

## 4.5. fejezet KRISTÁLYOSÍTÁS

Dr. Pécs Miklós  
Dr. Fehér Csaba



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,  
Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

## TISZTÍTÁS ↔ VÉGTISZTÍTÁS

Nincs éles elhatárolás, de a szemlélet különböző:

**Tisztítás:** mérnöki szemlélet, a szennyezések elválasztását úgy oldjuk meg, hogy a céltermékből minél kevesebbet veszítsünk el.

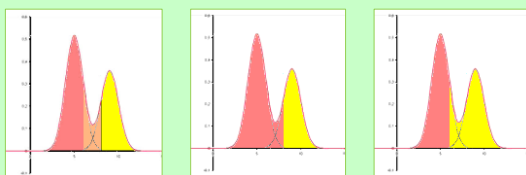
**Végtisztítás:** piaci szemlélet, a termék tisztaságát valamelyik piaci követelményhez állítjuk be, még azon az áron is, hogy a céltermék egy részét elveszítjük.



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

2

## TISZTÍTÁS ↔ VÉGTISZTÍTÁS



Feladat: két átfedő  
kromatográfiai  
csúcs  
frakcióinak  
kiválasztása

Tisztításnál: nincs  
anyagvesztés,  
de sok a szennye-  
zés.

Végtisztításnál:  
nagy tisztaság, de  
sok a veszteség



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

3

## Kristályosítás

Hasonlít a csapadékképzéshez, mert itt is túltelített oldatból válik ki az anyag. De: itt az anyag rendezett szerkezetű, nem amorf.

A kristályosítás nagyipar, évente sok százezer tonna terméket kristályosítanak. Előnyei: a termék

- nagymértékben tisztított
- jól kezelhető: egyenes szemcseméret, könnyebb a szűrés, szárítás, anyagmozgatás
- esztétikusabb

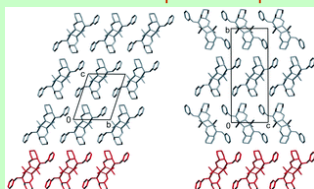


BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

4

## Kristályosítás

A hasonlóság ellenére a kicsapást a koncentráció műveletek közé soroljuk, a kristályosítást pedig a végtisztításhoz. Oka: a kristályosítás során nem csak a víztől szabadulunk meg, hanem nagymértékben tisztul is az anyag. A kristályrácsba csak egyforma molekulák képesek beépülni. Az egykristály nagyon tiszta, a szennyezések csak a felületen, illetve a zárványokban lehetnek.



Többféle kristályforma



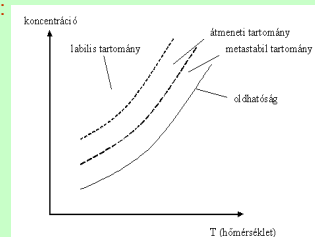
BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

5

## Kristályosítás

A túltelítést általában bepárlás + hűtéssel hozzák létre. A túltelítés mértéke szerint a rendszer viselkedése (göcképzés) többféle lehet:

- metastabil
- átmeneti
- labilis



BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudomány Tanszék

6

## Nehézségek

Nehéz reprodukálni/léptéknövelni, mert

- Kétfázisú a rendszer (szilárd-folyadék, határfelület)
- Anyag és hőátadás egyszerre megy végbe
- Termodinamikailag labilis rendszert kell reprodukálni
- A mikrokörnyezetet kell reprodukálni, nem a reaktor egészét
- A szennyezéseknek fontos szerepe van



## A kristályosítás lépései

Szakaszok:

1. Túltelítés létrehozása (koncentráció+hűtés)
2. Gócképződés
3. Gócnövekedés (diffúzió által limitált)
4. Gócnövekedés (áramlás által limitált)
5. Elválasztás
6. Mosás
7. Szárítás



## Gócképződés

Homogén gócképződés: az oldott molekulák a hőmozgás hatására „éppen jól” találkoznak (kicsi az esélye)

A „legkisebb kristály” az elemi cella, legalább annyi molekula kell a góchoz, ahány az elemi cellát alkotja.

Heterogén gócképződés: idegen anyagok felületén (szennyezések, készülék) indul meg a kristályosodás.

Másodlagos gócképződés: a már meglévő kristályok ütközése, dörzsölődése során apró szilánkok válnak le, amelyek gócként viselkednek.

Nehezen reprodukálható – a megoldás: oltókristályok alkalmazása



## Gócképződés

Gócképződés sebessége:

$$\frac{dN}{dt} = k \cdot (c - c^*)^i$$

Ahol:  $i$  – empirikus paraméter (keverés, molekulaszám)

Hőfokfüggés: Arrhenius egyenlet szerint



## Gócnövekedés

Diffúziós gócnövekedés: Fick törvénnyel írható le.

$$\frac{dM}{dt} = k \cdot A \cdot (c - c^*)$$

ahol:  $k$  – tömegátviteli együttható ( $D, \rho, \eta$ )

$M$  – a kristály tömege

$A$  – a kristály felülete



## Gócképződés - gócnövekedés

Ha a szokásos labor technikával a telített oldatot szoba-hőmérsékleten hosszabb ideig állni hagyjuk, akkor:

- lassan, minimális túltelítés alakul ki,  $(c - c^*)$  kicsi
- nagyon kevés góc alakul ki, kevés kristály lesz
- nincs keverés = diffúziós gócnövekedés, lassú, de van idejük nagyra nőni



Ez szép, de nem ipari módszer.





### Gócnövekedés

Konvekciós gócnövekedés: analóg a csapadékképzéssel, de a k paramétert kétfelé bontjuk

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{\frac{1}{k} + \frac{1}{\kappa}} \cdot A \cdot (c - c^*)$$

Ahol:  $k$  – az áramlásra jellemző állandó, a keveréstől és az oldat tulajdonságaitól függ  
 $\kappa$  – a felületi reakciósebességi állandó, csak a hőmérséklettől függ  
 Ellenállás jellegű mennyiségek, reciprok összegzés

### A kristály jellemző mérete

A fenti egyenletben problémát okoz, hogy a kristály felülete is folyamatosan változik. Ezért bevezetjük a kristály „jellemző hosszát”

$$l = \frac{l^3}{l^2} = \frac{V}{A/6} = \frac{6 \cdot M}{\rho \cdot A}$$

Ez kockarácsokra pontosan igaz, más kristályformákra bevezették az alaktényezőket:

$\Phi_v$  – térfogati alaktényező

$\Phi_a$  – felületi alaktényező

Értékük kockarács esetén = 1

$$M = \rho \cdot l^3 \cdot \Phi_v$$

$$A = 6 \cdot l^2 \cdot \Phi_a$$

### A kristály jellemző mérete

Visszahelyettesítve a növekedési egyenletbe:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{d(\rho \cdot l^3 \cdot \Phi_v)}{dt} = 6 \cdot \Phi_a \cdot l^2 \cdot \frac{1}{\frac{1}{k} + \frac{1}{\kappa}} \cdot (c - c^*)$$

Egyszerűsítve a következő alakot kapjuk:

$$\frac{dl}{dt} = \left( \frac{6 \cdot \Phi_a}{\Phi_v \cdot \rho} \right) \cdot \frac{l}{\frac{1}{k} + \frac{1}{\kappa}} \cdot (c - c^*) = k_g \cdot (c - c^*) = G$$

Azaz a lineáris növekedési sebesség nem függ a kristály méretétől.

### A kristály jellemző mérete

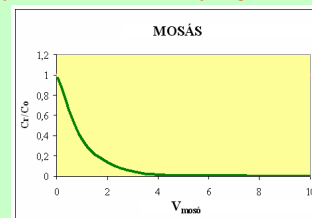


Ha a növekedési sebesség nem függ a kristály méretétől, akkor a kis kristályok „beérik” a nagyokat → egységesednek

méret			tömeg			méretarány			tömegarány		
1	2	10	1	8	1 000	2	10	8	1 000		
2	3	11	8	27	1 331	1,50	5,50	3,38	166,38		
5	6	14	125	216	2 744	1,20	2,80	1,73	21,95		
10	11	19	1 000	1 331	6 859	1,10	1,90	1,33	6,86		
15	16	24	3 375	4 096	13 824	1,07	1,60	1,21	4,10		
20	21	29	8 000	9 261	24 389	1,05	1,45	1,16	3,05		

### További lépések

5. Elválasztás (szilárd-folyadék)
6. Mosás – a kristály felületén maradó anyalúg eltávolítása



7. Szárítás

### Kristályosítás ipari léptékben

Ipari léptékben sok, lehetőleg egyforma kristályra van szükségünk, gyorsan és olcsón. Ehhez:

$$\frac{dl}{dt} = k_g \cdot (c - c^*) = G$$

- sok góc legyen = oltókristály alkalmazása
- nagy (és állandó) hajtóerő/túltelítés
- a  $k_g$  érték is legyen nagy



### Kristályosítás ipari léptékben

#### Szakaszos kristályosítás

A növekedés sebessége a túltelítés mértékétől függ,

$$\frac{dl}{dt} = k_g \cdot (c - c^*) = G$$

- ez pedig változik a folyamat során, mert fogy az oldatban lévő anyag
- változhat a hőmérséklet ( $c^*$ )

A cél az állandó növekedési sebesség → olyan mértékben kell hűteni, hogy az kompenzálja a kiválás miatti koncentráció csökkenést.

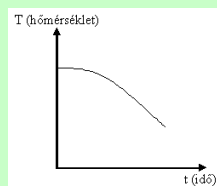


### Kristályosítás ipari léptékben

Ehhez ismerni kell a telítés – hőmérséklet görbét, és annak meredekségét ( $dc^*/dT$ ).

A hőfokprofil hosszú levezetés után:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{3 \cdot G \cdot M_0}{\left(\frac{dc^*}{dT}\right) \cdot V \cdot I_0^3} \cdot (I_0 + G \cdot t)^2$$



Általában az elején lapos, aztán meredekebben csökken



### Kristályosítás ipari léptékben

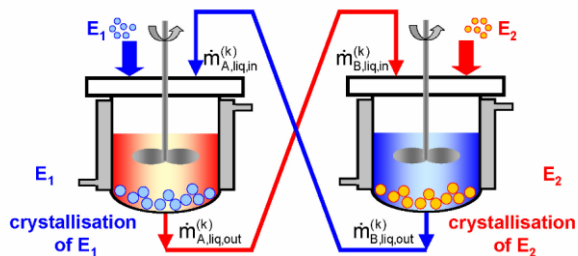
A keverés hatása:

1. Túltelítés (=hűtés) kell keverés a hőtáadásához
  2. Gócképződés nincs (kis) hatása
  3. Diffúziós gócnövekedés nincs hatása, de a hűtéshez kell
  4. Áramlási gócnövekedés mérsékelt keverés
- végig állandó mérsékelt keverést alkalmaznak.  
(Méretnövelésnél: P/V, fordulatszám, kerületi sebesség, min. ülepedésgátló keverés. Technológiától függ.)



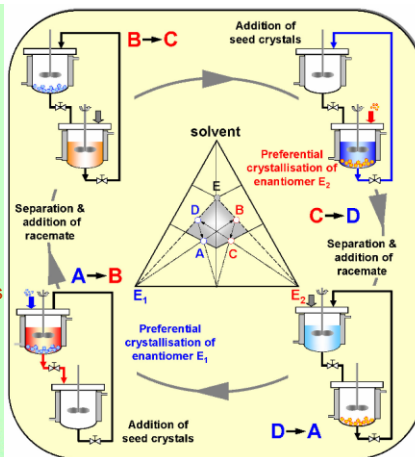
### Enantiomerek frakcionált kristályosítása

Oltókristályal csak az egyik enantiomert kristályosítják



### Enantiomerek frakcionált kristályosítása

Körfolyamatban kvázi-folyamatossá tehető a resolválás

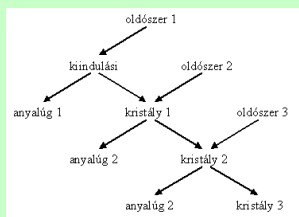


### Egyszerű ismételt átkristályosítás

A tisztítási faktor:  $E_A = \frac{\text{Anyag}_a \text{ kristályban}}{\text{Anyag}_a \text{ anyalúgban}}$

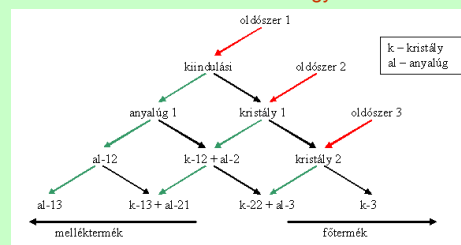
A kihozatal az ismétléssel romlik:

$$y = \left( \frac{E_A}{1 + E_A} \right)^n$$



### Frakcionált átkristályosítás

Az anyalúgokat is feldolgozzuk. Akkor van értelme, ha két értékes terméket választunk el egymástól.

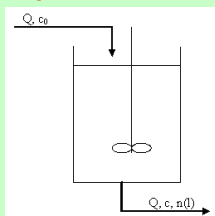


### Folytonos kristályosítás

Állandó betáplálással és hőmérsékleten állandósult állapot alakul ki. Nem szükséges oltókristály, a kristályok méretét a tartózkodási idő szabja meg.

$$l_D = \frac{3 \cdot G \cdot V}{Q}$$

Nehéz szabályozni, csak nagy (tonnás) léptékben alkalmazzák



### Fehérjék kristályosítása

Ritkán ipari, inkább egy nagy kristály a cél (Röntgen-diffrakció)

A túltelítést nagyon lassan kell létrehozni (hetek) = kevés góc, hosszú növekedési idő

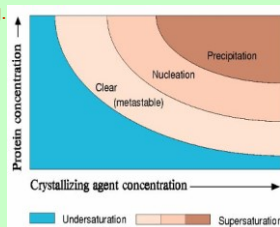
A túltelítést a csapadékképzésnél bevált agyagokkal hozzák létre

Pepecselős babramunka, inkább empiria, mint egzakt tudomány

### Fehérjék kristályosítása - batch

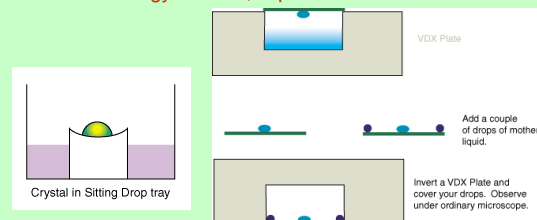
Egy edényben egyszerre beadagolják az optimált mennyiségű kicsapószeret és állni hagyják. A metastabil tartományban (lassú göcképződés) a kicsapódás helyett lassú kristályosodás indulhat meg.

Nagyobb mennyiségeknél alkalmazzák, sok, változó méretű kristályt ad.



### Diffúziós technikák

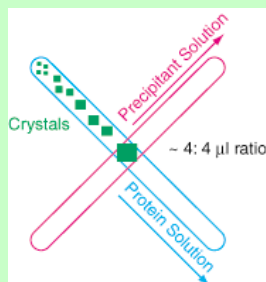
**Gőzdiffúzió:** két folyadék(csepp) zárt térben a gőztéren keresztül érintkeznek (pl. aceton és puffer). Összetételük fokozatosan kiegyenlítődik, a polaritás lassan változik.



### Diffúziós technikák

#### Folyadékdifúziós technikák

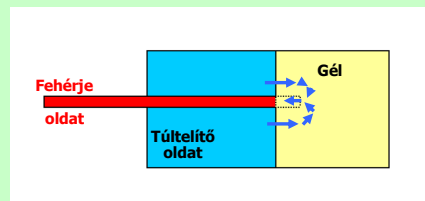
- Dializáló membránon át
- Folyadékcseppben: Mikroszkóp alatt, zárt térben a fehérje és a kicsapó oldat egy-egy cseppjével kereszt alakot alakítanak ki. A találkozási pontnál (szembdifúzió) alakulnak ki a nagy kristályok.



### Diffúziós technikák

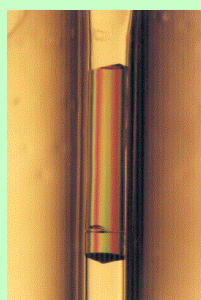
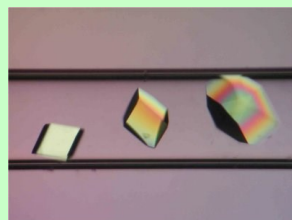
#### Folyadékdifúziós technikák kapillárisban

A géldifúzió igen lassúvá teszi a koncentráció-változásokat



### Folyadékdifúzió kapillárisban

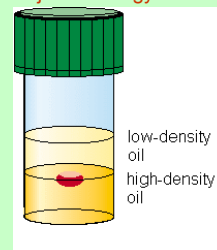
Lizozim kristályok



### Mikrogravitációs kristálynövesztés

A gravitáció a konvekciós áramlásokkal zavarja a kristályok növekedését. A kristályosítás sokkal jobban megy csökkent gravitáció mellett.

- Űrprogramok
- „Lebegtetett” cseppekkel két olajréteg között



### Inzulin kristályosítása

Az inzulin önmagában, illetve Zn ionokkal sokféle kristályformát alkothat. Befolyásolja a pH, az inzulin- és a Zn-koncentráció. 55 °C-ról hűtés-sel.

