció napenergiával működő membrán desztillációs rendszerekkel [4]

### Miért fontos ez a kutatási terület?

Az érdeklődés a napenergiával hajtott membrán desztillációs rendszerek (röviden SPMD) iránt világszerte nő, köszönhetően a membrándesztilláció (MD) kedvező sajátosságainak. A kisméretű SPMD egységek alkalmasak arra, hogy az emberi szükségletekhez megfelelő minőségű vizet állítsanak elő olyan elmaradottabb régiókban, ahol a víz és elektromos hálózat ehhez fejletlen.

A napenergia és az MD egyesítése technikailag megvalósítható, azonban az így előállított víz költsége egyelőre magasabb, mint a hagyományos technológiáké. Ha azonban sikerülne olcsón, megbízható, hosszan tartó MD modulokat előállítani a technológia a legkedvezőbb desztillációs technikák egyike lenne.

### Az MB és a napenergiacellák ötvözése

A napenergiacellák segítségével hő- (ez a nap – hő) és elektromos energiát (nap - fotoelektromos) állítanak elő, ezzel üzemeltetve a membrándesztillációt.

#### Nap – fotoelektromos technika

Alapja a fotoelektromos cella (PV), mely a napenergiát elektromos energiává konvertálja. Jelenleg a legelterjedtebb a harmadik generációs PV, szilikonkristály alapú, viszonylag magas konverziófokkal.

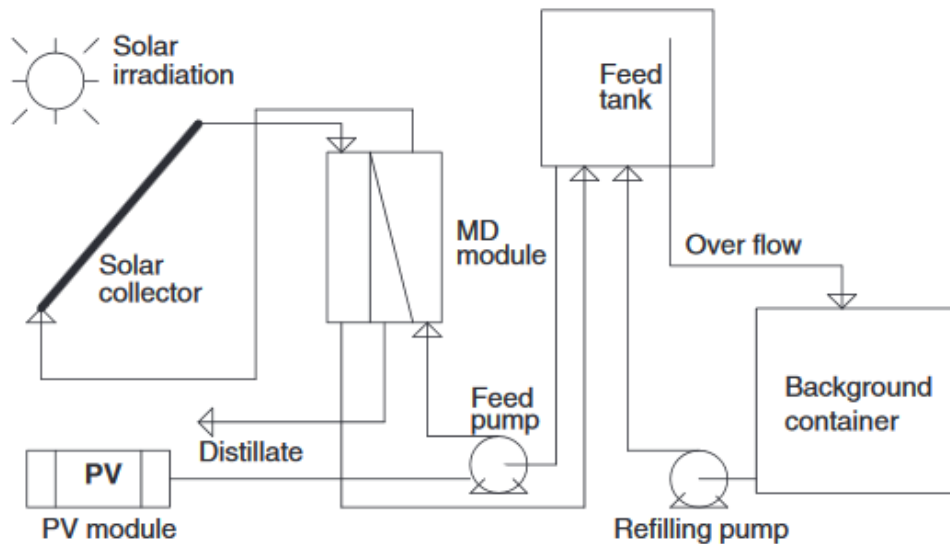
A PV cellákhoz szükséges egyéb kiegészítő elemek, illetve maga a cella előállítási költsége igen magas, helyettesíthető dízel generátorral.

A megtermelt elektromos árammal működtetik a nyomáskülönbséget létrehozó pumpákat.

#### Nap – hőtechnika

Működési alapja, hogy egy közvetítő (tükrök, amik egy pontban fókuszálják a napsugárzást, hőgyűjtő tartályok, stb.) segítségével hordozó folyadék köti meg a

napenergiát hő formájában. Az ilyen napenergia gyűjtőket aszerint csoportosítják, hogy mennyire melegítik föl a hőhordozó folyadékot.



1. ábra: kompakt rendszer sematikus rajza

Az MB-t azért szerencsés napenergiacellákhoz kapcsolni, mivel jól tolerálja a rendszer által termelt energiamennyiség ingadozását, ezen kívül nem szükséges hozzá akkor hőmérsékletgradienst létrehozni, mint a hagyományos desztillációhoz.

## Összefoglalás

Több működő kísérletben bizonyították már, hogy a rendszer megvalósítható és működik, azonban az ezzel járó költségek igen nagyok. Egy ilyen rendszer létrehozásánál a legtöbb pénz a beruházásra fordítódik, azonban az üzemeltetés és karbantartás is nagyon drága, annak ellenére, hogy az energia ingyen van. Az MD modulok előállításának jövőbeli fejlesztése szükséges a technológia széleskörű elterjedéséhez.

## Festékoldatok tisztítása vákuum membrán desztillációval [5]

### Előszó

A textiliparból származó szennyvíz tisztítása rendkívül fontos a környezetszennyezés elkerülése és a tiszta víz előállításának érdekében. Általában a festékoldatok tisztítására koagulációt/flokkulációt, adszorpciót és ózonos oxidációt szoktak használni. A membránműveletek közül az ultraszűrés alacsony visszatartást mutat, míg a nanoszűrésnek és a fordított ozmózisnak pedig korlátozott a felhasználása a magas ozmózisnyomás miatt, ami megemelkedik magas koncentráció esetén. Mégis az irodalomban található kutatások azt mutatták, hogy a hagyományos módszerekkel összekapcsolva alkalmazzák a membránműveleteket. Ezek mellett a membrán desztilláció is egy lehetséges technika a festékoldatok tisztítására.

### A vákuum membrán desztilláció általános tudnivalói

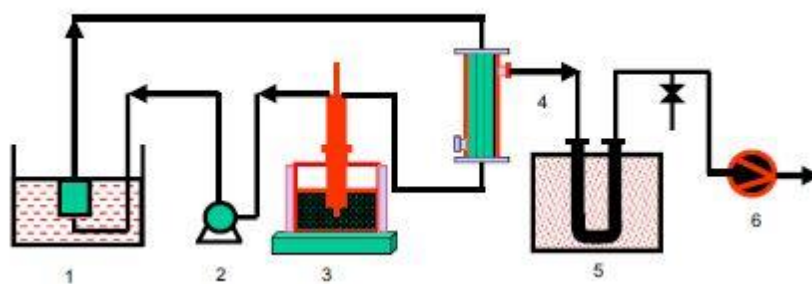
A vákuum membrán desztilláció egy membránművelet, amelyben a mikropórusú hidrofób membránokat vízgőz és illékony vegyületek vizes oldatokból való elválasztására használják. A hidrofób membrán pórusain keresztül nem tud átjutni a folyadék, ami így a membrán egyik oldalán fog maradni. Amikor a membrán másik oldalán vákuumot alkalmazunk, parciális nyomáskülönbség alakul ki a membrán két oldalán és mind a vízgőz és illékony anyagok elkezdnek átvándorolni a membrán pórusain keresztül. Bár a membrán desztillációnál a fő transzport a membrán mikropórusain keresztül történik, néhány esetben viszont nem szabad figyelmen kívül hagyni a membrán mátrixon keresztüli transzportot sem. Ugyanis az oldatban lévő azon komponensek, amelyeknek nagy az affinitása a membrán anyagához, azok átjuthatnak a membrán szilárd részén az oldódás – diffúzió mechanizmus által.

A vákuum membrán desztilláció erősen függ a hőmérséklettől, a gőznyomással való exponenciális kapcsolata miatt, és ezt nem limitálja a betáplált oldat ozmózisnyomása sem. Tehát a hőmérséklet polarizációt figyelmesen kontrollálni kell és minimalizálni, hogy a rendszer megfelelően működjön. A hőmérséklet polarizáció a fázis nagy része és a membrán felszíne közötti hőmérséklet profil kialakításából áll. Minél magasabb a hőmérséklet polarizáció, annál alacsonyabb a hőmérséklet a membrán felszínén és a rendelkezésre álló hajtóerő is. Számunkra meglehetősen előnyös, hogy a vákuum

membrán desztilláció hatékonysága nem függ a betáplált anyag ozmózis nyomásától, mert így nem állnak fent a más membrán műveleteknél tapasztalt limitáló tényezők, úgy, mint a fordított ozmózisnál, ami nem képes kezelni a túl magas nyomású áramlatot. Továbbá, a vákuum membrán desztilláció teljesítménye némileg kapcsolódik a jelen lévő anyag molekuláris tömegéhez, ellentétesen, mint ahogy a mikro- és ultraszűrésnél történik. Az áramlatok ennél a műveletnél a vízből és a festékből állnak. Mivel a festékanyagok nem illékony komponensek, így csak a vízgőz tud áthaladni a membránon, míg a festékek a kiindulási oldalon maradnak. A festékfűrdők általában 80-90°C hőmérsékletűek, habár nincs szükség hőenergiára fűtéshez vákuum membrán desztilláció előtt.

### Kísérlet

Az apparátus, amit ehhez a feladathoz használtak, látható az 2. ábrán. A kísérletek közben, a festéket tartalmazó betáplált oldatot bepumpálták a kapilláris membrán modul szálalás lumenjén keresztül és vákuumot alkalmaztunk a külső oldalán olaj vákuum pumpa segítségével. A betáplált oldat térfogata 1 l volt. A betápláló hőmérsékletet egy termosztát segítségével állandóra állították. A hideg csapdát folyékony nitrogénbe merítették egy tárolóedényben, ami a modul és a vákuum pumpa között helyezkedett el.



2. ábra: Kísérleti apparátus vákuum membrán desztillációhoz: 1. termosztát tekercsekkel, 2. betápláló pumpa, 3. betáplálendő anyag gyűjtőmedence (hőmérővel és fecskendővel) egyensúlyban, 4. membrán modul, 5. hideg csapda folyékony nitrogénnel, 6. vákuum pumpa

A kísérlethez polipropilén hajszálcsöves membránt használtak.

A festékoldatok elkészítéséhez festékport oldottak desztillált vízben. A betápláló és az átdiffundált festék koncentrációját spektrofotométerrel határozták meg.

## Eredmények

Minden modult először desztillált víz betáplálásával jellemezték. Minden modulnál hasonló vízáram értékek és viselkedés volt észlelhető. Mint várhatóan a vízáramok arányosan nőttek a betáplálási sebességgel és a hőmérséklettel.

Nem a legkisebb moláris tömegű festéknek volt a legnagyobb áthatolási árama, míg a nagyobb molekuláris tömegű festékeknek volt a relatíve nagy áthatolási árama. Ezek az eredmények azt tükrözik, amit eddig is tudtunk a vákuum membrán desztillációról, ami némileg függ a tisztítandó oldatban lévő anyagok moláris tömegétől. Még azt is jelzi a kísérlet, hogy az áthaladási áram erősen függ a festékek kémiai mennyiségétől és ezeknek a membránnal való interakciójától. Minden festékoldat esetén tiszta vizet nyertünk ki az áthaladási oldalon.

# Ivóvíz előállítása sós vízből légréses membrán desztillációval polivinilidén-fluorid nanoszál membrán használatával [6]

## Bevezetés

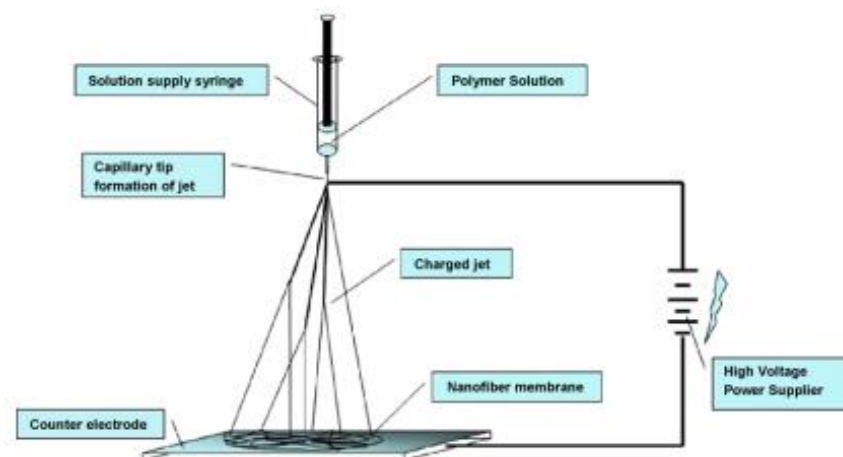
A legtöbb MD (membrán desztilláció) kutatást kereskedelmileg elérhető hidrofób mikroszűrő-membránokkal végezték. Ez a cikk egy alternatív membrán, a polivinilidén-fluorid (PVDF)-ből elektrospinningel készült nanoszál membrán versenyképességét vizsgálta.

A PVDF membrán akár 22%-os sós vizet is 98,7-99,9% -os só visszatartással tudta kezelni. A keletkezett fluxus elérte, vagy meghaladta a kereskedelmi forgalomban kapható PVDF membránokét, és a membrán kezdeti teljesítményét 25 nap használat után is fenntartotta.

Legfeljebb 6%-os töménységű sóoldatból is iható víz állítható elő légréses desztillációval, itt fontos megemlíteni, hogy a tengervíz sótartalma átlagosan 3,5% körül van.

## A membrán elkészítése

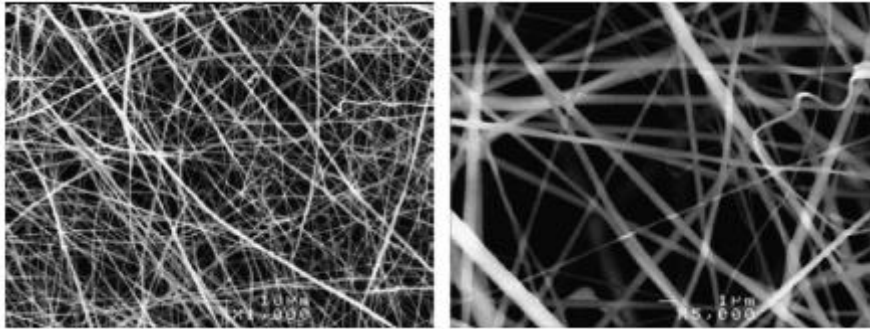
Az elektromosan szőtt PVDF membránok egy tipikus elektrospinning készülékkel készültek (3. ábra). A polimerhez dimetilformamidban oldott 18 m/m%-os polivinilidén-fluorid oldatot használtak 2 ml/h sebességgel. Az oldatból 6 ml fogyott mire a szál elérte a 0,15 mm vastagságot. Magas feszültséget (18 kV) kapcsoltak a szövőtű hegye és a gyűjtő fémtányér közé (18 cm). A membránt egy napig hagyták száradni, majd vékony karbon filmmel vonták be.



3. ábra: Az elektrospinning készülék sematikus rajza

## Eredmények

A 4. ábrán a membrán szerkezetének elektronmikroszkópos képe látható. A szálak átmérője 500 nm körül volt, más kutatóknak pedig 80-700 nm-es átmérőket sikerült elérniük, a szövésnél alkalmazott körülményektől függően. A szálak kötésszöge  $130^\circ$  volt. Egyes elméleti tanulmányok szerint lehetséges volna létrehozni egy vízlepergető réteget olyan anyagból, aminek a kötésszöge  $90^\circ$  -nál kisebb.



4. ábra: Membránszerkezet elektronmikroszkópos képe

A fluxus a hőmérséklet növelésével exponenciálisan nő, a sókoncentráció növelésével azonban kicsit csökken. Ezek a változások a víz egyensúlyi gőztenziójának változásával magyarázhatók. A legnagyobb hőmérsékletkülönbségnél ( $60^\circ\text{C}$ ) elért legnagyobb fluxus  $11\text{--}12\text{ kg}/(\text{m}^2\text{ h})$  volt. A mérési eredményekből látszik, hogy a membrán só visszatartása függ a betáplált oldat sókoncentrációjától is. A NaCl elválasztás a különféle töménységű oldatoknál különböző hőmérsékleteken  $98.7\text{--}99.9\%$  között voltak. A permeátban a NaCl koncentráció  $110$  és  $280$  ppm között voltak, ami az iható víz NaCl koncentráció határértéke alatt van. (Feng et al. 2008)

## Források

Videó: The memsys process

<https://www.youtube.com/watch?v=UdJjtsDkYkc>

[1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Membrane\\_distillation](https://en.wikipedia.org/wiki/Membrane_distillation)

[2] M.Essalhi, M.Khayet: 10 - Fundamentals of membrane distillation

Pervaporation, Vapour Permeation and Membrane Distillation, Principles and Applications, Woodhead Publishing Series in Energy, 2015, Pages 277-316

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782422464000106>

[3] L.Eykensab, K.De Sittera, C.Dotremonta, L.Pinoyc, B.Van der Bruggen: Membrane synthesis for membrane distillation: A review

Separation and Purification Technology, Volume 182, 12 July 2017, Pages 36-51

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586617302782>

[4] Mohammed Rasool Qtaishat, Fawzi Banat: Desalination by solar powered membrane distillation systems

Desalination, Volume 308, 2 January 2013, Pages 186-197

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916412000690>

[5] A.Criscuoli J.Zhong, A. Figoli, M.C.Carnevale, R. Huang, E. Drioliac: Treatment of dye solutions by vacuum membrane distillation

Water Research: Volume 42, Issue 20, December 2008, Pages 5031-5037

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135408004119>

[6] Feng, C., K. C. Khulbe, T. Matsuura, R. Gopal, S. Kaur, S. Ramakrishna, and M. Khayet: Production of Drinking Water from Saline Water by Air-Gap Membrane Distillation Using Polyvinylidene Fluoride Nanofiber Membrane.

Journal of Membrane Science 311 (1-2): 1–6., 2008

<https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-a03d9d56-2d8f-30f2-8e81-899871e4182c>