

## 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, liofilizálás, liózás

Elve: víz elpárolgatása helyett a jég szublimálásával szárítani.

Története:

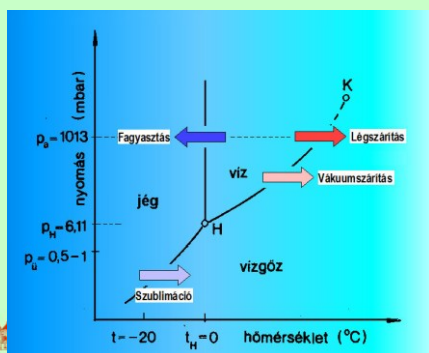
- 1890-től (Altman, szövetek kiszárítása)
- 1941- (II. világháború) nagy léptékben: szárított vérplazma előállítása



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.

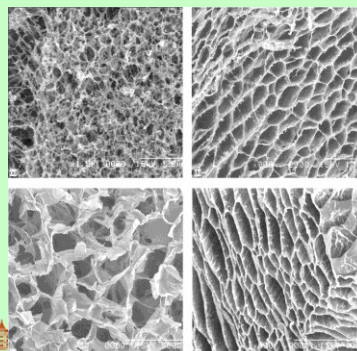
Gyors fagyasztás esetén mikrokristályok keletkeznek, amelyek konzerválják a harmadlagos szerkezet is, viszont lelassítják a gőz távozását. Az optimum a két véglet között van, közepes hűtési sebesség és optimalizált hűtési profil alkalmazásával.



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.

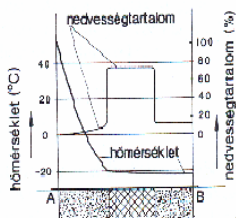
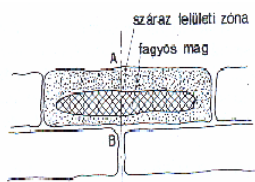
Ezek felületi jelenségek, ezért célszerű nagy felületet, vékony réteget kialakítani. Az anyag fokozatosan, kívülről befelé szárad, a belső fagyott magot egyre vastagodó már megszáradt réteg veszi körül, ami szigetelő réteggé válik a transzport-folyamatokat.



## 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 vákuumterhez 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 vezettek 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.

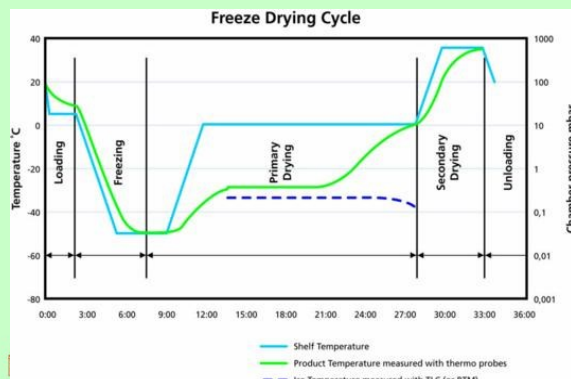
Szerencsére a fagyott mag szublimációjával párhuzamosan már elindul, a külső rész már kiszárad, mire a mag elfogy.

Az átáramló pára lassítja a deszorpciót, de amíg a vízgőz koncentrációja a 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 párologófelület 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

Fűtőlappokkal 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 liofilizálandó anyag felületének hőmérséklete [°C],  
 $t_{sz}$  - a szublimációs szint hőmérséklete [°C].



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

19

## 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]



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

20

## Hőközlés a fagyasztva szárítás alatt

A liofilizálás alatt a közlő hőmennyiségének meg kell egyeznie a jég szublimálásához szükséges hőmennyiséggel, miközben a liofilizálandó 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 gőzarány:

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

- $q$ : - a megengedett fűtőfelület-terhelés [kJ/h],  
 $\Delta H_{s,f}$  - a szublimációs entalpia [kJ/kg].



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

21

## A fagyasztva szárítás időtartama

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

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

- $\rho_E$  - a jég anyagsűrűsége [kg/m<sup>3</sup>],  
 $X_G$  - az anyag kezdeti nedvességtartalma [kg/kg],  
 $\varepsilon$  - 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

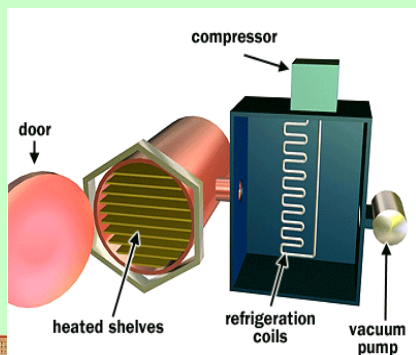


BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

22

## A liofilezés berendezései

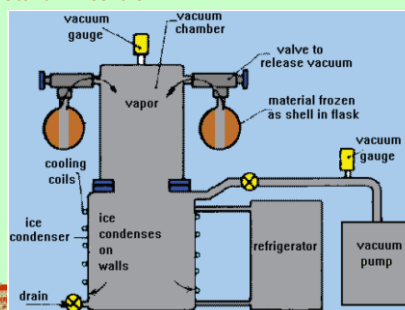
Elvi felépítés:



© 2002 HowStuffWorks

## A liofilezés berendezései

Laboratóriumi készülék:



24

## 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:

- hőmérséklet csökkenése
- nagy, vagy szerteágazó jégkristályok képződése
- ionerősség növekedése (mert betöményedik a puffer)
- pH-változás (-)
- jég-víz fázisfelület
- fázisszétválás (kül. polimerek)
- hidrátburok eltávolítása



## Fehérjék fagyasztva szárítása

Stabilizálás krio- és/vagy lio protektánsokkal

Hagyományosan használt vegyületek:

- cukrok és polialkoholok
- vízmentes oldószer (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, láncban belüli H-kötések kialakulásának gátlása

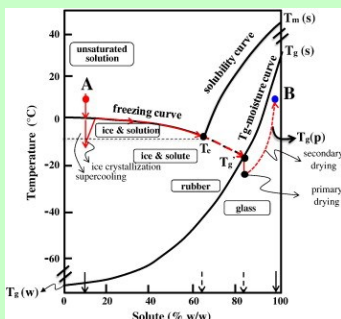


## Fehérjék fagyasztva szárítása

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 liofilezés 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%

