

MEMBRÁN MŰVELETEK

Dr. Pécs Miklós
Dr. Fehér Csaba



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

MEMBRÁN MŰVELETEK

2. **Koncentráció lépés(ek)** → a nagyobb mennyiségben jelen lévő szennyezéseket, elsősorban a vizet választjuk el.

Jellemző műveletek:

- Extrakció
- Adszorpció
- MEMBRÁNSZŰRÉS**
- Csapadékképzés (bepárlás, desztilláció)



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

2

Bevezetés

A **membrán** közbenső fázis két fluidum között, amelyen szelektív anyagtranszport folyik.

A transzportok hajtóerejének megértéséhez végezzünk el egy gondolat-kísérlet:

Ultraszűrő membránnal választunk ketté egy folyadékteret, amelyben azonos koncentrációban vannak jelen az alábbi anyagok:

Mi történik?

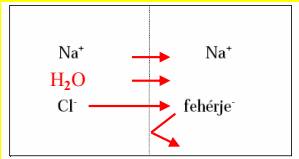
Na ⁺	Na ⁺
Cl ⁻	fehérje ⁻



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

3


A klorid ionok a koncentráció különbség hatására megindulnak a jobboldali térbe.



A fehérje ionok nem tudnak behatolni a bal oldali térbe.

A klorid ionok negatívá teszik a jobb oldali teret – ennek hatására a nátrium ionok is megindulnak jobbra.

A jobb oldali térben nagyobb lesz a koncentráció (klorid és nátrium ion többlet) ennek hatására ozmózis lép fel: a víz is diffundálni kezd a jobb oldali térbe.




BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

Hogyan kerül ez a rendszer egyensúlyba? Sem a koncentrációk, sem a töltések, sem az ozmózisnyomás nincsenek egyensúlyban!

A kémiai potenciálok válnak egyenlővé!

$$\mu_i = \mu_{i0} + S_i T + V_i p + RT \ln a_i + z_i F \phi + \dots$$

A membrántranszportnak többféle hajtóereje lehet!



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

A membrános elválasztások csoportosítása

	Belépő fluidum	Kilépő fluidum	Hajtóerő	Átlép	Visszamarad
Gázpermeáció	gáz	gáz	koncentráció v. parciális nyomás	gáz	
Pervaporáció	oldat	Gáz (gőz)	koncentráció v. parciális nyomás	gáz	
Dialízis	oldat	oldat	koncentráció különbség	kis mol. anyagok	nagy mol. anyagok
Elektrodialízis	oldat	oldat	elektromos tér	ionok	
Reverz ozmózis	oldat	oldat	nyomás	oldószer	
Ultraszűrés	oldat	oldat	nyomás	kis mol. anyagok	nagy mol. anyagok
Mikroszűrés	szuszpenzió	oldat	nyomás	nagy mol. anyagok	kolloid részecskék
Szűrés	szuszpenzió	szuszpenzió	nyomás	kolloid részecskék	makro-részecskék



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

6

Membránműveletek jellemzése

Gázpermeáció

- gázelegyenben egyes komponensek feldúsítása, „molekulaszita”

Pervaporáció

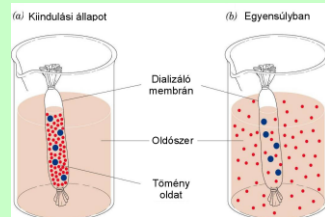
- folyadék komponensei anyagi minőségüktől függő mértékben oldódnak be a membrán anyagába és a túloldalon gőz formájában lépnek ki
- **hajtóerő:** komponens egyensúlyi gőznyomása és a gőztér nyomása közötti különbség → vákuum
- **biotechnológiai alkalmazása:** etanol fermentáció
- **analitikai alkalmazása:** közvetlen mintavételezés a fermentorból tömegspektrometriás méréshez



Membránműveletek jellemzése

Dialízis

- fehérjék kis molekulatömegű szennyezéseinek eltávolítása (pl. ki-sózás után)
- **hajtóerő:** koncentrációkülönbség
- **mechanizmus:** diffúzió
- **laboratóriumi alkalmazás:** dializáló hüvely
- **orvosi alkalmazás:** művese



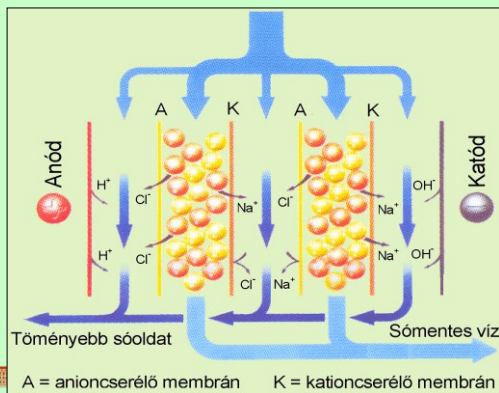
Membránműveletek jellemzése

Elektrodialízis

- **hajtóerő:** elektromos tér – egyenfeszültség
- **mechanizmus:** diffúzió
- **szelektivitás:** az anion- és kationcserélő membránok csak a kötődő ionokat engedik át.
- **elektromos ellenállás:** 3 - 20 Ω/cm² (0.5 M NaCl oldattal egyensúlyban)
- **iontranszportszám:** 0.85 - 0.95
- **elektroozmózis:** 100 - 200 cm³ víz/szállított ekvivalens ion
- **ellenirányú diffúzió**



(Hagyományos) elektrodialízis

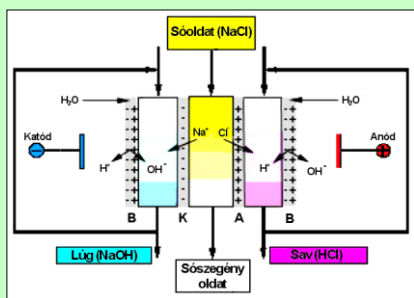


Bipoláris elektrodialízis

Bipoláris membránok: anion- és kationcserélő réteget tartalmaznak.

Áram hatására a víz disszociál →

H⁺ és OH⁻ ionokat ad le.



Membránműveletek jellemzése

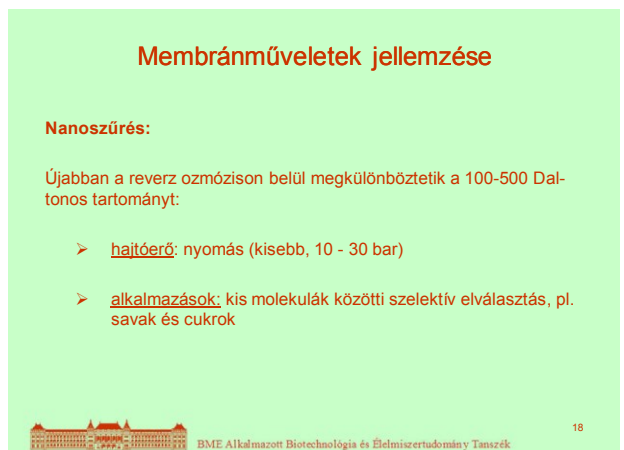
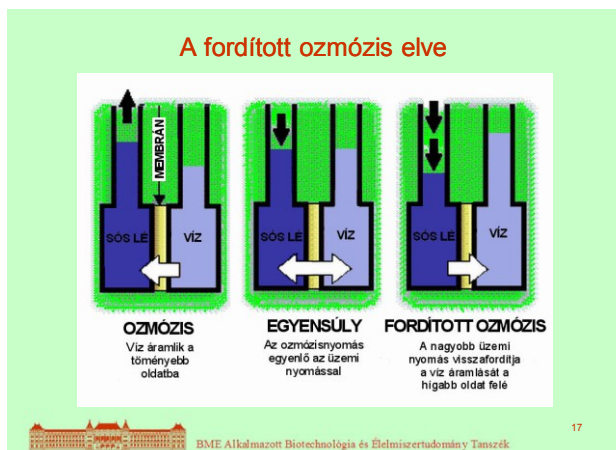
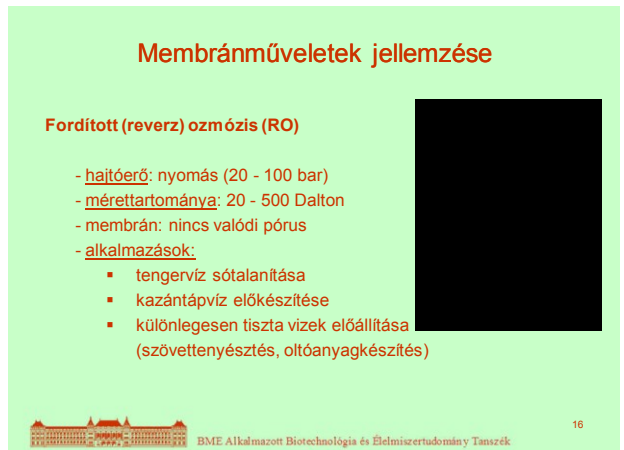
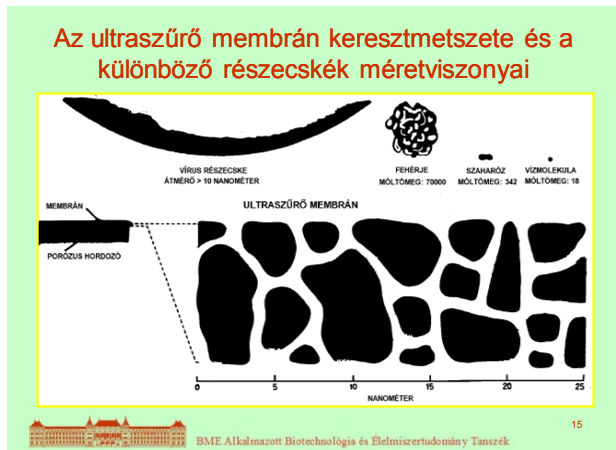
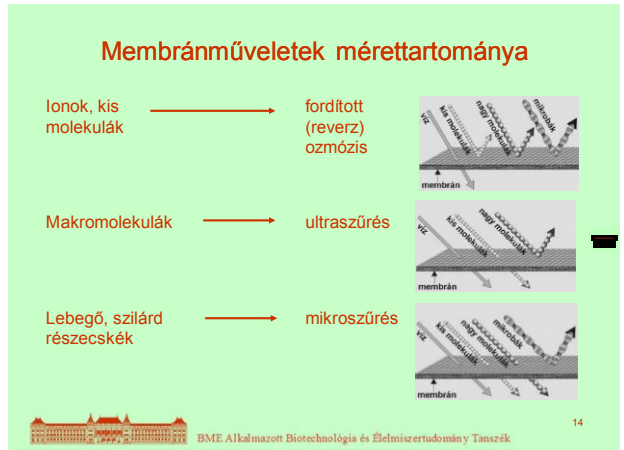
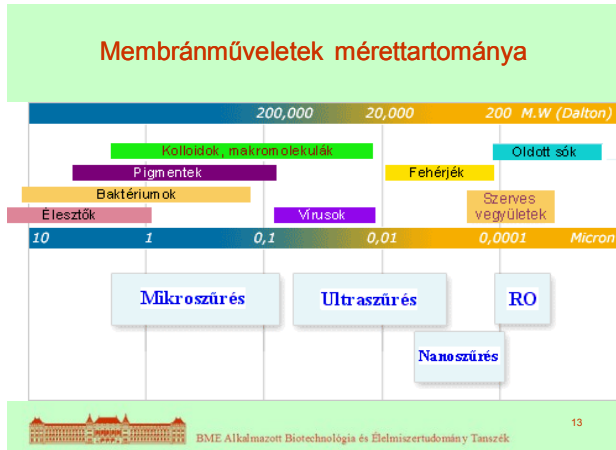
Az elektrodialízis alkalmazásai:

- nagy tisztaságú víz előállításához előkezelésként
- brakkvizek sótalanítása
- só előállítása tengervízből
- tejipari alkalmazások
- fermentációs felhasználások

Bipoláris elektrodialízis:

- savak felszabadítása sókból (pl. tejsav)
- borok savcsökkentése

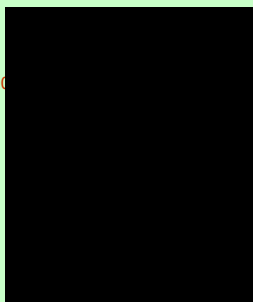




Membránműveletek jellemzése

Ultraszűrés (UF)

- mérettartománya: 500 – 100 000 nm
- valódi pórusok: 1 – 1000 nm
- méret szerinti elválasztás
- hajtóerő: nyomás (2 - 20 bar)



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

19

Membránműveletek jellemzése

Mikroszűrés

- lebegő, szilárd részecskék elválasztása
- jól definiált pórusok: 0,1 – 1 μm
- Szitahatás
- élő sejtek visszatartása
- élelmiszeripari alkalmazása: oldatok sterilizése



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

20

A membrános elválasztások elmélete

Koncentrációkülönbség hatására létrejövő komponens áram

Fick törvénye:

$$J_i = -D_i \text{grad } a_i = D \frac{\Delta c}{L}$$

Megoszlási hányados:

$$K = \frac{c_{i1}}{c_{m1}} = \frac{c_{i2}}{c_{m2}}$$



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

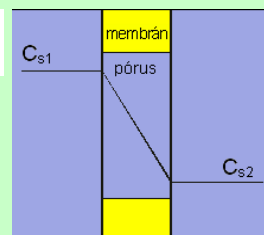
21

Az elméleti koncentrációprofil

A diffundáló oldott anyag árama:

$$J_i = \frac{D}{L}(c_{m1} - c_{m2}) = \frac{DK}{L}(c_{i1} - c_{i2}) = P_m \Delta c_i$$

- D – diffúziós állandó
- L – pórus hossza
- K – „megoszlási hányados”
- P_m – permeabilitás



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

22

A membrános elválasztások elmélete

Nyomáskülönbség hatására létrejövő komponens áram

D'Arcy törvénye:

$$J_{\text{vol}} = -\frac{k}{\mu} \text{grad } p \Rightarrow \frac{k \cdot \Delta p}{\mu L}$$

Hagen-Poiseuille törvénye:

$$\Rightarrow \frac{N\pi r^4 \Delta p}{8\eta \Delta x}$$



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

23

A membrános elválasztások elmélete

Ozmózisnyomás-különbség hatására létrejövő komponens áram

Van't Hoff törvénye:

$$\pi = RT \sum c_i$$

Eredő szűrletáram:

$$J_v = L_p(\Delta p - \Delta \pi)$$

Visszatartóképesség:

$$\sigma = 1 - \frac{c_{s2}}{c_{s1}}$$



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

24

A membrános elválasztások elmélete

Anyagáram

az oldószerre:

$$J_v = L_p(\Delta p - \sigma \Delta \pi)$$

az oldott komponensekre:

$$J_i = P_m \Delta c_s + (1 - \sigma) c_s J_v$$

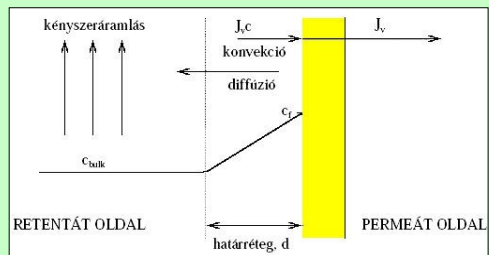
difúziós
transzport

konvekciós
transzport



Eltérések az elméleti koncentrácioprofíltól

Koncentrációs polarizáció



Eltérések az elméleti koncentrácioprofíltól

Állandósult állapotban:

a konvekció a membrán felületére =
= ellenirányú diffúzió a főtömegbe

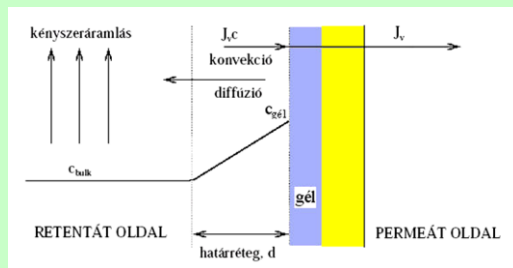
$$J_v c_{bulk} = D \frac{dc}{dx}$$

$$J_v = \frac{D}{x} \ln \frac{c_{felületi}}{c_{bulk}}$$



Eltérések az elméleti koncentrácioprofíltól

Gélpolarizáció



Eltérések az elméleti koncentrácioprofíltól

A határrétegben:

$$J_v = K \ln \frac{c_{gélésedési}}{c_{bulk}}$$

Ellenállásokkal felírva:

$$J_v = \frac{1}{R_m + R_{g1}} (\Delta p - \Delta \pi)$$

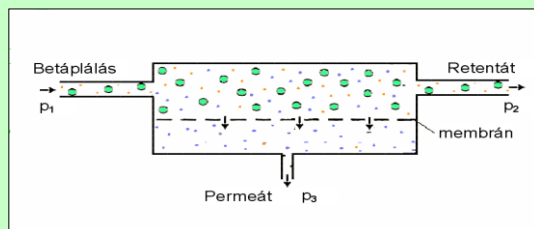


A technológiai paraméterek hatása

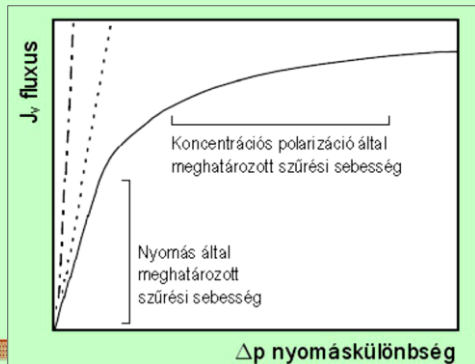
Nyomáskülönbség

hajtóerő:

$$\Delta p = \frac{p_1 + p_2}{2} - p_3$$



A nyomáskülönbség hatása a membránszűrés sebességére



31

A technológiai paraméterek hatása

Tangenciális sebesség

(keresztáramú szűrés, tangenciális szűrés)

Optimális áramlási sebesség meghatározása:

az áramlás gyorsítása növeli a szűrés sebességét és a retenciót de nő a szivattyúzás energiaigénye → és a rendszer melegebbé.

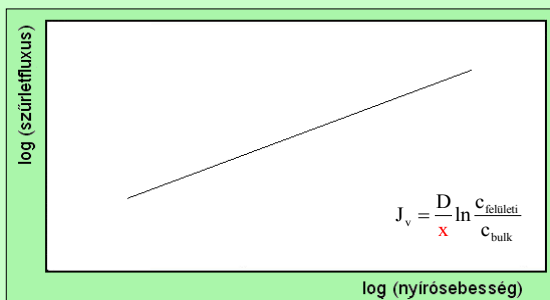
A turbulencia jellemezhető: Re szám
P/V
nyírősebesség



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

32

A permeát fluxus és a nyírősebesség összefüggése

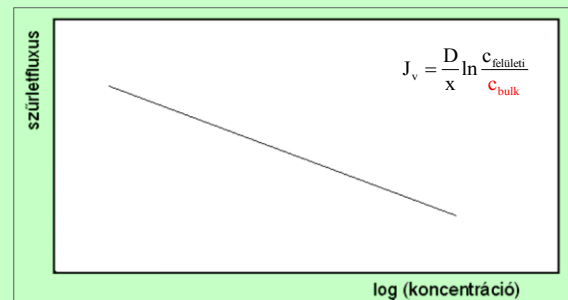


33



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

A fehérjekoncentráció hatása a membránszűrés sebességére



34



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

A technológiai paraméterek hatása

A membrán (ifjú)kora

A vadonatúj membrán tulajdonságai a legelső használatba vételnél erősen megváltoznak.

A membrán öregedésére ható legfontosabb tényezők:

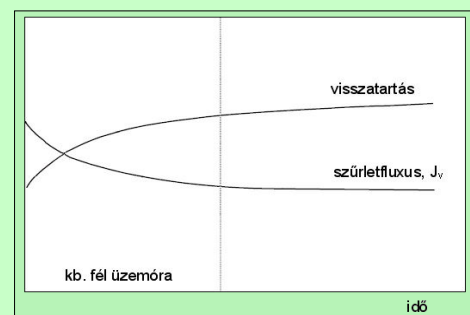
- a fehérjék adszorpciója a membrán felületén
- (irreverzibilis) gél vagy rétegeképződés a felületen
- szilárd részecskék (sejttörmelékek), vagy fehérjék "beszorulása" a membrán pórusaiba



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

35

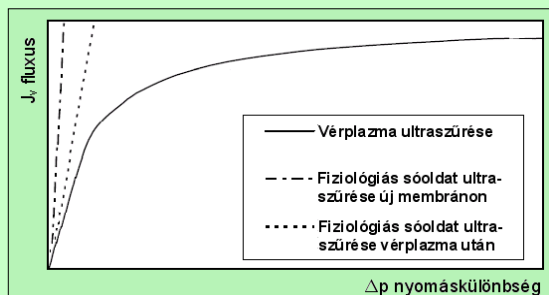
Az új membrán tulajdonságainak változása



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

36

A membrán "előéletének" hatása



A technológiai paraméterek hatása

Hőmérséklet

- viszkozitás,
- adszorpciós folyamatok egyensúlyi viszonyai,
- molekulák diffúziós állandói,
- membrán anyagának tulajdonságai változnak.



A technológiai paraméterek hatása

Káros hatások minimalizálása:

- koncentrációs polarizáció csökkentése
- adszorpció és aggregáció minimalizálása

Tisztítás, regenerálás:

- mosás
- kémiai kezelés (erős savak és/vagy bázisok)
- proteolitikus enzimekkel



A membránszűrés anyagmérlegei

Alapfogalmak

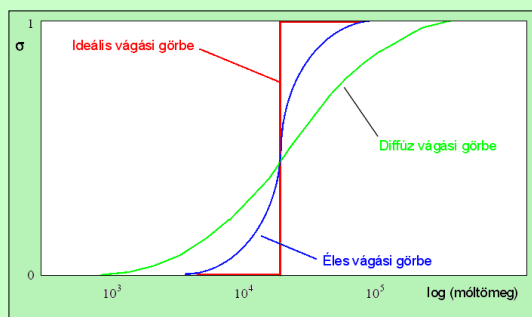
– membrán szelektivitása:

$$\sigma = 1 - \frac{c_p}{c_r}$$

– vágási (cutoff) érték: az a molekulatömeg, amelyet az adott membrán 90 %-ban (más konvenció szerint 50 %-ban) visszatart.



Vágási görbék

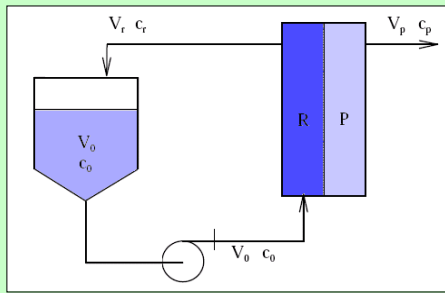


A membránszűrés anyagmérlegei

- permeabilitás (L_p) vagy víztéték: a tiszta oldószer (ionmentes víz) fluxusa a membránon üzemi nyomáson és hőmérsékleten. [$m^3/m^2 \times h$] vagy [$m^3/m^2 \times h \times bar$]
- folyadékáramok:
 - betáplálás (feladás, input) (V_0 ; c_0)
 - membránon áthaladó anyag: szűrlet = permeátum (V_p ; c_p)
 - visszatartott anyag: koncentráció = retentát (V_r ; c_r)



Membránszűrő berendezés folyamatábrája



A membránszűrés anyagmérlegei

- koncentrációs faktor (CF): a visszatartott komponensek betöményítésének mértékét adhatjuk meg vele:

$$CF = \frac{\text{bevitt térfogat}}{\text{visszatartott térfogat}} = \frac{V_0}{V_r}$$

- kihozatal (recovery): a megszárt, megtisztított oldat mennyiségére jellemző:

$$R = \frac{\text{permeát térfogat}}{\text{bevitt térfogat}} = \frac{V_p}{V_0}$$

- összefüggésük:

$$CF = \frac{1}{1-R}$$

A membránszűrés anyagmérlegei

Koncentrációs membrán

Az oldat keringetése során az oldószer és a vissza nem tartott komponensek folyamatosan távoznak a rendszerből, ezáltal a térfogat csökken, azaz a visszatartott komponensek koncentrációja növekszik.

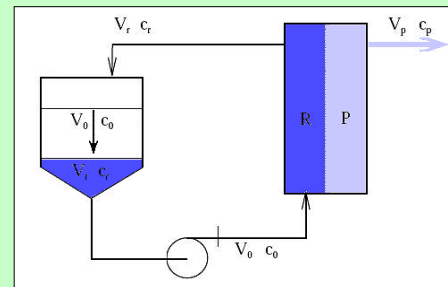
Anyagmérleg:

$$V_0 c_0 = V_r c_r + V_p c_p$$

$$c_p = \frac{V_0 c_0 - V_r c_r}{V_p}$$

$$c_r = \frac{V_0 c_0 - V_p c_p}{V_r}$$

Membrános koncentrációs folyamatábrája



A membránszűrés anyagmérlegei

A koncentrációs differenciális anyagmérlege:

$$\frac{d(V_r c_r)}{dt} = 0 - W c_r (1 - \sigma) \quad \text{ahol:} \quad W = -\frac{dV}{dt}$$

integrálva:

$$\ln \frac{c_r}{c_0} = \sigma \ln CF \quad \longrightarrow \quad c_r = c_0 CF^\sigma$$

A membránszűrés anyagmérlegei

Elválasztás membránszűréssel

A különböző visszatartást az eltérő σ értékek számszerűsítik. Azonos σ értékek esetén az elválasztás nem valósítható meg.

Elválasztás vizsgálatához:

$$\frac{c_{1R}}{c_{2R}} = \frac{c_{10}}{c_{20}} \frac{CF^{\sigma 1}}{CF^{\sigma 2}}$$

$$\left(\frac{c_1}{c_2} \right)_R = \left(\frac{c_1}{c_2} \right)_0 CF^{(\sigma 1 - \sigma 2)}$$

Sajtgyári savó ultraszűrése

4.3.5.3.1. táblázat: Sajtgyári savó ultraszűrése

	Betáplált savó	Koncentrátum	Permeátum
Fehérje, %	0.80	5.87	0
Laktóz, %	4.80	4.80	4.80
Só, %	0.70	0.70	0.70
Zsír, %	0.05	0.37	0
Fehérje % /összes szárazanyag	12.60	50.00	0
Laktóz % / összes szárazanyag	75.59	40.89	87.27
Fehérje/laktóz %	16.67	122.29	0



A membránszűrés anyagmérlegei

Diaszűrés

Víz hozzáadásával és szűrlet formájában való elvételével a kis molekulatömegű anyagokat szelektíven eltávolítják, kimossák az oldatból.

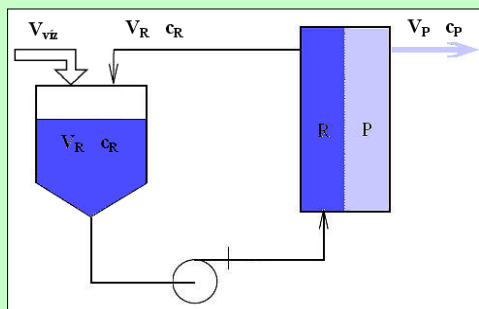
Állandó retentát térfogat:

$$V_0 = V_R$$

$$V_P = V_{\text{víz}}$$



A diaszűrés folyamatábrája



A diaszűrés anyagmérlegei

Anyagmérleg:

$$\frac{d(V_R c_R)}{dt} = 0 - W c_R (1 - \sigma)$$

mivel $V_R = V_0 = \text{állandó}$:

$$V_R \frac{dc_R}{dt} = 0 - \frac{dV_{\text{víz}}}{dt} c_R (1 - \sigma)$$

integrálva:

$$\ln \frac{c_R}{c_0} = - (1 - \sigma) \frac{V_{\text{víz}}}{V_0} \rightarrow c_R = c_0 e^{- (1 - \sigma) \frac{V_{\text{víz}}}{V_0}}$$



A membránszűrés anyagmérlegei

Teljes visszatartás esetén (nagy molekulatömeg, $\sigma = 1$):

$C_R = C_0$ \rightarrow a koncentráció nem csökken.

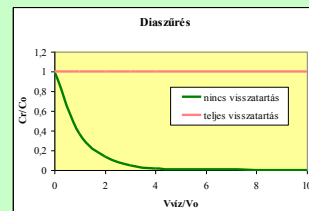
Kis molekulájú anyagoknál ($\sigma = 0$):

$c_R = c_0 e^{- (1 - \sigma) \frac{V_{\text{víz}}}{V_0}}$ \rightarrow a koncentráció exponenciálisan csökken.



Diaszűrés

	Eltávolítás, %
1	63.2121
2	86.4665
3	95.0213
4	98.1684
5	99.3262
10	99.9995



A diaszűrés anyagmérlegei

Elválasztás, tisztítás diaszűréssel

két komponensre:

$$\left(\frac{c_1}{c_2}\right)_K = \left(\frac{c_1}{c_2}\right)_0 \exp\left[-\frac{V_{viz}}{V_0}(\sigma_2 - \sigma_1)\right]$$



Diaszűrés

4.3.5.6.1. táblázat: Diaszűrés hatása a makromolekulák tisztaságára

$\frac{V_{viz}}{V_0}$	Csűrítje %	c_{s0} %	$\frac{c_{s0}}{Csűrítje}$	összes szárazanyag	$\frac{Csűrítje}{összes szárazanyag}$ %
0	15	4,00	0,27	19,0	79,0
1	15	1,50	0,10	16,5	90,9
2	15	0,54	0,04	15,5	96,8
3	15	0,20	0,01	15,2	98,7



A membránszűrés anyagmérlegei

Az ultraszűrés munkavonala

$$J_v = \frac{D}{x} (\ln c_f - \ln c_{bulk})$$

konstansokkal felírva:

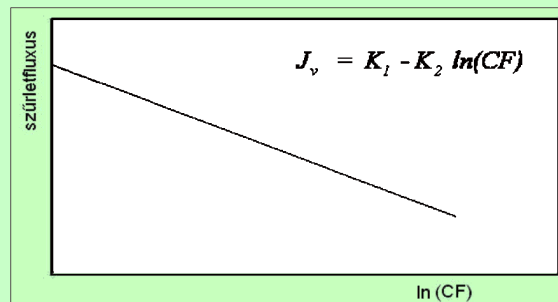
$$J_v = A_1 - A_2 \ln c_b$$

$$c_R = c_0 CF^\sigma$$

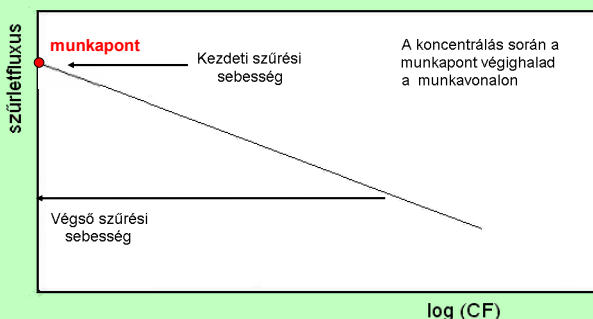
$$J_v = K_1 - K_2 \ln CF$$



Az ultraszűrés munkavonala



A membránszűrés munkavonala



A membránszűrés anyagmérlegei

Térfogatáram:

$$\frac{dV}{dt} = -AJ_v$$

Átlagos fluxus:

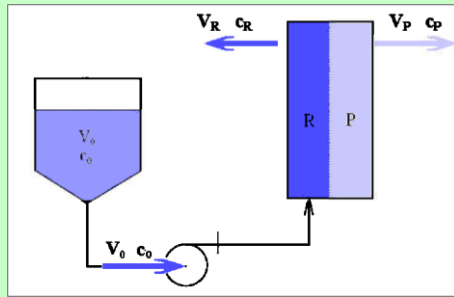
$$J_v = L_p (\Delta p - \Delta \pi)$$

Szűrési idő:

$$t = \frac{1}{AL_p \Delta p} \left(V_0 - V + \frac{RTn}{\Delta p} \cdot \ln \left(\frac{V_0 - RTn/\Delta p}{V - RTn/\Delta p} \right) \right)$$



A folyamatos membránszűrés folyamatábrája



A membránszűrés anyagmérlegei

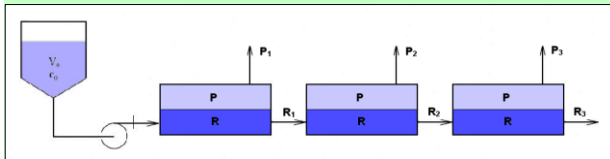
A koncentrációs faktor értelmezése megváltozik:

$$CF = \frac{\text{betáplált térfogatáram}}{\text{koncentrátum térfogatáram}} = \frac{W_0}{W_r} = \text{állandó}$$

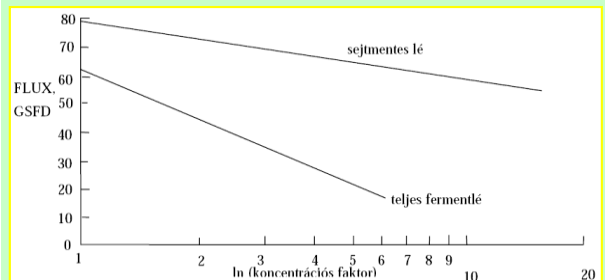
- Folyamatos működés → állandósult állapot → a paraméterek az idővel alig változnak → csak a membrán "öregedése", miatt
- Állandó retentát oldali koncentráció → állandó fluxus → a munkapont nem vándorol → a berendezés állandóan a legnagyobb fluxus értéken működik

A többlépcsős folyamatos membránszűrés folyamatábrája

$$CF_1 = \sqrt[3]{CF_{\text{összes}}}$$



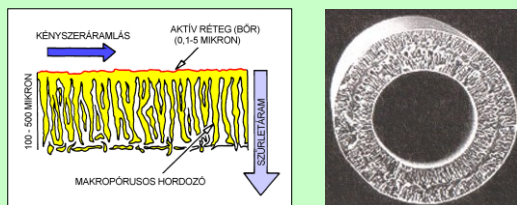
Teljes és szűrt fermentlé membránszűrésének összehasonlítása



A membránok jellemzői

Membránok csoportosítása

Szerkezet szerint: izotróp vagy anizotróp



A membránok jellemzői

Ha a membrán rétegei eltérő anyagból készülnek, akkor beszélünk összetett, vagy **kompozit membránról**.

Hagyományos **szénapalú polimer hátrtyát** szinte bármely hordozóra fel lehet vinni, de előfordulnak teljesen szervesetlen rendszerek is, pl. **fémoxid bevonat** szinterelt kerámián.

A **folyadékmembránok** nem elegendő folyadék réteget képeznek, amely szelektíven engedi át a különböző komponenseket → két permeábilis film között, folyadék felszínén, emulgeáló szerekkel vagy anélkül is létrehozható.

A membránok jellemzői

Membránok előállítása

Alapanyagok:

- regenerált cellulóz
- polimerek (teflon, polyszulfon, poliakrilonitril, PVC, poliészter, polietilén, polipropilén)
- kerámia
- fémek

Tendencia: egyre ellenállóbb, nagyobb hőmérsékleten és extrém pH értékeken is használható membránok.



A membránok jellemzői

Módszerek:

- vizes kicsapás (lap, cső-, és üregesszál membránok előállítására)
- illékony oldószerben oldott polimerek esetében a felületről elpárolgó oldószerből filmréteg marad vissza
- kicsapás hűtéssel
- szintereléssel (porkohászati úton) (kerámia, fémek, teflon)
- extrudálással ill. húzással



A membránok jellemzői

Pórusok utólagos létrehozásának eszközei:

- nyújtás (a pórusok közel azonos méretűek, de nem kör keresztmetszetűek)
- lézersugaras perforálás
- bombázás elemi részecskékkel (a besugárzás következtében létrejött szerkezeti hibákat maratófürdőben tágtíjják pórusokká)



Membránmodulok

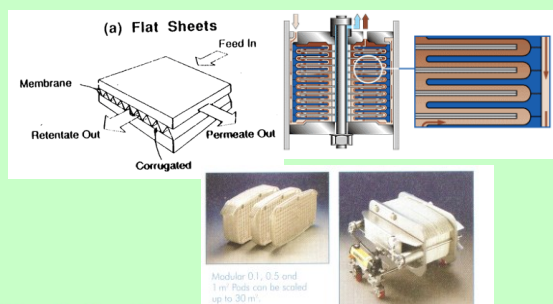
Hordozóval, távtartókkal, csatlakozókkal, burkolattal ellátott cserélhető egységek az ún. membránmodulok.

Főbb kialakítási típusaik:

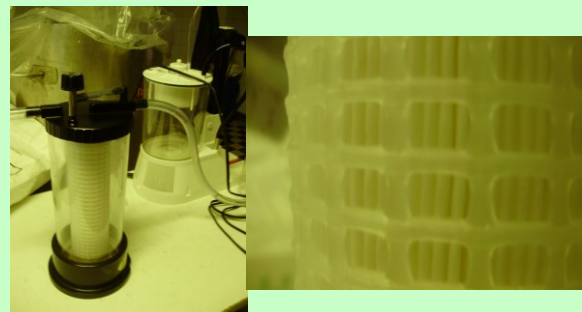
- sík formájú membránok (csak lamináris áramlás)
 - **lapmembránok** (legrégibbi, több rétegű lehet, eltömődésre hajlamos, könnyen javítható)



Lapmembrán modulok

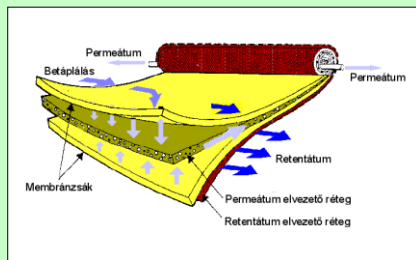


Lapmembrán modulok



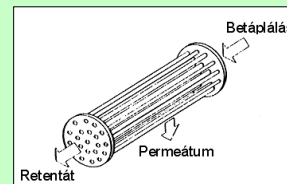
Membránmodulok

spirális membránmodulok: feltekercselt zsákszerű membránokból áll. Távtartó háló. Nem javítható.



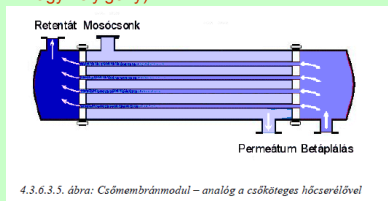
Csőmembrán modulok

- cső formájú membránok (turbulens áramlás is lehet)
- **csőmembránok** (belső és külső me-revítésűek, 6-20 cső egy modulban, egyszerű tisztítás, nagy helyigény)



Csőmembrán modulok

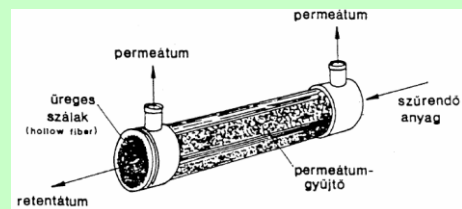
- cső formájú membránok (turbulens áramlás is lehet)
- **csőmembránok** (belső és külső me-revítésűek, 6-20 cső egy modulban, egyszerű tisztítás, nagy helyigény)



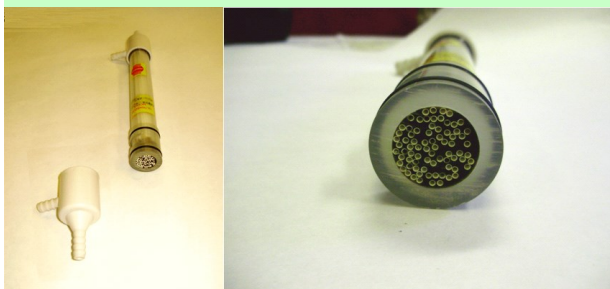
4.3.6.3.5. ábra: Csőmembránmodul – analóg a csőköteges hőcserélővel

Membránmodulok

- **üregesszál (hollow fiber) membránok** (belső méret 0,5-1,5 mm, üzemi nyomás korlátozott, több száz szál egy modulban)



Membránmodulok



Membránmodulok

- **mikrokapillaris membránok** (belső méret 5-20 μm , több ezer kapillaris egy modulban, nagy nyomásesés, kis áramlási sebesség)

Ipari membránszűrő telep



Szervetlen (kerámia, fém) modulok

Szinterelés : porkohászati formázás. Az elválasztás a járatok belső felületén kialakított vékony, szűkebb pórusú kerámia rétegen történik.

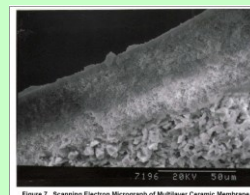
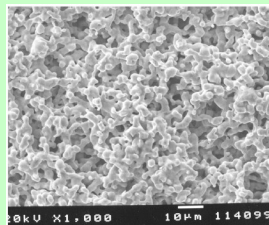
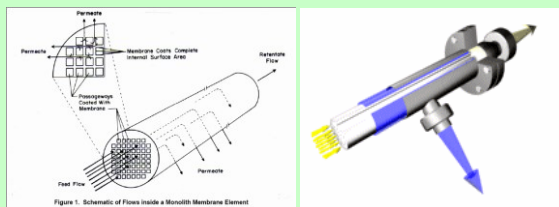


Figure 7. Scanning Electron Micrograph of Multilayer Ceramic Membrane

Szinterelt membránok

A permeátum a kerámia test pórusaiban vándorolva a hasáb külső felületén jelenik meg.



Szinterelt membránok

Szinterelt kerámia hasáb, amelyben párhuzamosan csőszerű járatok futnak.



Üzemközi membránvizsgálat. Buborékpont meghatározása

Mikor kell cserélni a használt membránt? → üzemközi vizsgálatok → vizérték, integritásvizsgálat.

Vizérték: fehérjék adszorpciója irreverzibilis változásokat okoz → vizsgálat: köbözés

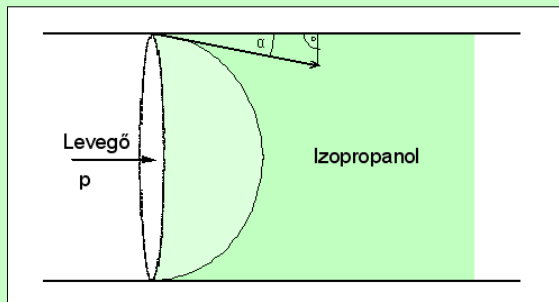
Üzemközi membránvizsgálat. Buborékpont meghatározása

Integritásvizsgálat: buborékpont meghatározás

elsősorban hidrofil, mikropórusos membránoknál használható

alapelv: ha egy kapillárisból gáznomással szorítjuk ki a folyadékot, a nyomás és a kapilláris átmérője fordítottan arányos egymással.

A gáz-folyadék határfelület kapillárisban



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

85

Üzemközi membránvizsgálat. Buborékpont meghatározása

Az erőegyensúly:

$$p_{\text{gaz}} \left[\frac{d^2 \pi}{4} \right] = d \pi \gamma \cos \alpha$$

$$\longrightarrow p_{\text{gaz}} = \frac{4 \gamma \cos \alpha}{d}$$

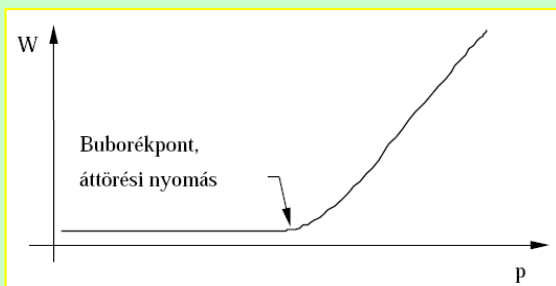
Ha fokozatosan növeljük a gáz nyomását, akkor elsőként a legnagyobb átmérőjű pórusból szorul ki a folyadék, tehát az áttörési nyomás (buborékpont) jellemző a legnagyobb pórus méretére.



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

86

A buborékpont meghatározás térfogatáram-görbéje



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

87