

# LIOFILIZÁLÁS

Dr. Pécs Miklós



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,  
Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

## Liofilizálás

Más elnevezések: fagyasztva szárítás, jégsublimáció, liofilezés, liózás

Elve: víz elpárologtatása helyett a jég szublimálásával szárítani.

Története:

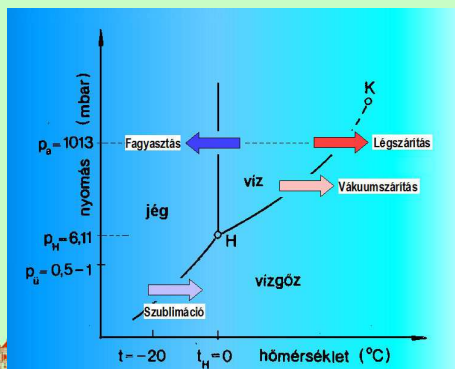
- 1890-től (Altman, szövetek kiszárítása)
- 1941- (II. világháború) nagy léptékben: szárított vérplazma előállítása



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

2

## Liofilizálás a fázisdiagramon



3

## A liofilizálás szakaszai

Műveleti lépések

1. Fagyasztás
2. Elsődleges szárítás (szublimáció)
3. Másodlagos szárítás (deszorpció)



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

4

## Fagyasztás

A fagyasztás sebessége meghatározza a jégkristályok méretét, és ezzel az anyag mikrostruktúráját.

Lassú fagyasztás esetén nagy jégkristályok keletkeznek, amelyek roncsolják az anyag (sejtek, sőt fehérjék) szerkezetét, másrészt szublimálásuk során tág kapillárisokat hagynak, ami gyorsítja a szárítást.

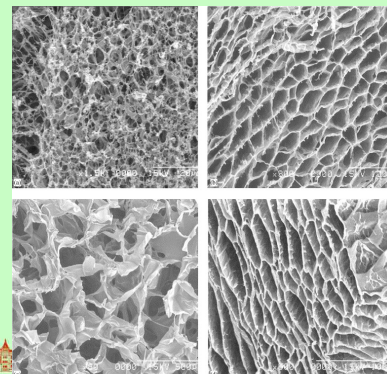
Gyors fagyasztás esetén mikrokristályok keletkeznek, amelyek konzerválják a harmadlagos szerkezet is, viszont lelassítják a gőz távozását. Az optimum a két véglet között van, közepes hűtési sebesség és optimalizált hűtési profil alkalmazásával.



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

5

## Liofilizált anyagok szerkezete



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

6

## Fagyasztás

Lehetséges út az „önfagyasztás” is:

- az anyagra nagy vákuumot adunk (5-25 Pa)
- ezen a nyomáson a víz felforr és párolog → a párolgás hőt von el → a visszamaradó anyag megfagy. (Összetett kristálytani szerkezet, eutektikum keletkezik.)
- a rendszert az eutektikus pont alá kell hűteni.



## Elsődleges szárítás (szublimáció)

- Hőmérséklet továbbra is az eutektikus olvadáspont alatt (-20-30 °C)
  - Nyomás a hármasponti nyomás (611 Pa) alatti, 50-100 Pa
- Az anyagban, illetve annak felületén két ellentétes irányú transzportfolyamat zajlik:
- Hőtranszport kívülről az anyag belsejébe
  - Anyagtranszport, a vízgőz távozik a vákuumba.

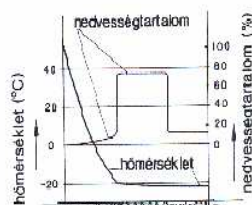
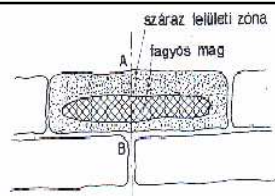
Ezek felületi jelenségek, ezért célszerű nagy felületet, vékony réteget kialakítani. Az anyag fokozatosan, kívülről befelé szárad, a belső fagyott magot egyre vastagodó már megszáradt réteg veszi körül, ami szigetelő réteggé alakul a transzport-folyamatokat.



## Transzportok a szárítás során

Mindkét folyamat két szakaszra osztható. A száraz, porózus anyagréteg jelenti nagyobb ellenállást, a külső felületen való átlépéshez képest.

A leírást nehezíti, hogy a fagyott zóna csökkenésével a száraz réteg időben vastagodik.



## Hőtranszport

Jelentős hőközlésre van szükség (a víz szublimációs hője: 2840 kJ/kg), a felületre juttatás mechanizmusa lehet:

- Hővezetés (fűtött polcok)
- Hősugárzás (fűtött felületek, fölülről ~10 mm távolságból)
- mikrohullámú fűtés

Az anyag belsejében a hő vezetéssel jut be a fagyott mag felületére.



## Páratranszport

A fagyott mag felületén a kapillárisokban a pára lassan távozik (a külső vákuumtérhez képest). Ennek a „párapaplannak” kettős hatása van:

- Lokálisan megnövekszik a hőmérséklet, és félő, hogy a jég megolvad → célszerű kis vízgőznyomást létrehozni
- A pára hővezetése viszi be a hőt a felületről a jégmaghoz → célszerű növelni a gőz tenzióját.

E két hatás közötti optimumot kell megtalálni és beállítani.



## Páratranszport

Ennek beállítására vezették be a Knudsen számot:

$$K_n = \frac{X_m}{l}$$

ahol:

- $X_m$  - a gőzmolekulák közepes szabad úthossza [m]
- $l$  - az anyagban levő pórusok, kapillárisok jellemző geometriai mérete [m]



## Páratranszport

- $Kn > 1$ : a gőzmolekulák főleg a pórusok falának ütköznek áramlás közben → molekuláris áramlás
- $Kn < 1$ : a gőzmolekulák mozgás közben főleg egymásnak ütköznek → normál áramlási formák:
- lamináris,
  - turbulens vagy
  - átmeneti áramlás, a Re-számtól függően



## Másodlagos szárítás (deszorpció)

A maradék víz már nem kristályos jég formájában van, hanem „kötött víz” (5-20 %), a kötés lehet:

- kémiai adszorpció
- fizikai adszorpció
- szerkezeti víz (kristályvíz)

Tehát nem szublimáció, nem párologtatás, hanem deszorpció.

Műveleti paraméterek:

Hőmérséklet: emelkedő profil 0 - 50 °C között

Nyomás: továbbra is vákuum



## Másodlagos szárítás (deszorpció)

A deszorpció lassú folyamat, nehezen méretezhető.

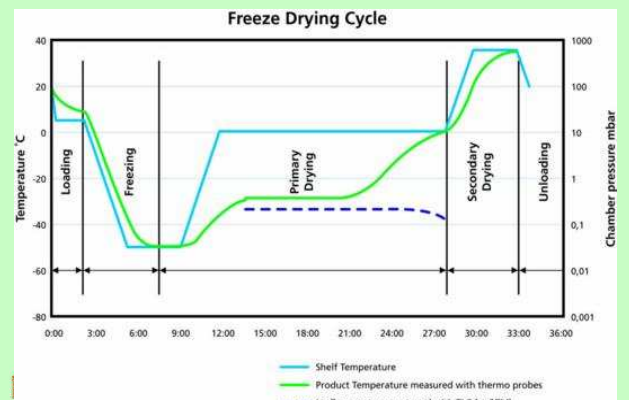
Szerencsére a fagyott mag szublimációjával párhuzamosan már elindul, a külső rész már kiszárad, mire a mag elfogy.

Az átáramló pára lassítja a deszorpciót, de amíg a vízgőz koncentrációja az egyensúlyi alatt van, addig a deszorpció irányába megy a folyamat.

A deszorpció hőigénye sokkal kisebb, mint a szublimációé, így ezzel a hőmennyiséggel nem kell külön foglalkozni.



## Hőmérsékletprofilok



## Hőközlés a fagyasztva szárítás alatt

### Problémák:

- Megfelelő intenzitás, az anyagunk mégse engedjen fel
- az anyag felületének hőmérséklete a kiszáradt réteg kialakulása után se emelkedjék +40 - +60 °C fölé
- Maradjon szabad párolgófelület a fagyasztva szárított anyagon a jég elszublimálásához
- Hő eljutásának biztosítása a felületen kialakuló rossz hővezetőképességű, porózus rétegen keresztül a szublimációs szinthez
- a porózus réteg vastagsága állandóan növekszik → a hővezetés az anyagon belül csökken



## Hőközlés a fagyasztva szárítás alatt

A jég szublimálásához közlendő hőmennyiség:

$$Q_1 = \Delta S \cdot r$$

ahol

$Q_1$  - az óránként közlendő hőmennyiség [kJ/h]

$\Delta S$  - óránként eltávozó vízmennyiség [kg/h]

$R$  - a jég szublimációs hője [2830 kJ/kg]



## Hőközlés a fagyasztva szárítás alatt

Fűtőlapokkal közölt hőmennyiség:

$$Q_2 = k \cdot A_h \cdot (t_h - t_f + t_f - t_{sz})$$

$Q_2$  - az óránként közlendő hőmennyiség [kJ/h],

$A_h$  - a hőközlő felület [m<sup>2</sup>],

$t_h$  - a hőközlő felület hőmérséklete [°C],

$t_f$  - a liofilizálendő anyag felületének hőmérséklete [°C],

$t_{sz}$  - a szublimációs szint hőmérséklete [°C].



## Hőközlés a fagyasztva szárítás alatt

Hőátbocsátási tényező számítása:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{\lambda}}$$

$k$  - a hőátbocsátási tényező [W/m<sup>2</sup>K],

$\alpha$  - a hőátadási tényező [W/m<sup>2</sup>K],

$\delta$  - a liofilezett réteg időben növekvő vastagsága [m],

$\lambda$  - a liofilezett réteg hővezetési tényezője [W/mK]



## Hőközlés a fagyasztva szárítás alatt

A liofilizálás alatt a közlő hőmennyiségének meg kell egyeznie a jég szublimálásához szükséges hőmennyiséggel, miközben a liofilizálendő anyag felületének hőmérséklete nem haladhatja meg a 60°C-ot, vagyis:

$$Q_1 = Q_2 \quad \text{és} \quad t_f \leq +60 \text{ °C}$$

Szublimáló gőzáram:

$$m_{D,A} = \frac{q}{\Delta H_{s,f}}$$

$q$ : - a megengedett fűtőfelület-terhelés [kJ/h],

$\Delta H_{s,f}$  - a szublimációs entalpia [kJ/kg].



## A fagyasztva szárítás időtartama

A  $\delta$  réteg-vastagságú nyugvó nedves anyag szárításához szükséges  $t_q$  időtartam becslése:

$$t_q = \rho_E \cdot X_G \cdot (1 - \epsilon) \cdot \Delta H_{s,f} \cdot \left[ \frac{1}{k} + \frac{\delta}{2\lambda} + \frac{\delta}{2\Delta H_{s,f} \cdot D_e} \cdot \left( \frac{dT}{dp} \right) \right] \cdot \delta$$

$\rho_E$  - a jég anyagsűrűsége [kg/m<sup>3</sup>],

$X_G$  - az anyag kezdeti nedvességtartalma [kg/kg],

$\epsilon$  - az anyag porózussága [-],

$k$  - a hőátbocsátási tényező [W/m<sup>2</sup>K],

$\delta$  - az anyag rétegvastagsága [m],

$\lambda$  - az anyag hővezetési tényezője [W/mK],

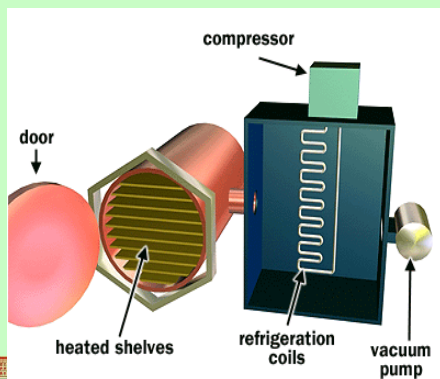
$D_e$  - az effektív diffúziós együttható [m<sup>2</sup>/s],

$dT/dp$  - a szublimációs nyomásgörbe iránytangense  $t_s$ -nél



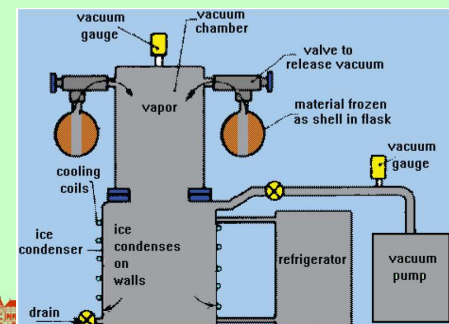
## A liofilezés berendezései

Elvi felépítés:



## A liofilezés berendezései

Laboratóriumi készülék:



## A liofilezés berendezései

Ipari  
készülék:



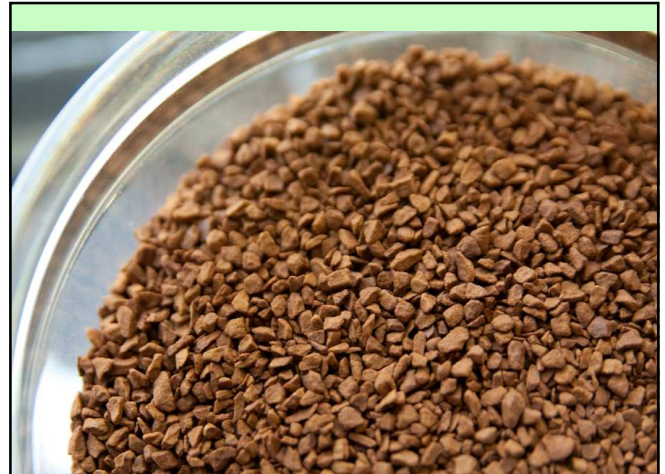
## Alkalmazások, termékek

- Gyógyszeripar, biotechnológia  
fehérje termékek: vakcinák, enzimek, monoklonális antitestek, vérfehérjék
- Élelmiszeripar
  - intenzív aromájú gyümölcsök tartósítása pl.: banán, szamóca, stb.
  - gombafélék, húsok, halak szárítása
  - instant kakaó, kávé



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

26



## Alkalmazások, termékek



29

## Alkalmazások, termékek



30

## Fehérjék fagyasztva szárítása

A liofilezés körülményei alapján véve kedvezőek a fehérjék stabilitása szempontjából, mégis lehetnek károsító tényezők:

- nagy, vagy szerteágazó jégkristályok képződése
- ionerősség növekedése (mert betöményedik a puffer)
- pH-változás (-"-)
- fázisszétválás
- hidrátburok eltávolítása



## Fehérjék fagyasztva szárítása

Stabilizálás krio- és/vagy lioprotektánsokkal

Hagyományosan használt vegyületek:

- cukrok és polialkoholok
- vízmentes oldószerek (csak krioprotektáns funkció)
- (hidrofil) polimerek
- fehérjék maguk (mint hidrofil polimerek)
- felületaktív anyagok
- aminosavak



## Fehérjék fagyasztva szárítása

A védelem kialakításának két fő mechanizmusa:

- Amorf üvegállapot létrehozásán alapuló mechanizmusok
- 'Víz-helyettesítési' reakciók



## Fehérjék fagyasztva szárítása

Amorf üvegállapot létrehozásán alapuló mechanizmusok:

- Rendkívül viszkózus oldat létrejötte → lelassítja a fehérje különböző konformációinak egymásba alakulását
- Stabilabb szerkezet

'Víz-helyettesítési' reakciók:

- A fehérje és a segédanyag(ok) közt kialakuló hidrogénkötések → natív szerkezet megtartása, láncon belüli H-kötések kialakulásának gátlása

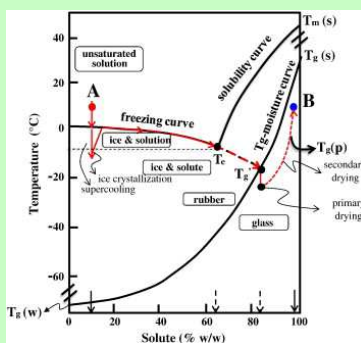


## Fehérjék fagyasztva szárítása

Az egyre töményedő fehérje oldatokból szokatlan tulajdonságú fázisok alakulhatnak ki:

- gumyszerű és
- üvegszerű állapotok.

Ezekre igen nagy viszkozitás jellemző, az üvegszerű állapotban a szublimáció gyakorlatilag leáll, csak az utószárítással vízteleníthető tovább.



## A liofilizálás előnyei

- Hosszabb eltarthatóság, tárolhatóság
- Enyhébb tárolási körülmények (nem szükséges hűtés)
- Gyors és könnyű rehidratálás
- Kisebb tömeg - könnyebb szállítás
- Ételek élvezeti értékének megmaradása



## A liofilizálás hátrányai

- nagyon drága
- sok energiát igényel
- íz és állagváltozás lehetséges
- a víz eltávolítása nem 100%-os, csak 90-95%

