

MEMBRÁN MŰVELETEK

Dr. Pécs Miklós



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

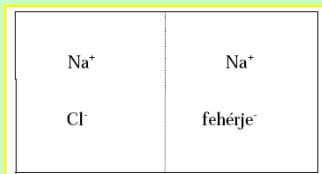
Bevezetés

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

A transzportok hajtóerejének megértéséhez végezzünk el egy gondolatkísérletet:

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

Mi történik?

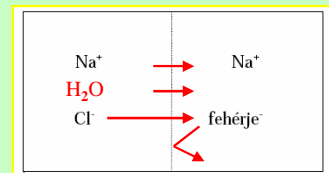


BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

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 negatívvá 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	koncentráció v. parciális nyomás	gáz	
Dialízis	oldat	oldat	koncentráció különbség	kismol. anyagok	nagymol. anyagok
Elektrodialízis	oldat	oldat	elektromos tér	ionok	
Reverz ozmózis	oldat	oldat	nyomás	oldószer	
Ultraszűrés	oldat	oldat	nyomás	kismol. anyagok	nagymol. anyagok
Mikroszűrés	szuszpenzió	oldat	nyomás	nagymol. anyagok	kolloid részecskék
Szűrés	szuszpenzió	szuszpenzió	nyomás	kolloid részecskék	makro-részecskék



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

6

Membránműveletek jellemzése

Gázpermeáció

- gázkeletben egyes komponensek feldúsítása, „molekulaszita”

Pervaporáció

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



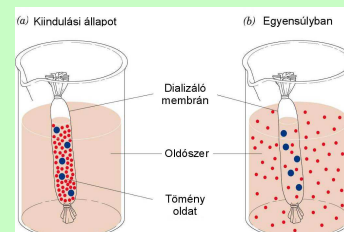
BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

7

Membránműveletek jellemzése

Dialízis

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



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

8

Membránműveletek jellemzése

Elektrodialízis

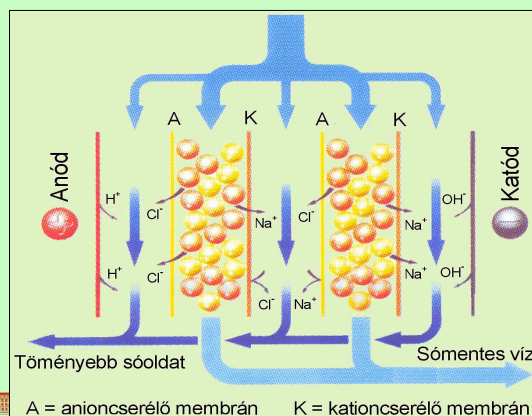
- > **hajtóerő:** elektromos tér – egyenfeszültség
- > **mechanizmus:** diffúzió
- > **szelektivitás:** az anion- és kationcserélő membránok csak a kötődő ionokat engedik át.
- > **elektromos ellenállás:** 3 - 20 Ω /cm² (0.5 M NaCl oldattal egyensúlyban)
- > **iontranszportszám:** 0.85 - 0.95
- > **elektroozmózis:**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



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

9

(Hagyományos) elektrodialízis



A = anioncserélő membrán K = kationcserélő membrán

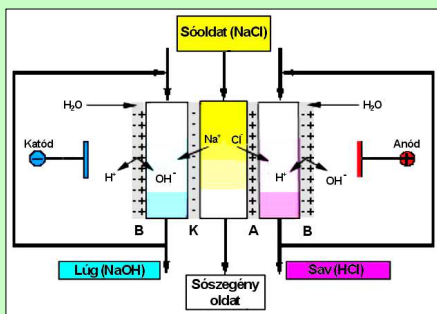
10

Bipoláris elektrodialízis

Bipoláris membránok: anion- és kationcserélő réteget tartalmaznak.

Áram hatására a víz disszociál \rightarrow

H⁺ és OH⁻ ionokat ad le.



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

11

Membránműveletek jellemzése

Az elektrodialízis alkalmazásai:

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

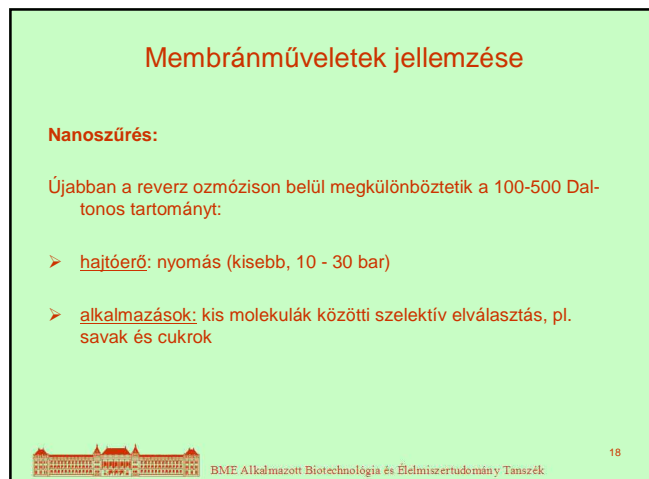
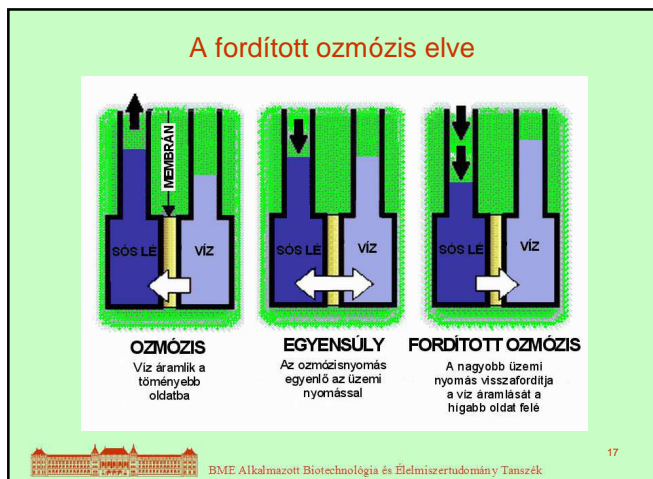
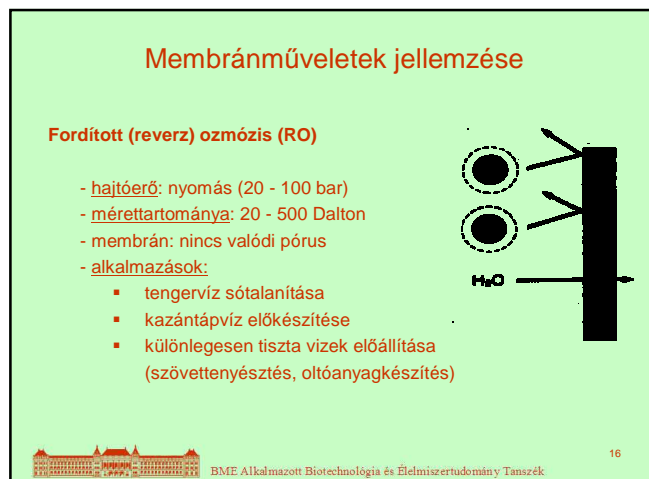
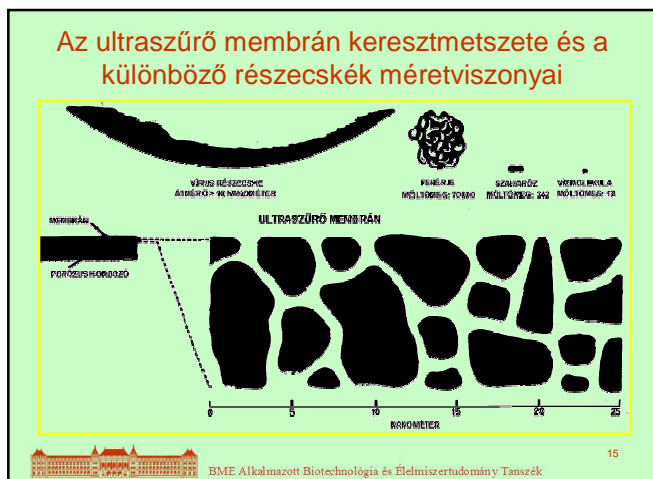
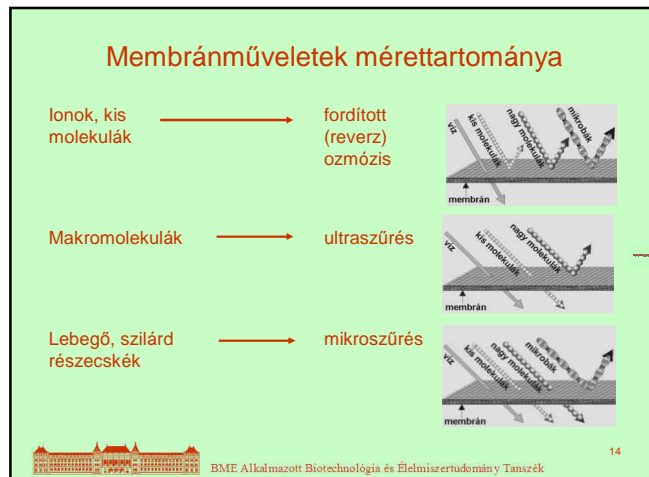
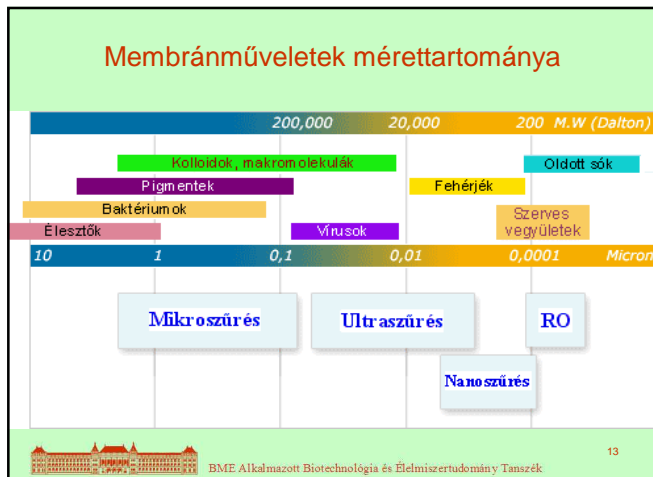
Bipoláris elektrodialízis:

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



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

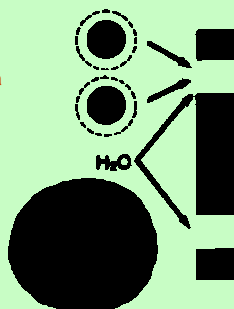
12



Membránműveletek jellemzése

Ultraszűrés (UF)

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



Membránműveletek jellemzése

Mikroszűrés

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



A membrános elválasztások elmélete

Koncentrációkülönbség hatására létrejövő komponens áram

Fick törvény:

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

Megoszlási hányados:

$$K = \frac{c_{s1}}{c_{m1}} = \frac{c_{s2}}{c_{m2}}$$

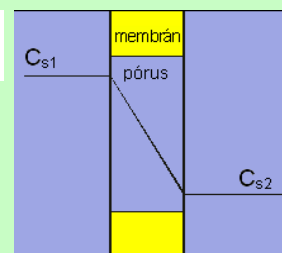


Az elméleti koncentrációprofil

A diffundáló oldott anyag árama:

$$J_i = \frac{D}{L}(c_{m1} - c_{m2}) = \frac{DK}{L}(c_{s1} - c_{s2}) = P_m \Delta c_i$$

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



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 törvény:

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



A membrános elválasztások elmélete

Ozmózisnyomás-különbség hatására létrejövő komponens áram

Van't Hoff törvény:

$$\pi = RT \sum c_i$$

Eredő szűrletáram:

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

Visszatartóképesség:

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



A membrános elválasztások elmélete

Anyagáram

az oldószerre:

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

az oldott komponensekre:

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

↓

diffúziós
transzport

↓

konvekciós
transzport

BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék 25

Eltérések az elméleti koncentrácioprofíltól

Koncentrációs polarizáció

BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék 26

Eltérések az elméleti koncentrácioprofíltól

Állandósult állapotban:

a konvekció a membrán felületére =
= ellenirányú diffúzió a főtömegbe

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

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

BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék 27

Eltérések az elméleti koncentrácioprofíltól

Gélpolarizáció

BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék 28

Eltérések az elméleti koncentrácioprofíltól

A határrétegben:

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

Ellenállásokkal felírva:

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

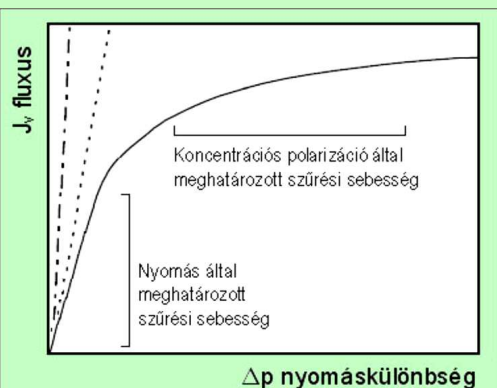
BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék 29

A technológiai paraméterek hatása

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

BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék 30

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 sebességet és a retenciót de nő a szivattyúzás energiaigénye → és a rendszer melege.

A turbulencia jellemezhető:

Re szám

P/V

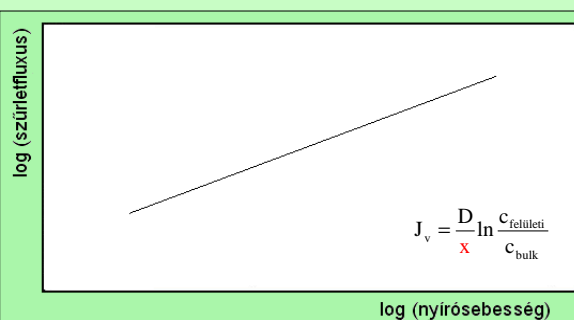
nyírósebesség



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

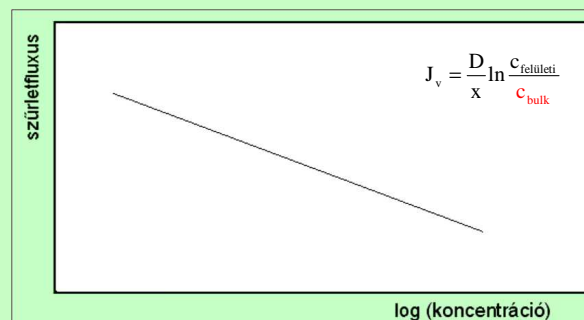
32

A permeát fluxus és a nyírósebesség összefüggése



33

A fehérjekoncentráció hatása a membránszűrés sebességére



34

A technológiai paraméterek hatása

A membrán (ifjú)kora

A vadonatúj membrán tulajdonságai a legelső használatba vételnél erősen megváltoznak.

A membrán öregedésére ható legfontosabb tényezők:

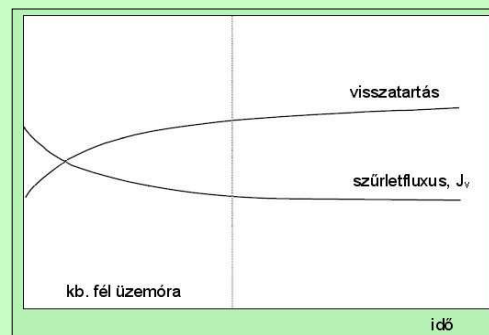
- a fehérjék adszorpciója a membrán felületén
- (irreverzibilis) gél vagy rétegeképződés a felületen
- szilárd részecskék (sejttörmelékek), vagy fehérjék "beszorulása" a membrán pórusaiba



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

35

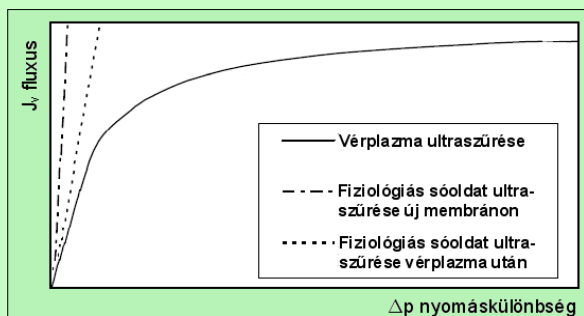
Az új membrán tulajdonságainak változása



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

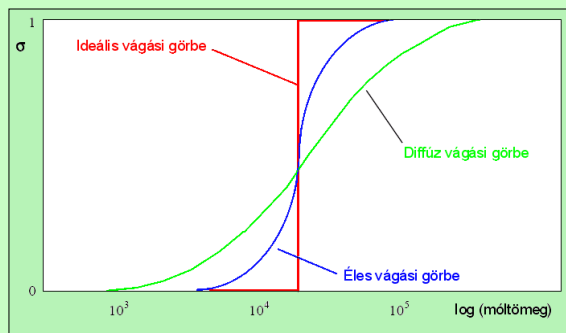
– membrán szelektivitása:

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

– 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 vízérték: a tiszta oldószer (ionmentes víz) fluxusa a membránon üzemi nyomáson és hőmérsékleten. [$\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$] vagy [$\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar}$]
- folyadékáramok:
 - betáplálás (feladás, input) (V_0 ; c_0)
 - membránon áthaladó anyag: szűrlet = permeátum (V_p ; c_p)
 - visszatartott anyag: koncentrátum = retentát (V_r ; c_r)



Membránszűrő berendezés folyamatábrája

43

BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

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:

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

44

BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

A membránszűrés anyagmérlegei

Koncentrációs membránnal

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: $V_0 c_0 = V_r c_r + V_p c_p$

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

45

BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

Membrános koncentrációs folyamatábrája

46

BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

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:

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

47

BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

A membránszűrés anyagmérlegei

Elválasztás membránszűréssel

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

Elválasztás vizsgálatához:

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

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

48

BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

A membránszűrés anyagmérlegei

Diaszűrés

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

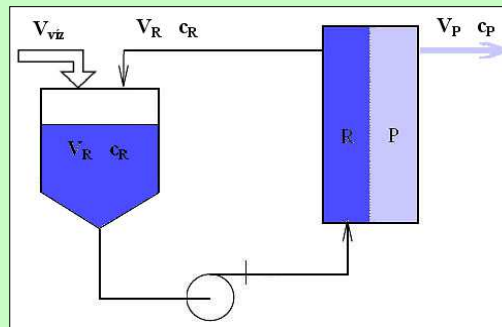
Állandó retentát térfogat:

$$V_0 = V_R$$

$$V_P = V_{v\acute{z}}$$



A diaszűrés folyamatábrája



A diaszűrés anyagmérlegei

Anyagmérleg:

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

mivel $V_R = V_0 = \text{állandó}$:

$$V_0 \frac{dc_R}{dt} = 0 - W c_R (1 - \sigma)$$

integrálva:

$$\ln \frac{c_R}{c_0} = - (1 - \sigma) \frac{V_{v\acute{z}}}{V_0} \longrightarrow c_R = c_0 e^{- (1 - \sigma) \frac{V_{v\acute{z}}}{V_0}}$$



A membránszűrés anyagmérlegei

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

$$c_R = c_0 \longrightarrow \text{a koncentráció nem csökken.}$$

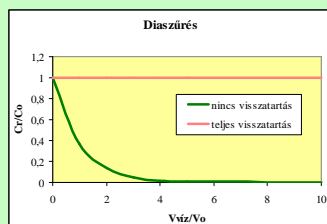
Kis molekulájú anyagoknál ($\sigma = 0$):

$$c_R = c_0 e^{- \frac{V_{v\acute{z}}}{V_0}} \longrightarrow \text{a koncentráció exponenciálisan csökken.}$$



Diaszűrés

$\frac{V_{v\acute{z}}}{V_0}$	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:

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix}_R = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix}_0 \exp \left[- \frac{V_{v\acute{z}}}{V_0} (\sigma_2 - \sigma_1) \right]$$



A membránszűrés anyagmérlegei

Az ultraszűrés munkavonala

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

konstansokkal felírva:

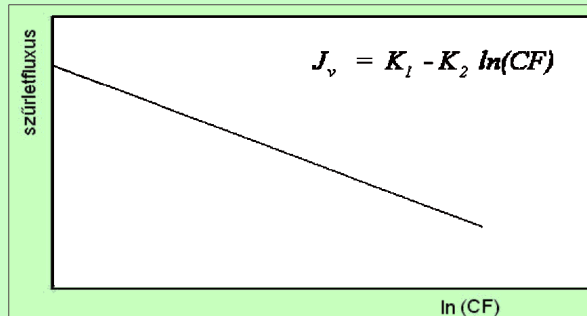
$$J_v = A_1 - A_2 \ln c_b$$

$$c_R = c_0 CF^\sigma$$

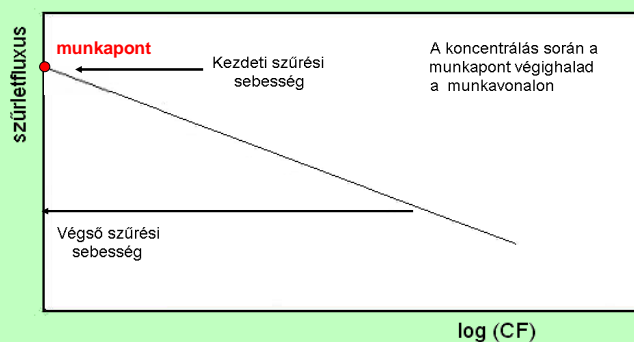
$$J_v = K_1 - K_2 \ln CF$$



Az ultraszűrés munkavonala



A membránszűrés munkavonala



A membránszűrés anyagmérlegei

Térfogatáram:

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

Átlagos fluxus:

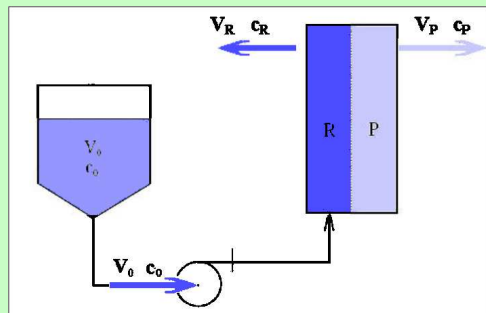
$$J_v = L_p (\Delta p - \Delta \pi)$$

Szűrési idő:

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



A folyamatos membránszűrés folyamatábrája



A membránszűrés anyagmérlegei

A koncentrációs faktor értelmezése megváltozik:

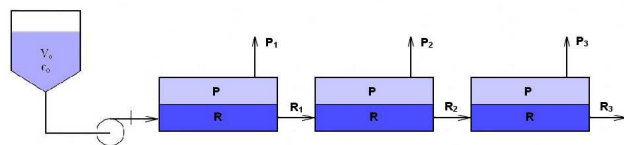
$$CF = \frac{\text{betáplált térfogatáram}}{\text{koncentrátum térfogatáram}} = \frac{W_0}{W_r} = \text{állandó}$$

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



A többlépcsős folyamatos membránszűrés folyamatábrája

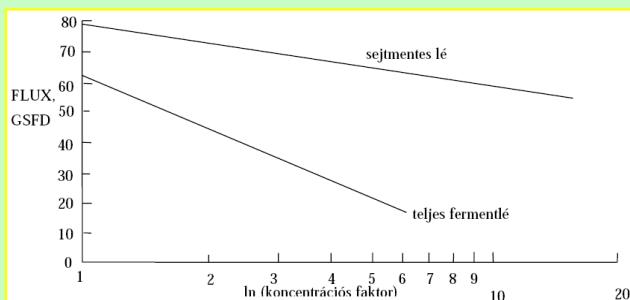
$$CF_1 = \sqrt[3]{CF_{\text{összes}}}$$



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

61

Teljes és szűrt fermenté membránszűrésének összehasonlítása



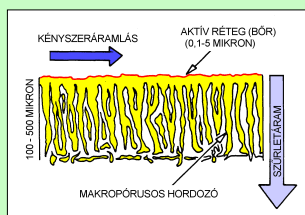
BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

62

A membránok jellemzői

Membránok csoportosítása

Szerkezet szerint: izotróp vagy anizotróp



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

63

A membránok jellemzői

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

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

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



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

64

A membránok jellemzői

Membránok előállítás

Alapanyagok:

- regenerált cellulóz
- polimerek (teflon, poliszulfon, poliakrilnitril, PVC, poliszter, polietilén, polipropilén)
- kerámia
- fémek

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



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

65

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



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

66

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 tágitják pórusokká)



Membránmodulok

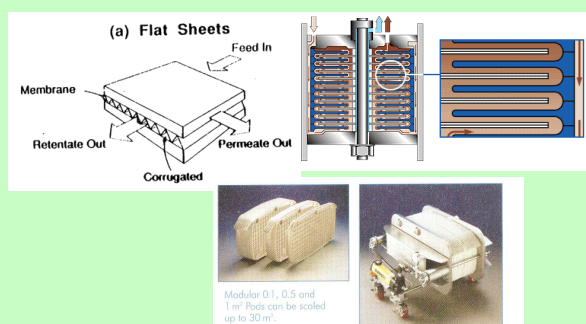
Hordozóval, távtartókkal, csatlakozókkal, burkolattal ellátott cserélhető egységek az ún. membránmodulok.

Főbb kialakítási típusaik:

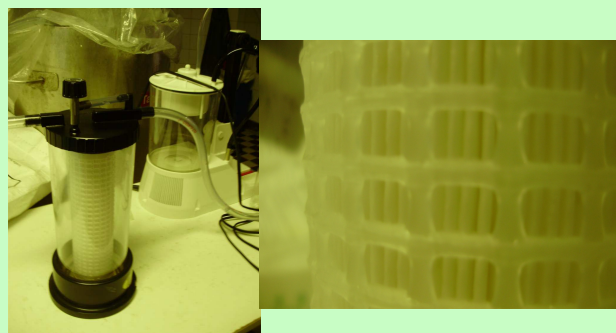
- sík formájú membránok (csak lamináris áramlás)
 - **lapmembránok** (legrégebbi, több rétegű lehet, eltömődésre hajlamos, könnyen javítható)



Lapmembrán modulok

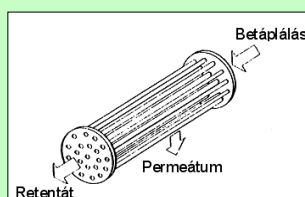


Lapmembrán modulok



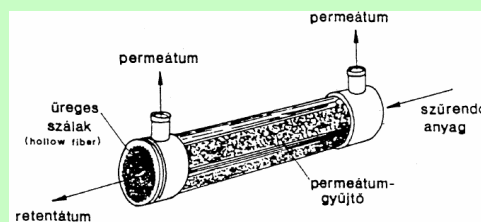
Csőmembrán modulok

- cső formájú membránok (turbulens áramlás is lehet)
- **csőmembránok** (belső méret 12-25 mm, belső és külső merevítésűek, 6-20 cső egy modulban, egyszerű tisztítás, nagy helyigény)



Membránmodulok

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



Membránmodulok

BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

73

Membránmodulok

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

BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

74

Membránmodulok

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

BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

75

Ipari membránszűrő telep

BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

76

Szervetlen (kerámia, fém) modulok

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

BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

77

Szinterelt membránok

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

BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

78

Szinterelt membránok

Szinterelt kerámia hasáb, amelyben párhuzamosan csőszerű járatok futnak.




 BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék 79

Üzemközi membránvizsgálat. Buborékpont meghatározása

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

Víztérték: fehérjék adszorpciója irreverzibilis változásokat okoz → vizsgálat: köbözés


 BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék 80

Üzemközi membránvizsgálat. Buborékpont meghatározása

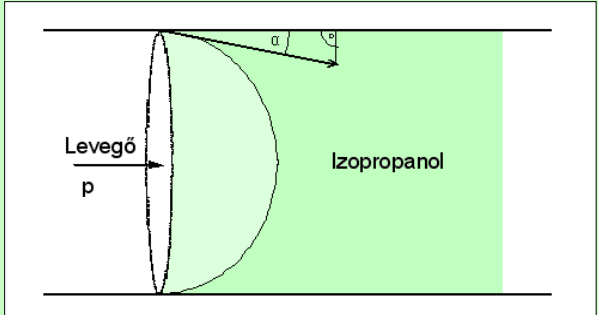
Integritásvizsgálat: buborékpont meghatározás


elsősorban hidofil, mikropórusos membránoknál használható

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

 BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék 81

A gáz-folyadék határfelület kapillárisban




 BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék 82

Üzemközi membránvizsgálat. Buborékpont meghatározása

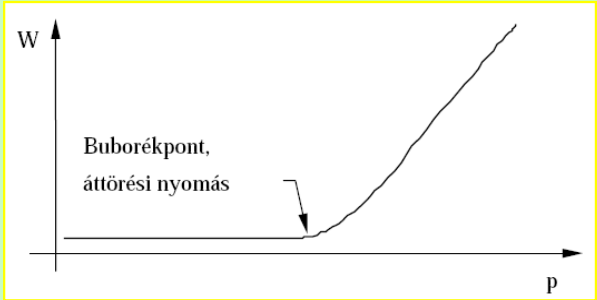
Az erőegyensúly:


$$p_{gáz} \left[\frac{d^2 \pi}{4} \right] = d\pi \gamma \cos \alpha \quad \longrightarrow \quad p_{gáz} = \frac{4 \gamma \cos \alpha}{d}$$

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 83

A buborékpont meghatározás térfogatáram-görbéje



 BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék 84