

# Termodinamikai alapok

Vegyipari műveletek 3 kurzushoz

Összeállította:  
Dr. Szepesi L. Gábor  
egyetemi docens

### Termodinamikai rendszer fogalma

A termodinamikában a világ egy képzelt vagy valós határfelülettel elkülönített részének a tulajdonságait vizsgáljuk. A világnak ezt a részét rendszernek vagy más néven termodinamikai rendszernek nevezzük. Ebben az értelemben a rendszer lehet egy lombik, maga a laboratórium vagy akár a Föld légköre. A világnak a rendszeren kívüli részét környezetnek nevezzük.

**Elszigetelt rendszer** esetében sem anyag, sem energia nem léphet át a rendszer határfelületén. Ez azt jelenti, hogy egy elszigetelt rendszerből nem vonhatunk ki anyagot, és nem is adhatunk hozzá, de nem vonhatunk ki energiát a rendszerből, és nem közölhetünk vele, tehát pl. nem melegíthetjük, vagy nem változtathatjuk a térfogatát. Elszigetelt rendszerre egy példa a környezetétől hőszigetelő falakkal elválasztott, állandó térfogatú zárt edény.

**Zárt rendszer** határfelületén energia átléphet, de anyag nem. A zárt rendszereket tovább csoportosítjuk aszerint, hogy a rendszer térfogata állandó vagy változó, és megkülönböztetünk állandó térfogatú és változó térfogatú zárt rendszereket. Előbbire példa egy lezárt lombik, amelyből nem távozhat anyag, és a térfogata is állandó, de energiát cserélhet a környezetével, pl. melegíthetjük.

Legáltalánosabb esetben mind anyag-, mind energiatranszport lehetséges a rendszer határfelületén. Az ilyen rendszereket **nyílt rendszereknek** nevezzük. Nyílt rendszerre példa egy nyitott főzőpohár, amiben változtathatjuk az anyag mennyiségét, és energiát is közölhetünk vagy vonhatunk el belőle pl. melegítéssel vagy hűtéssel.

### Termodinamikai rendszer fogalma

**Homogén rendszer** makroszkopikus tulajdonságai minden pontban azonosak. Ilyen pl. egy jól elkevert konyhasóoldat. Ennek minden pontjában azonos a hőmérséklet, a koncentráció és az összes többi fizikai mennyiség.

**Inhomogén rendszerben** egyes makroszkopikus tulajdonságok helyről helyre változnak, de eloszlásukat folytonos függvény írja le. Például, ha egy rézrudat az egyik végén melegítünk, a hőmérséklet változik a rúd hossza mentén, de a változás folytonos, a hőmérséklet egyik pontban sem változik ugrásszerűen.

**Heterogén rendszerben** egy vagy több makroszkopikus tulajdonság ugrásszerűen változik a tér bizonyos pontjaiban. Ilyen pl. egy olvadó víz-jég rendszer, ahol általában a hőmérséklet állandó a rendszer minden pontjában, de a legtöbb fizikai mennyiség, pl. hőkapacitás, törésmutató, sűrűség ugrásszerűen változik a jég-víz határfelületen.

Egy heterogén rendszerben a rendszer homogén kémiai összetételű és homogén vagy inhomogén fizikai szerkezetű részét **fázisnak** nevezzük.

A rendszernek a kémiai tulajdonság alapján megkülönböztethető részét **komponensnek** nevezzük.

### Termodinamikai rendszer fogalma

A termodinamikai rendszer állapotának a mérhető fizikai tulajdonságok összességét nevezzük. A rendszer állapotától függő makroszkopikus jellemzők az állapotjelzők (állapothatározók). A legfontosabb állapotjelzők az anyagmennyiség, a térfogat, a nyomás, a hőmérséklet és a koncentráció

Elnevezés	Jelölés	Mértékegység
anyagmennyiség	n	mol
térfogat	V	m <sup>3</sup>
nyomás	p	Pa
hőmérséklet	T	K
koncentráció	c	mol m <sup>-3</sup>

A termodinamikában központi szerepet játszik az **egyensúly** fogalma. **Egy rendszer termodinamikai egyensúlyban van, ha az állapothatározók egyike sem változik.** Másképp megfogalmazva: az egyensúlyban nem játszódnak le makroszkopikus folyamatok. Fontos azonban megjegyezni, hogy ez a definíció nem zárja ki a mikroszkopikus folyamatokat, ilyenek lejátszódnak egyensúlyban is, azt mondjuk, hogy az egyensúly dinamikus. Azonban a mikroszkopikus folyamatok nem változtathatják meg az állapothatározók értékét. Pl. egy olvadó jég-víz rendszerben a jég és a víz anyagmennyisége állandó, ha a rendszer egyensúlyban van. A gyakorlatban azonban adott idő alatt valamennyi vízmolekula a szilárd fázisból átkerül a folyadékfázisba, de ugyanannyi molekula folyadékfázisból átvándorol a szilárd fázisba. Az olyan rendszereket, amelyek állapothatározói változnak, **nemegyensúlyi** rendszereknek nevezzük.

**Reverzibilisnek** nevezünk egy **változást**, ha a rendszer minden pillanatban egyensúlyban van, és a rendszer a végállapotból ugyanazon közbülső egyensúlyi állapotokon keresztül képes visszajutni a kezdeti állapotba. Ez azt jelenti, hogy a rendszer állapotjelzői minden pillanatban csak infinitezimálisan (végtelenül) kis mértékben változnak, a folyamat a változók infinitezimális módosításával megfordítható. Az olyan folyamatot, amelyik nem elégíti ki a fenti feltételeket, irreverzibilisnek nevezzük.

Gyakorlati szempontból különösen érdekesek azok a folyamatok, amikor a rendszer valamelyik állapotjelzője nem változik. Ezek jelentősége abban áll, hogy a természetben, a laboratóriumban vagy egy technológiai eljárás során gyakran előfordul, hogy valamilyen fizikai mennyiség értéke nem változik. Ilyen lehet:

- Izoterm
- Izobár
- Izochor
- Adiabtikus

A rendszer fizikai állapotának, illetve a rendszerben lejátszódó folyamatoknak a jellemzésére az állapotváltozók mellett további fizikai mennyiségeket szoktak bevezetni. Az **állapotfüggvény** az állapotváltozók olyan többváltozós függvénye, amelynek változása **csak a rendszer kezdeti és végállapotától függ**, és független az úttól, amelyen a rendszer a kezdeti állapotból a végállapotba jutott.

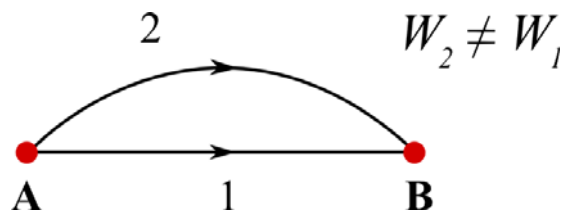
- Gondoljunk a potenciális energiára. (mozgó test pot. energiája független, hogy milyen úton jutott oda -

### A legfontosabb állapotfüggvények:

- Belső energia (U)
- Entalpia (H)
- Entrópia (S)
- Szabadenergia (A)
- Szabadentalpia (G)

Az állapotfüggvény megváltozása az állapotfüggvény vég- és kezdeti állapothoz tartozó értékének különbsége, jelölésére a  $\Delta$  görög betűt használjuk, Infinitesimalisan kis változásokat a  $d$  szimbólummal jelölünk.

Az állapotfüggvényekkel szemben az **útfüggvények** értéke függ a kezdeti és a végállapot között megtett úttól. Útfüggvény pl. a **munka** ( $W$ ) és a **hő** ( $Q$ ). Tekintsünk például egy vízszintes súrlódó felületen mozgó testet. Nyilvánvaló, hogy ha a testet az egyik úton juttatjuk el A pontból B-be, akkor kevesebb munkát kell végeznünk, mint ha a másik utat választanánk.



### A legfontosabb állapotfüggvények: folyt...

Nem helyes tehát a „munkaváltozás” vagy a „hőváltozás” szóhasználat, hanem az adott folyamatban végzett munkáról, a rendszerrel közölt vagy a rendszer által leadott, ill. a rendszer és a környezet között kicserélt hőről szoktunk beszélni, és ennek megfelelően nem írunk „ $\Delta W$ ”-t vagy a „ $\Delta Q$ ”-t sem. Az útfüggvények infinitezimális értéke nem teljes differenciál, azaz nem létezik olyan függvény, amely teljes differenciáljának képzésével megkapnánk egy útfüggvény infinitezimális értékét. Ez utóbbit ezért a  $\delta$  szimbólummal jelöljük, pl. az infinitezimális munkára vagy a hőre a  $\delta W$ , ill. a  $\delta Q$  jelölések használatosak. Az útfüggvények értékének kiszámítása az infinitezimálisan kis értékek integrálásával történik, amelyhez ismerni kell a folyamathoz tartozó utat.

### Extenzív, intenzív...

Az extenzív mennyiségek függenek a rendszer kiterjedésétől, azaz a rendszer méretével arányosan nőnek. Ilyen például a tömeg, a térfogat és a fent említett állapotfüggvények mindegyike. Nyilvánvaló, hogy az extenzív mennyiségek additívak, ami azt jelenti, hogyha a rendszert különálló részekre osztjuk, a rendszerre jellemző extenzív mennyiségek az alrendszerekre vonatkozó extenzív mennyiségek összegeként adódnak. Az intenzív mennyiségek függetlenek a rendszer kiterjedésétől és nem additívak. Intenzív mennyiség például a hőmérséklet, a nyomás és a koncentráció. Extenzív mennyiségeket könnyen intenzívekké alakíthatjuk, ha egységnyi tömegre, térfogatra, anyagmennyiségre stb. vonatkoztatjuk.

### Termodinamika I. főtétele

A termodinamika I. főtétele az energiamegmaradás törvényének alkalmazása termodinamikai rendszerekre. Az energiamegmaradás törvénye szerint az energia átalakítható egyik formából a másikba, de nem lehet létrehozni vagy megsemmisíteni. Ez alapján a termodinamika I. főtétele azt mondja ki, hogy zárt rendszer belső energiája csak munkavégzés vagy hőcsere útján változtatható meg. Matematikai formában:

$$\Delta U = W + Q \quad dU = \delta W + \delta Q$$

### Termodinamiki egyensúlyok

A természetben végbemenő folyamatok kizárólagos termodinamikai hajtóereje az entrópia növekedése. Minden makroszkopikusan észlelhető folyamatban a rendszer és a környezet együttes entrópiája nő. Az alábbiakban a már ismert termodinamikai állapotfüggvények felhasználásával két további állapotfüggvényt definiálunk, amelyek alkalmasak lesznek zárt, de nem elszigetelt rendszerek esetében a folyamatok irányának és az egyensúly helyzetének megállapítására. Állandó hőmérsékleten és térfogaton végbemenő folyamatokat a szabadenergia (A) jellemzi. Állandó hőmérsékleten és nyomáson lejátszódó folyamatok leírására a szabadentalpia (G) alkalmas. (T, V, illetve p állandóságát tágan értelmezzük: mivel állapotfüggvényekről van szó, csak az a fontos, hogy a folyamat elején és végén ugyanakkorák legyenek, a folyamat során változhatnak.)



### A szabadenergia

A termodinamika II. főtétele szerint a rendszerben csak olyan folyamat játszódhat le, amely a rendszer és a környezet együttes entrópiáját növeli. Egyensúlyban az összentrópiának maximuma van.

$$\Delta S_r + \Delta S_k \geq 0$$

A környezet entrópiaváltozása kifejezhető az átadott hő és a hőmérséklet hányadosaként.

$$\Delta S_k = \frac{-Q_{rev}}{T}$$

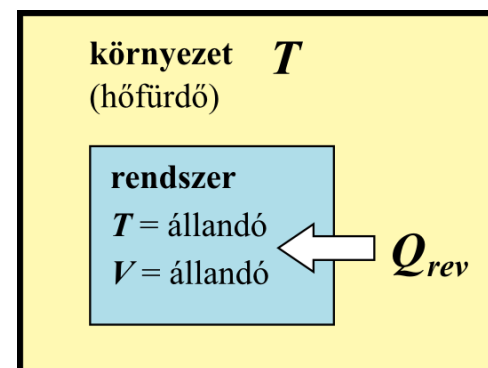
$$\Delta S_r - \frac{Q_{rev}}{T} \geq 0$$

Ha az egyenlőtlenség mindkét oldalát  $(-T)$ -vel megszorozzuk, akkor az értelme megváltozik:

$$Q_{rev} - T\Delta S_r \leq 0$$

Mivel a térfogat állandó,  $Q_{rev} = \Delta U_r$ . Most már elhagyjuk az „r” indexet, mert minden paraméter a rendszerre vonatkozik:

$$\Delta U - T \cdot \Delta S \leq 0$$



Definiálhatunk tehát egy olyan függvényt, amely állandó hőmérsékletű és térfogatú zárt rendszerben csak csökkenhet, és egyensúlyban éri el a minimumát. Ez a **szabadenergia**:

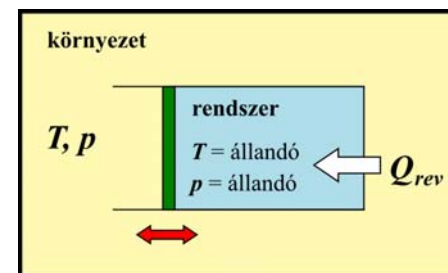
$$A = U - T \cdot S$$

**Állandó hőmérsékletű és térfogatú zárt rendszerben, ha egyéb munka sincs, a szabadenergia spontán folyamatban csökken, egyensúlyban minimuma van.**

### Szabadentalpia

A szabadentalpia definíciójához hasonló gondolatmenettel juthatunk el, mint a szabadenergia esetében.

$$\Delta S_r + \Delta S_k \geq 0 \quad \Delta S_k = \frac{-Q_{rev}}{T} \quad \Delta S_r - \frac{Q_{rev}}{T} \geq 0 \quad Q_{rev} - T\Delta S_r \leq 0$$



Eddig ugyanazokat a lépéseket végeztük el, mint a szabadenergia esetében. Most figyelembe vesszük, hogy a nyomás állandó. Így a leadott vagy felvett hő egyenlő a rendszer entalpia-változásával:

$$\Delta H - T \cdot \Delta S \leq 0$$

Ennek alapján definiálunk egy olyan függvényt, amely állandó hőmérsékletű és nyomású zárt rendszerben csak csökkenhet, és egyensúlyban éri el a minimumát. Ez a szabadentalpia:

$$G = H - T \cdot S$$

### A szabadentalpia

Ez az entalpiának az a részmennyisége, amely reverzibilis állapotváltozás esetén szabaddá válik, más szóval bármely más energiaformává átalakítható.

A szabadentalpia ( $dG$ ) változására anyagilag zárt rendszer esetében:

$$G = H - TS \qquad G = U + pV - TS$$

Reverzibilis állapotváltozásra, valamint a termodinamika első főtételeét figyelembe véve írható, hogy:

$$dG = \left( \frac{\partial G}{\partial T} \right)_p dT + \left( \frac{\partial G}{\partial p} \right)_T dp \qquad \left( \frac{\partial G}{\partial T} \right)_p = -S \qquad \left( \frac{\partial G}{\partial p} \right)_T = V$$
$$dG = V dp - S dT$$

Nyílt rendszer esetén a szabadentalpia függ a komponensek mólszámától is, így a szabadentalpia:

$$dG = -S dT + V dp + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial G}{\partial n_j} \right)_{p,T,n_{i \neq j}} dn_i$$

### A kémiai potenciál

Elegyrendszer szabadentalpiája abban az esetben, ha az elegy végtelenül nagy mennyiségéhez az  $i$  elegykomponens egymólnyi mennyiségét adjuk hozzá:

$$\left( \frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{p,T,n_{i \neq j}} = \mu_i$$

Az elegyfázis  $i$  komponensének kémiai potenciálját az alábbi összefüggéssel számolhatjuk:

$$\bar{\mu}_i = \bar{\mu}_i^0 + \Delta\bar{\mu}_i$$

Az  $\Delta\bar{\mu}_i$  az elegyedés moláris szabadentalpiája:

$$\Delta\bar{\mu}_i = \Re T \ln(\gamma_i x_i)$$

ahol a  $\gamma_i x_i$  az elegy  $i$  komponensének aktivitása, a  $\gamma_i$  az aktivitási együttható, melynek definíciója:

$$\lim_{x \rightarrow 1} \gamma_i = 1$$

Egyensúlyban lévő fázisok esetén a kémiai potenciál azonos komponensenként!!!

Köszönöm a figyelmet, egyelőre ennyi😊

# Egykomponensű rendszerek fázisegyensúlya

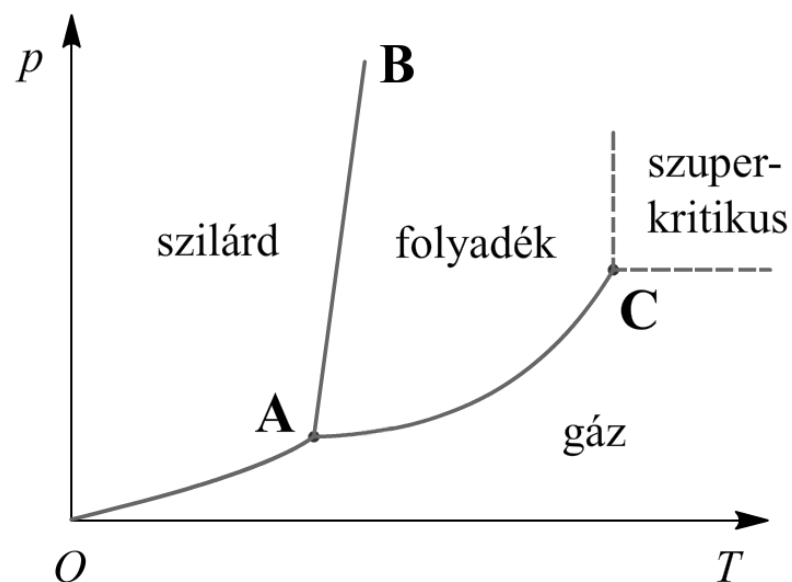
Vegyipari műveletek 3 kurzushoz

Összeállította:  
Dr. Szepesi L. Gábor  
egyetemi docens

### Egykomponensű rendszerek

#### p-T fázisdiagramok

A fázisdiagramok olyan diagramok, amelyeken az állapotjelzők függvényében az adott állapothoz tartozó fázisokat tüntetjük fel, a fázisátmeneteket görbékkel, illetve háromdimenziós ábrázolás esetében felületekkel jelöljük. Fázisdiagramokat szerkeszthetünk egykomponensű rendszerekre, de elegyekre is. Legelterjedtebbek a kétdimenziós fázisdiagramok, amelyek esetében két állapotjelző függvényében ábrázoljuk a fázisokat, és a többi állapotjelző értékét rögzítjük. A legfontosabbak a p-T diagramok, ahol a nyomás és a hőmérséklet a két kiválasztott állapotjelző.

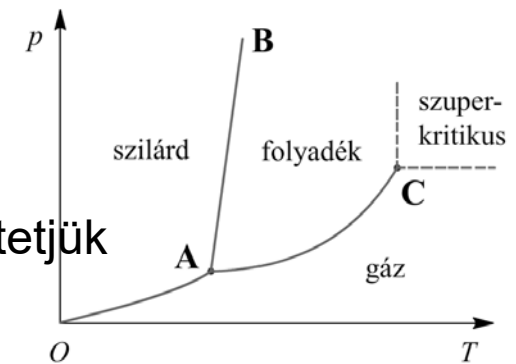


### Egykomponensű rendszerek

#### p-T fázisdiagramok folyt...

Egy tiszta anyagnak (ha feltesszük, hogy csak egy szilárd módosulata van) alapvetően három fázisát különböztetjük meg: a szilárd, a folyadék- és a gázfázist. A szilárd és a folyadékfázist kondenzált fázisnak is nevezzük. A

fázisdiagramon az egyes fázisokat folytonos görbék határolják. Egy fázishoz tartozó tartományon belül az összes p-T pár által definiált állapotban az anyag adott fázisa a termodinamikailag stabil. Ez tehát azt jelenti, hogy az adott tartomány p-T pontjaiban létezhet az anyag más halmazállapotban (pl. a víz  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on és standard nyomáson lehet folyadék), de ez termodinamikailag nem stabil, azaz nem egy egyensúlyi állapot. Az ilyen állapotokat metastabil állapotnak nevezzük. A fázisokat elválasztó görbék a fázisátmeneteket (fázisátalakulásokat) jelentik, a görbék pontjaiban az anyag két fázisa van egymással egyensúlyban. Vegyük észre, hogy a fázisátmenet nyomása és hőmérséklete nem független egymástól, a fázisátmenet nem következhet be tetszőleges állapotban. Egy adott nyomáshoz csak egy adott hőmérséklet tartozhat, és ezeket a nyomás-hőmérséklet párokat a diagram görbéi adják meg.



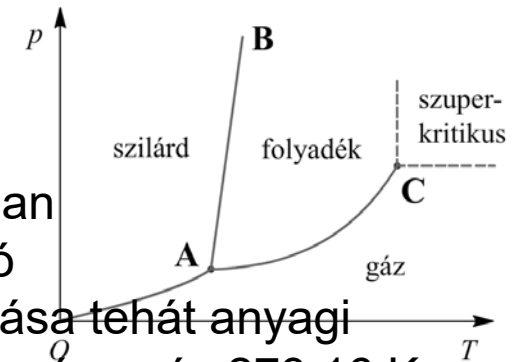


### Egykomponensű rendszerek

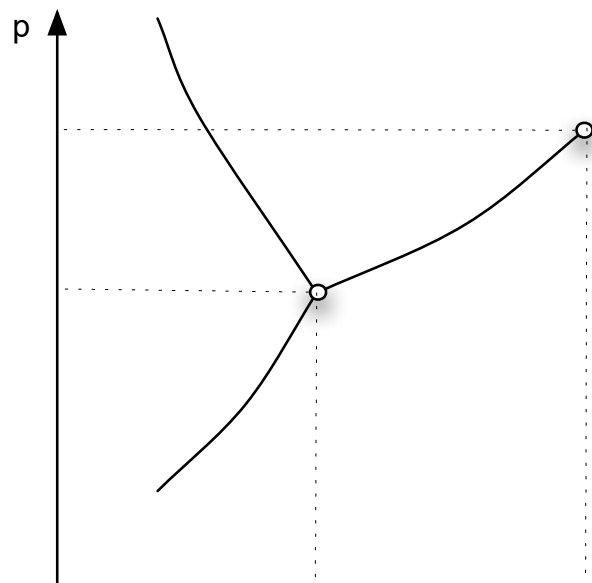
A fázisdiagramnak két kitüntetett pontja van: az ábrán A-val jelölt **hármaspont** és a C-vel jelölt **kritikus pont**.

A hármaspontban az anyag mind a három fázisa egyensúlyban van. Ez csak egy bizonyos hőmérsékleten és a hozzá tartozó nyomáson lehetséges, a hármaspont hőmérséklete és nyomása tehát anyagi állandók. Például a víz három fázisa kizárólag 6,11 mbar nyomáson és 273,16 K-en lehet egyensúlyban egymással.

A kritikus pont jellemzője, hogy ennél magasabb hőmérsékleten az anyag nem cseppfolyósítható. A kritikus térfogat az a térfogat, amelyet 1 mol gáz a kritikus hőmérsékleten és nyomáson betölt. A kritikus hőmérséklet és nyomás felett csak egy fázis létezhet, a gáz fázis, amelynek ezt a speciális tartományát szuperkritikus vagy más néven fluid állapotnak nevezzük. A **szuperkritikus** állapot határát szaggatott vonallal jelöltük a diagramon. Nem véletlenül, hiszen ez nem fázishatár. A kritikus nyomásnál alacsonyabb nyomású gázállapotból a szuperkritikus állapotba való átmenet nyilvánvalóan nem fázisátmenet, de meglepő módon a folyadékfázisból a szuperkritikus állapotba történő átmenet sem, mivel minden fizikai mennyiség folytonosan változik az átmenet során.



## Clapeyron-egyenlet



Az állapotmezők közötti válaszvonalak:

- Olvadási nyomásgörbe
- Gőznyomásgörbe
- Szublimálási nyomásgörbe

$$dG_{\text{egyensuly}} = 0$$

$$dG_{\text{egyensuly}} = dG_I - dG_{II} = 0$$

Ahol  $dG_I$  és  $dG_{II}$  az I. és II. fázis szabadentalpiájának anyagátmenettel okozott változása.

Reverzibilis állapotváltozásra igaz, hogy:

$$dG_I = -S_I dT + V_I dp = dG_{II} = -S_{II} dT + V_{II} dp$$

Két fázis egyensúlyi görbéjének  $dp/dT$  hajlását a következő módon számolhatjuk:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{S_{II} - S_I}{V_{II} - V_I} = \frac{\Delta S}{\Delta V} \qquad \Delta S = \frac{\Delta H}{T}$$

Így az előző egyenlet:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta H}{T \Delta V} \qquad \text{Általános érvényű Clapeyron egyenlet}$$

### Gőz-folyadék egyensúly – Clausius Clapeyron egyenlet

Alkalmazva az előbbi általános összefüggést Gáz-Folyadék fázisátmenetre:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta H_{f,g}}{T (V_{II} - V_I)}$$

Ha elhanyagoljuk a folyadék térfogatot ( $V_I$ ) – kritikus ponttól nagyobb távolságra megengedhető – és alkalmazzuk a gáztörvényt:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta H_{f,g}}{\mathfrak{R} T^2} p$$

A fenti egyenletet változóik szerint szétválasztva és integrálva határok között:

$$\int_1^2 \frac{dp}{p} = \int_1^2 \frac{\Delta H_{f,g}}{\mathfrak{R} T^2} dT$$
$$\ln \frac{p_2}{p_1} = \frac{\Delta H_{f,g}}{\mathfrak{R}} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

Ez az egyenlet  $\ln p - 1/T$  koordinátarendszerben egyenes. Csak tökéletes viselkedésű gázokra valamint nyomástól és hőmérséklettől független párolgási entalpiákra vonatkozik.

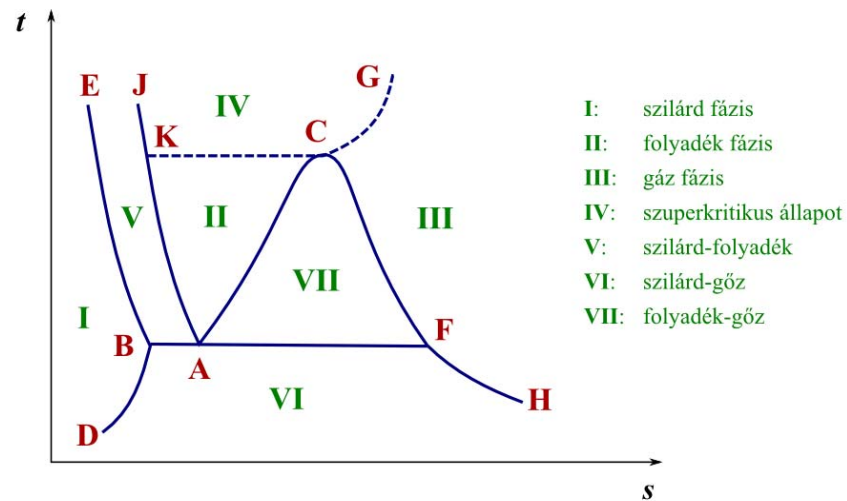
Gyakran használatos közelítés: Antoine egyenlet:

$$\ln p = A - \frac{B}{T} \qquad \ln p = A - \frac{B}{T + C}$$

## A T-S diagram

Az eddigiekben egykomponensű rendszerek p-T fázisdiagramjaival foglalkoztunk. A p-T diagramokról leolvashatjuk, hogy adott hőmérsékleten és nyomáson milyen fázisok vannak jelen, milyen körülmények között történnek meg a fázisátalakulások.

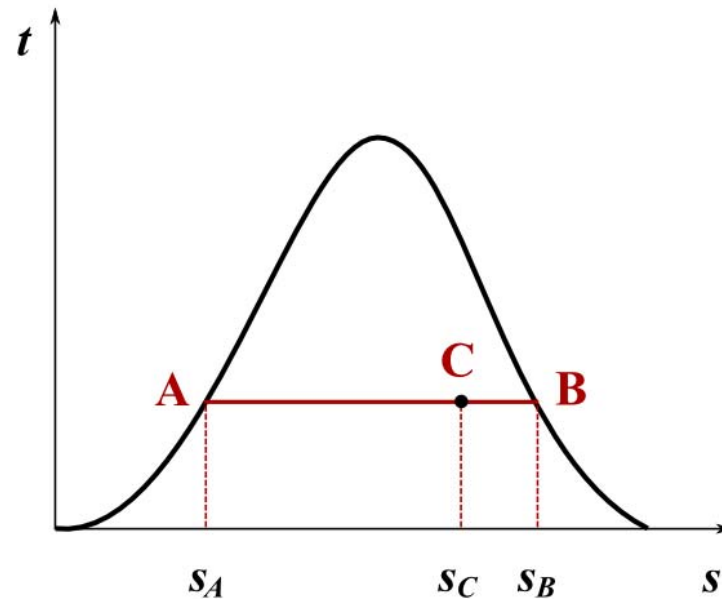
Termodinamikai számításoknál azonban általában nem elegendő az állapotjelzők ismerete, hanem szükségünk van az állapotfüggvények értékére is. Gyakorlati szempontból a két legfontosabb állapotfüggvény az entalpia és a szabadentalpia.



- |   |  |
|---|--|
| <b>DB:</b> szilárd (gőzzel egyensúlyban)      | <b>CF:</b> telített gőz                  |
| <b>BAF:</b> hármaspont                        | <b>FH:</b> gőz (szilárddal egyensúlyban) |
| <b>BE:</b> szilárd (folyadékkal egyensúlyban) | <b>C:</b> kritikus pont                  |
| <b>AJ:</b> folyadék (szilárddal egyensúlyban) | <b>KCG:</b> fluid állapot határa         |
| <b>AC:</b> telített folyadék                  |  |

### A T-S diagram

A fázisok arányának kiszámításához az ún. emelőszabályt alkalmazzuk, amely kimondja, hogy a folyadék- és a gázfázis tömegének az aránya megegyezik a CB és az AC szakaszok hosszának az arányával



Köszönöm a figyelmet, egyelőre ennyi😊

# Többkomponensű rendszerek fázisegyensúlya

Vegyipari műveletek 3 kurzushoz

Összeállította:  
Dr. Szepesi L. Gábor  
egyetemi docens

### Többkomponensű rendszerek

#### Elegyek, oldatok

Az **elegyek** olyan homogén vagy inhomogén egyfázisú rendszerek, amelyek két vagy több komponensből állnak. Vannak gáz, folyékony és szilárd halmazállapotú elegyek. Az elegyekben a komponensek molekuláris eloszlásúak. Ezzel szemben a **keverékekben** a komponensek fázistulajdonságaikat megtartva makroszkopikusan diszpergált fázisokként oszlanak szét egymás között. A **kolloid rendszerek** a keverékek és elegyek közötti átmenetet jelentik.

Az elegyeken belül **oldatról** beszélünk, ha az egyik komponens lényegesen nagyobb arányban van jelen, mint a többi. Általában folyadékfázisú oldatokkal találkozunk, de előfordulnak szilárd oldatok is. A leggyakoribb oldószer a víz.

Egy komponens móltörtjét megkapjuk, ha a komponens anyagmennyiségét elosztjuk az elegy összes komponenseinek mennyiségével:

Egy komponens **móltörtjét** megkapjuk, ha a komponens anyagmennyiségét elosztjuk az elegy összes komponenseinek mennyiségével:

$$x_i = \frac{n_i}{\sum n_i}$$

A **kémiai koncentráció** (röviden: koncentráció) azt adja meg, hogy hány mól oldott anyag van egységnyi térfogatú elegyben:

$$c_i = \frac{n_i}{V_{\text{oldat}}}$$



### Elegyek oldatok folyt...

A molalitás az egy kg oldószerben feloldott anyagmennyiség mólokban:

$$m_i = \frac{n_i}{m_{\text{oldószer}}}$$

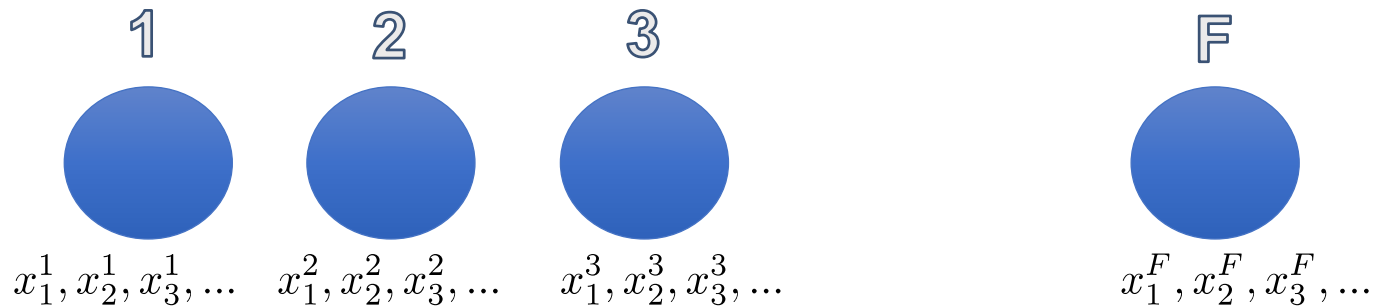
A molalitás mértékegysége a mol/kg. Egyik előnye a koncentrációhoz képest az, hogy pontosabban megadható, mivel az oldószert is tömegre mérjük be. A másik előnye, hogy nem változik a hőmérséklettel, míg a koncentráció az oldat sűrűségének a változása miatt kismértékben csökken a hőmérséklet növelésével.

Számítsuk ki 25 °C-on a 20 tömegszázalékos répacukoroldatban a cukor

- 1.móltörtjét,
- 2.koncentrációját,
- 3.molalítását.

Az oldat sűrűsége  $1,0794 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , a moláris tömegek 18,0 és  $342 \text{ g mol}^{-1}$ .

Egyensúlyok kvalitatív jellemzése – Gibbs-féle fázisszabály:



Egyensúly esetén a kémiai potenciál azonos adott komponens esetén!

$$\mu_i^1 = \mu_i^2 = \dots = \mu_i^F \quad (F-1)K \text{ egyenlet}$$

Adott fázison belül az összetételre igaz, hogy  $\sum_{i=1}^k x_i = 1$  (ez F db egyenlet)

Szabadsági fok = ismeretlenek száma – egyenletek száma!

Ismeretlenek száma:  $2 + FK$

Egyenletek száma:  $(F - 1)K + F$

$$SZ = 2 + FK - ((F - 1)K + F)$$

Gibbsz-féle fázisszabály

$$\boxed{F + SZ = K + 2}$$

### Raoult törvénye

A tökéletes gáztörvény jó támpontot ad a gázok és gőzök termodinamikai tulajdonságainak a tanulmányozásához. Sok esetben kielégítő eredményt kapunk, ha valóságos gázokra a tökéletes gázközelítést alkalmazzuk. Még akkor is érdemes a gázok viselkedését a tökéletes gázokéhoz viszonyítani, ha jelentős az eltérés az ideális viselkedéstől. Kíváncsi, hogy a gázokhoz hasonlóan a folyadékelegyekben is definiáljuk az ideális viselkedést. Az ideális gázt a kohéziós erők teljes hiánya jellemzi. Folyadékokban ezt a meghatározást nem alkalmazhatjuk, mert mindig van jelentős kohéziós erő a molekulák között. Ezért az ideális folyadékelegyet úgy definiáljuk, hogy benne egyforma kohéziós erők lépnek fel a különböző molekulák között.

Illékony anyagok fontos jellemzője a tenzió (gőznyomás), amely a folyadék feletti gőztér egyensúlyi nyomása. A tiszta komponens tenzióját  $p_i^*$ -gal fogjuk jelölni. Az elegyek feletti gőztérben minden illékony komponens megtalálható, ezeket a móltörttel ( $y_i$ ) vagy a parciális gőznyomással ( $p_i$ ) jellemezhetjük.

A komponens parciális gőznyomása annak a mértéke, hogy mennyire „érezik jól magukat” a molekulák az elegyben. Nagy gőznyomás nagy menekülési hajlamot, nagy kémiai potenciált jelent. Megfordítva, minél kisebb a komponens kémiai potenciálja az oldatban, annál kisebb a parciális nyomása a gőztérben.

Raoult törvénye szerint ideális elegyben állandó hőmérsékleten a komponens parciális nyomása a gőztérben egyenesen arányos a móltörtjével a folyadékfázisban.

$$p_i = x_i \cdot p_i^*$$

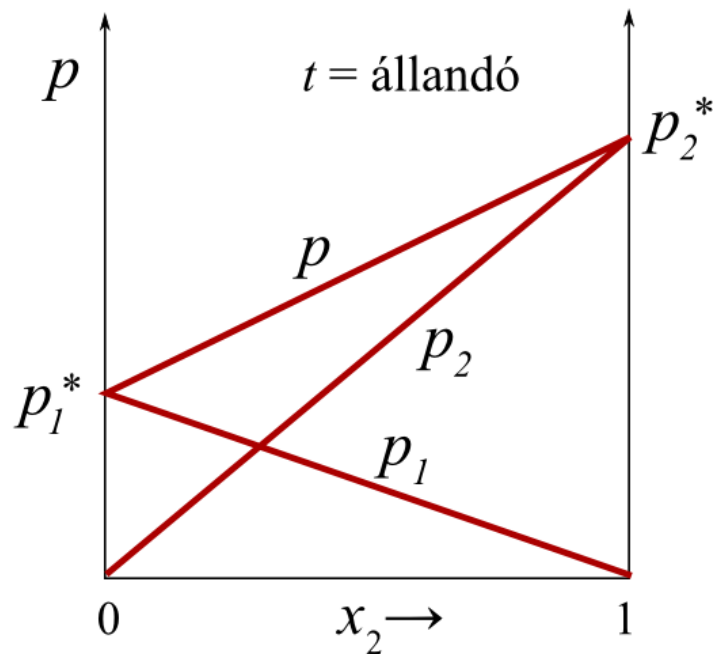
### Raoult törvénye .. folyt.

Ez a törvény összekapcsolja a folyadékfázis és a gőzfázis összetételét. A gőzfázist tökéletes gázok elegyének tekintve alkalmazhatjuk a Dalton-törvényt:

$$p_i = y_i \cdot P$$

Ahol  $p$  az össznyomás.

Kétkomponensű ideális elegyben a parciális nyomások és az össznyomás:



$$p_1 = x_1 \cdot p_1^* \quad p_2 = x_2 \cdot p_2^*$$

$$p = p_1 + p_2$$

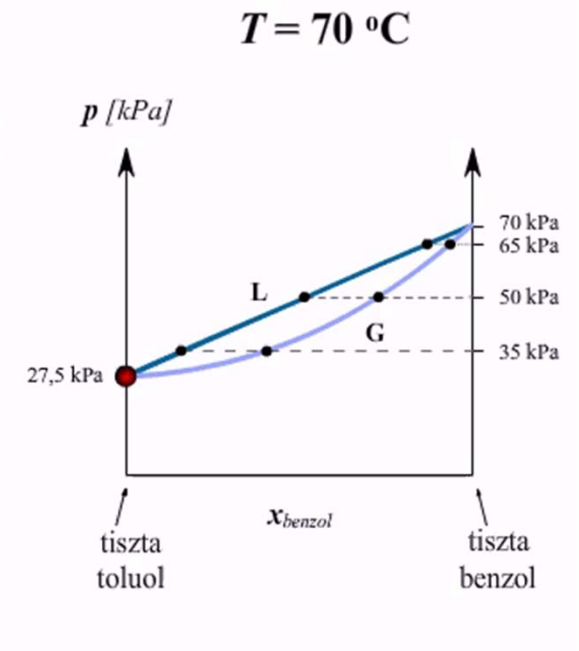
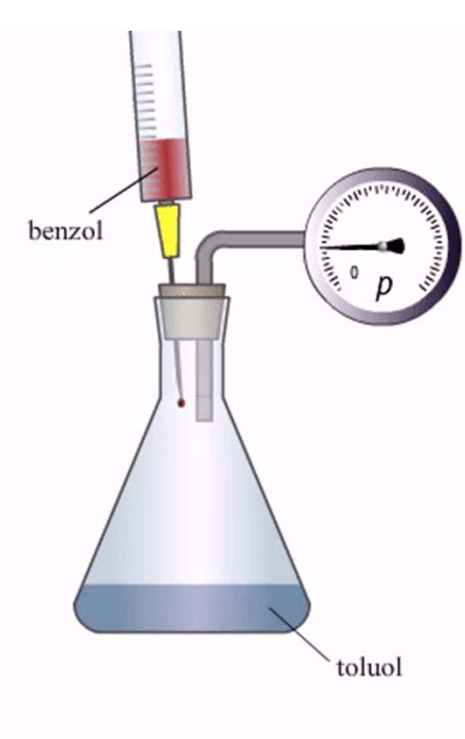
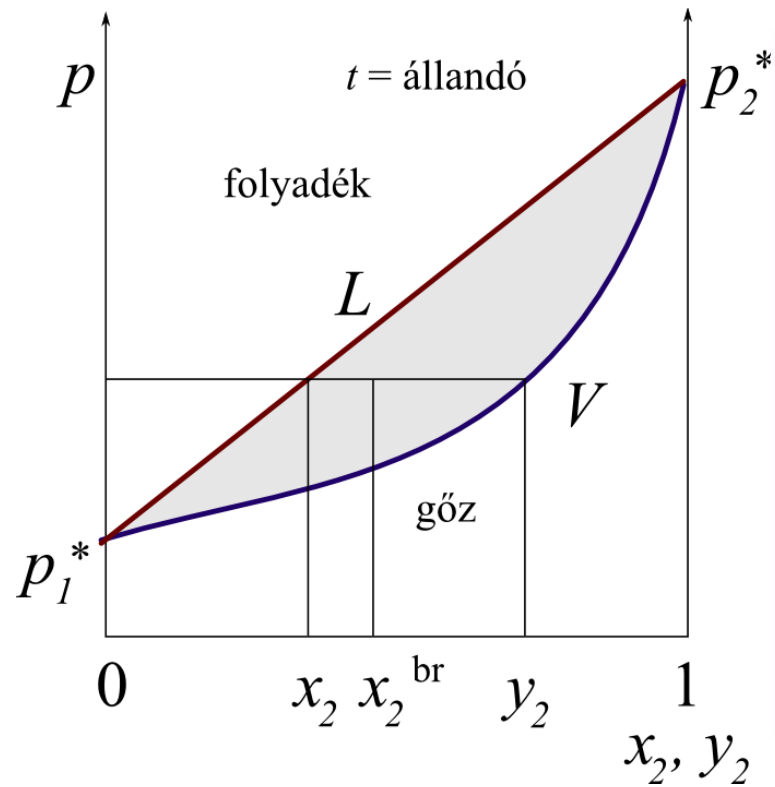
Izoterm forrpongtörbe:

$$p = (1 - x_2) \cdot p_1^* + x_2 \cdot p_2^* = p_1^* + (p_2^* - p_1^*) \cdot x_2$$

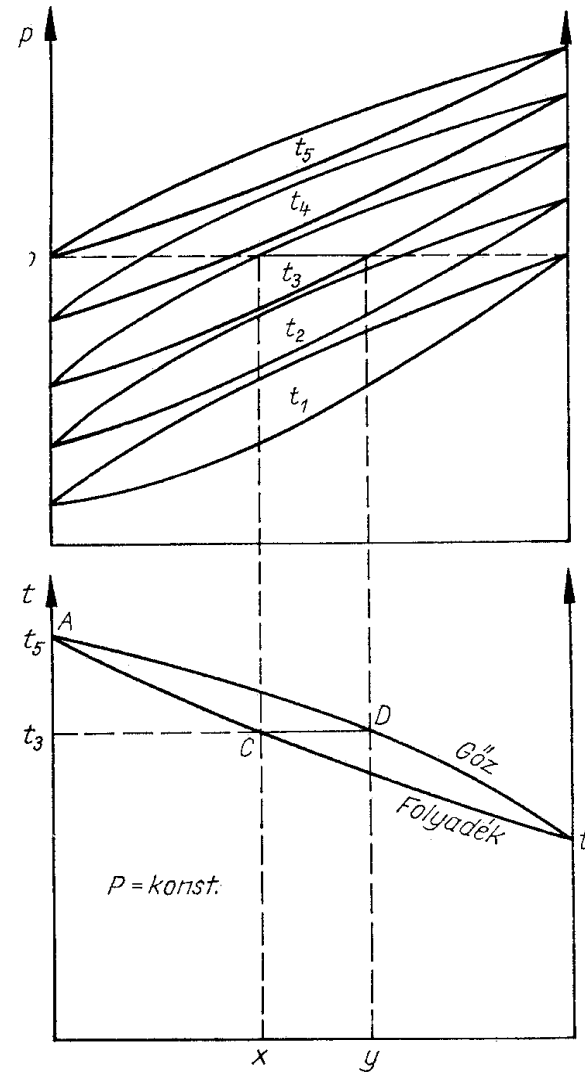
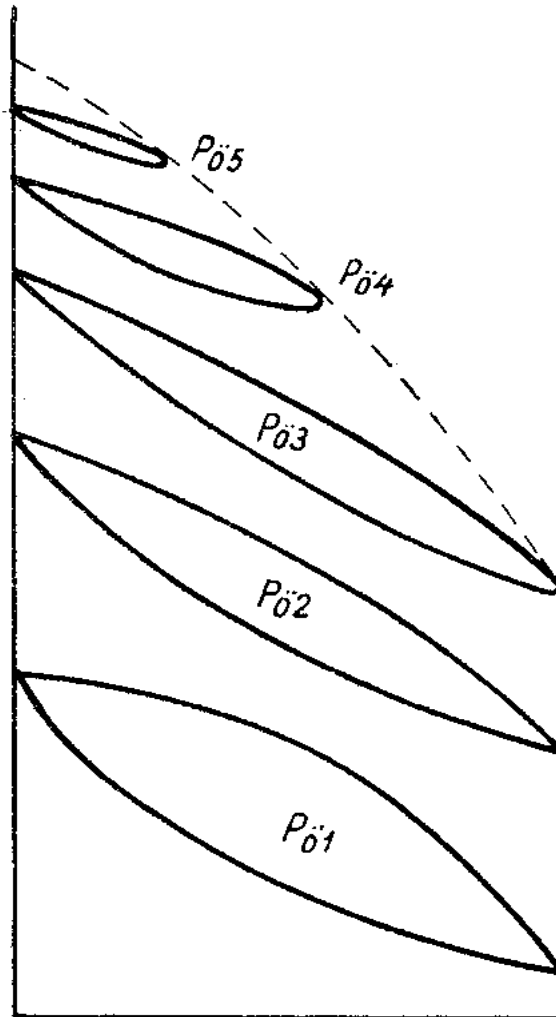
És vajon hogy lehet származtatni az izoterm harmatpontgörbét? ( $p(y)$  ?)

$$p = \frac{p_1^0 \cdot p_2^0}{p_2^0 - (p_1^0 - p_2^0) \cdot y_1}$$

Ideális gáz – tökéletes folyadék rendszer egyensúlya



Ideális gáz – tökéletes folyadék rendszer egyensúlya

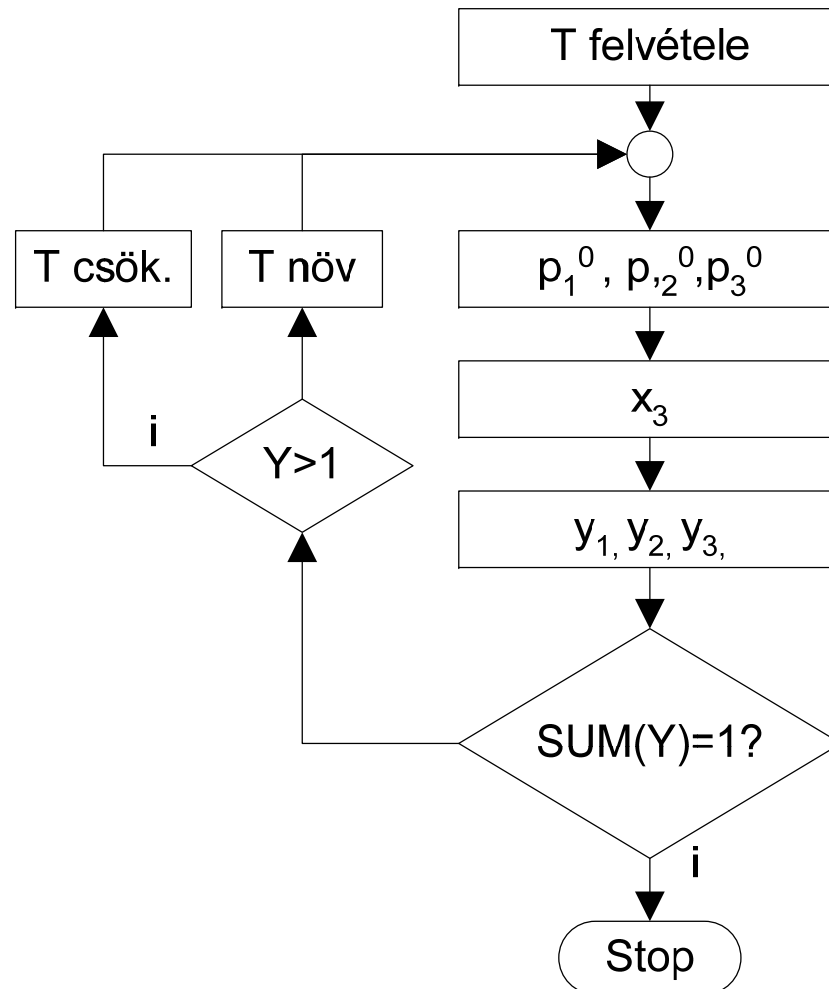


## Gőz-folyadék egyensúly – tökéletes gáz, ideális folyadék

### 3 komponensű rendszerek gőz-folyadék egyensúlya

Fázisok száma: 2    Komponensek száma: 3    Szabadsági fok?

Legyen adott  $p$ ,  $x_1, x_2$ . Hogyan tudom a többi adatot kiszámítani? ( $T$ ,  $x_3, y_1, y_2, y_3$ )



### ▣ Eltérés az ideális viselkedéstől...

Kétkomponensű folyadékelegyen megfelelő viselkedést csak akkor várhatunk, ha a különböző molekulák között ugyanakkora erőhatások lépnek fel, mint az azonosak között. Ettől az ideális viselkedéstől negatív vagy pozitív eltérést tapasztalhatunk.

Negatív eltérés akkor fordul elő, ha a különböző molekulák között nagyobb vonzás van, mint az azonos molekulák között. Ilyenkor a „menekülési hajlam” kisebb, mint ideális elegyen lenne. Elegyítéskor térfogatcsökkenés, azaz kontrakció következik be és az elegyedés exoterm folyamat. A komponens parciális gőznyomása kisebb, mint ideális elegyen lenne ( $p_i < x_i \cdot p_i^*$ ). A Raoult-törvény érvényességét úgy terjeszthetjük ki reális elegyekre, hogy a móltört helyébe egy „(racionális) aktivitás” nevű változót ( $a_i$ ) helyettesítünk, amely ideális elegyen megegyezik a móltörttel, de reális elegyen eltér attól. (Negatív eltérés esetén kisebb.) Az aktivitás az aktivitási koefficiens ( $\gamma_i$ ) és a móltört szorzata:

$$a_i = \gamma_i \cdot x_i$$

A Raoult-törvény tehát reális elegyekre ebben a formában érvényes:



## Egyensúlyi állandó, relatív illékonyság

### Egyensúlyi állandó

Megmutatja, hogy valamely komponens egyensúly esetén (adott  $p$ ,  $T$ ) milyen viszonylagos mennyiségben szerepel a gőztérben és a folyadékban. (helyesebb a megoszlási hányados kifejezés).

Tökéletes gáz és ideális folyadék esetén:

$$K = \frac{y}{x} \qquad y = \frac{p_1}{p} = \frac{p_1^0 x}{p} \Rightarrow K = \frac{p_1^0}{p}$$

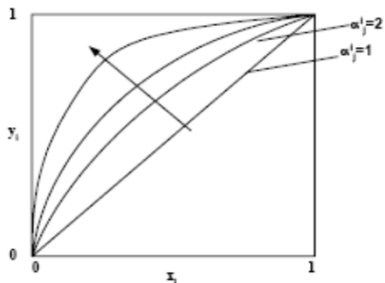
Kétkomponensű rendszer esetén:  $K_1 = \frac{y_1}{x_1} = \frac{p_1^0}{p}$ ;  $K_2 = \frac{y_2}{x_2} = \frac{p_2^0}{p} \Rightarrow K_1 \neq K_2$

### Relatív illékonyság:

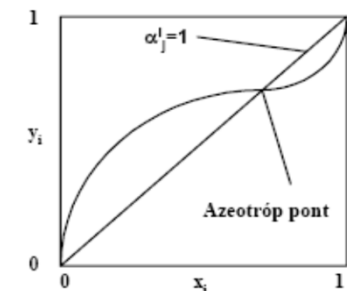
Két egyensúlyi állandó hányadosa rámutat arra, hogy adott körülmények között az egyik komponens hányszor illékonyabb a másikonál.

Multikomponens esetén: kulcskomponens.  $\alpha_{1,2} = \frac{K_1}{K_2}$

Tökéletes gáz és ideális folyadék esetén:



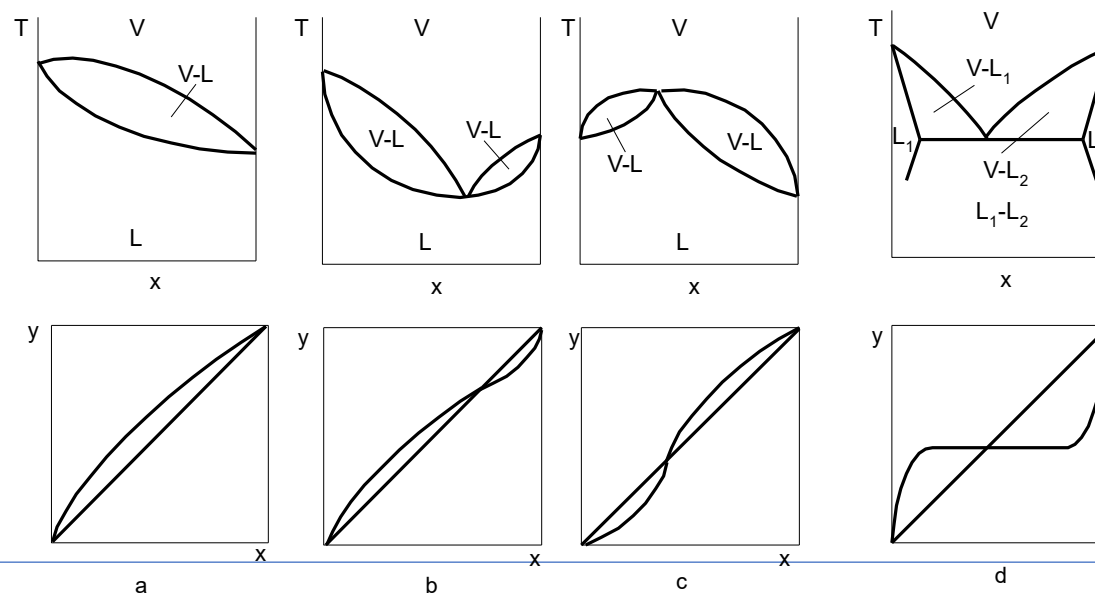
$$\alpha_{1,2} = \frac{K_1}{K_2} = \frac{y(1-x)}{x(1-y)} = \frac{p_1^0}{p_2^0} \Rightarrow y = \frac{\alpha_{1,2} x}{1 + x(\alpha_{1,2} - 1)}$$



### ▣ Azeotrópia

A gőz- és folyadék összetétele azonos, ami azt jelenti, hogy a relatív illékonyság ebben a pontban eggyel egyenlő. Ebben a pontban az illékonyságok különbözőségén alapuló egyszerű elpárologtatás nem eredményez elválasztást, de speciális desztillációs technikákkal eredményt lehet elérni.

Heterogén fázisú elegyeknél számoljuk még az ún. folyadék-folyadék egyensúlyokat is. Desztilláció megvalósításánál ilyenkor együtt számoljuk a gőz-folyadék és a folyadék-folyadék egyensúlyokat, és ezért ezt gőz-folyadék-folyadék egyensúlyoknak ill. egyensúlyi számításoknak nevezzük. A folyadékaktivitási együttható számítására alkalmas módszerek némelyike (pl. UNIQUAC, NRTL) alkalmas a folyadék-folyadék egyensúlyok számítására is.





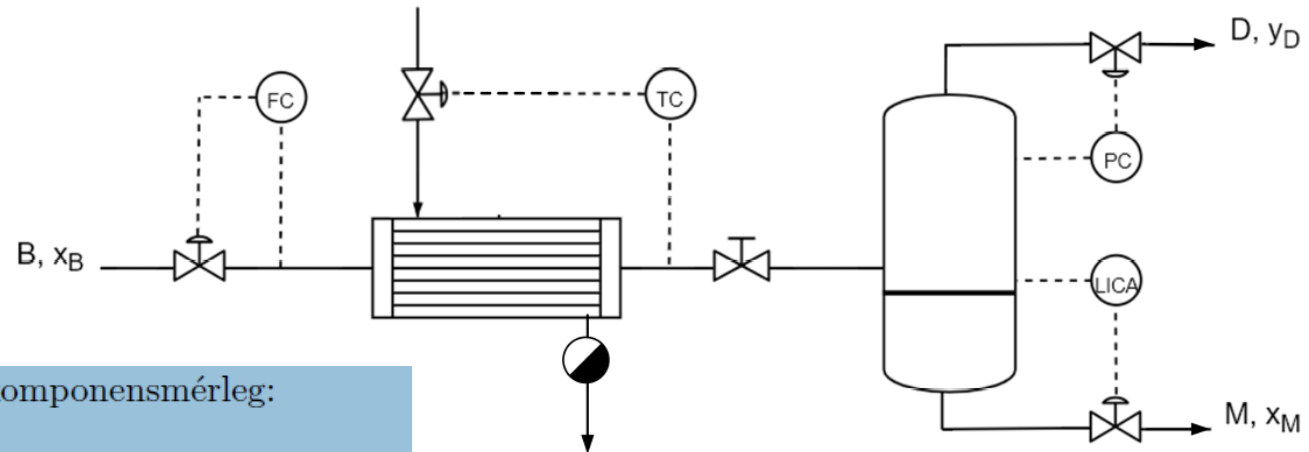
Köszönöm a figyelmet, egyelőre ennyi😊

# Flash desztilláció Biner elegy nyitott rendszerű lepárlása

Vegyipari műveletek 3 kurzushoz

Összeállította:  
Dr. Szepesi L. Gábor  
egyetemi docens

## Flash desztilláció – Vegyipari Műveletek 3 kurzushoz



Felírható az anyag és a komponensmérleg:

$$B = M + D$$

$$B \cdot x_B = M \cdot x_M + D \cdot y_D$$

Az első egyenletet helyettesítsük be a másodikba:

$$(M + D) \cdot x_B = M \cdot x_M + D \cdot y_D$$

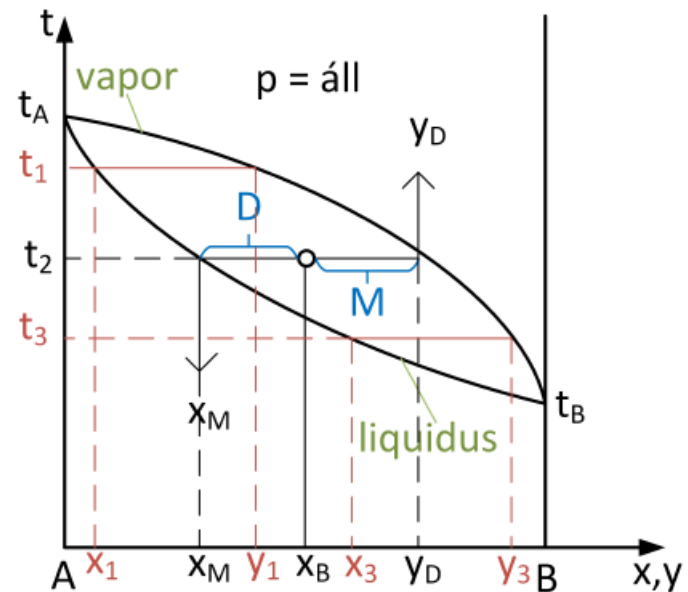
Ezt rendezzük át anyagáramok szerint:

$$M \cdot x_B - M \cdot x_M = D \cdot y_D - D \cdot x_B \rightarrow$$

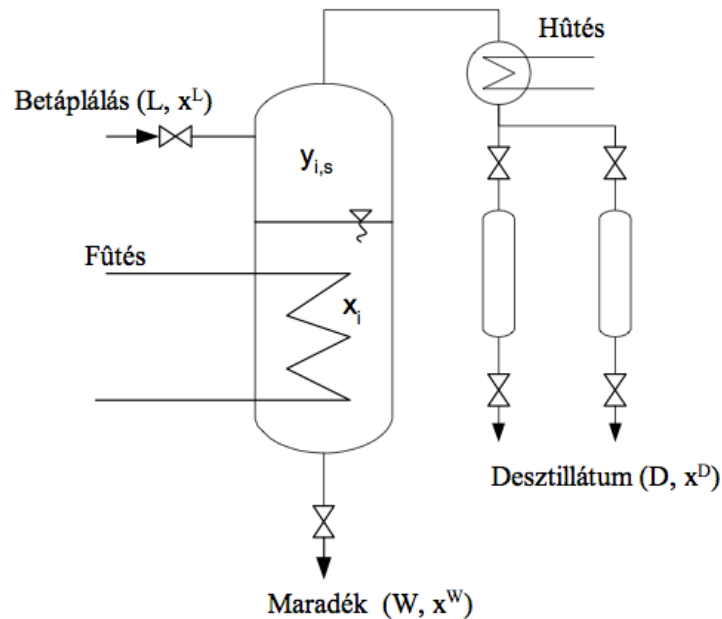
$$M \cdot (x_B - x_M) = D \cdot (y_D - x_B)$$

Ebből:

$$\frac{M}{D} = \frac{y_D - x_B}{x_B - x_M}$$



## Binér elegy nyitott rendszerű lepárlása



$$F x_i = y_i dF + (F - dF)(x_i - dx_i)$$

$$F dx_i = (y_i - x_i) dF$$

$$\int_L^W \frac{dF}{F} = \int_{x_L}^{x_W} \frac{dx}{y_i - x_i}$$

### Más megközelítés:

Az üstben az illékony anyag mennyisége:  $Lx$

Az illékony anyag megváltozása:  $d(Fx_i) = dFy_i$

$$d(Fx_i) = dFy_i \rightarrow dF \cdot x_i + F \cdot dx_i = dFy_i$$



$$\ln \frac{W}{L} = \int_{x_L}^{x_W} \frac{dx}{y_i - x_i}$$

Rayleigh-egyenlet

Köszönöm a figyelmet, egyelőre ennyi😊

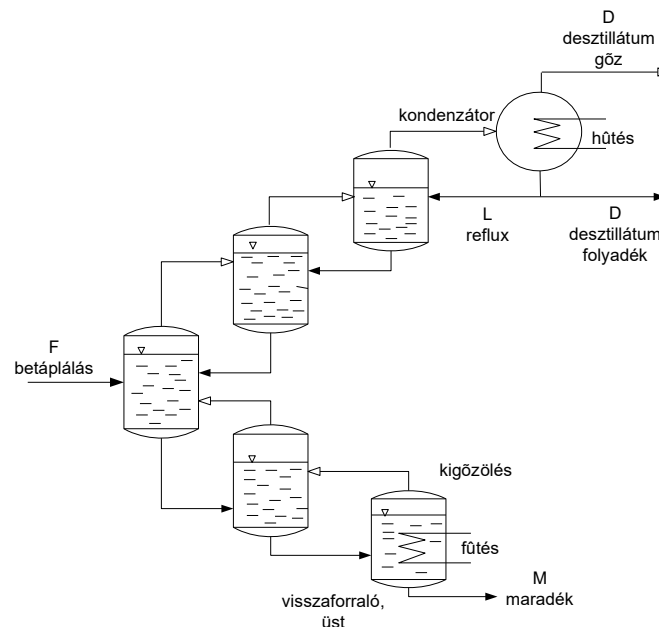


# Rektifikálás

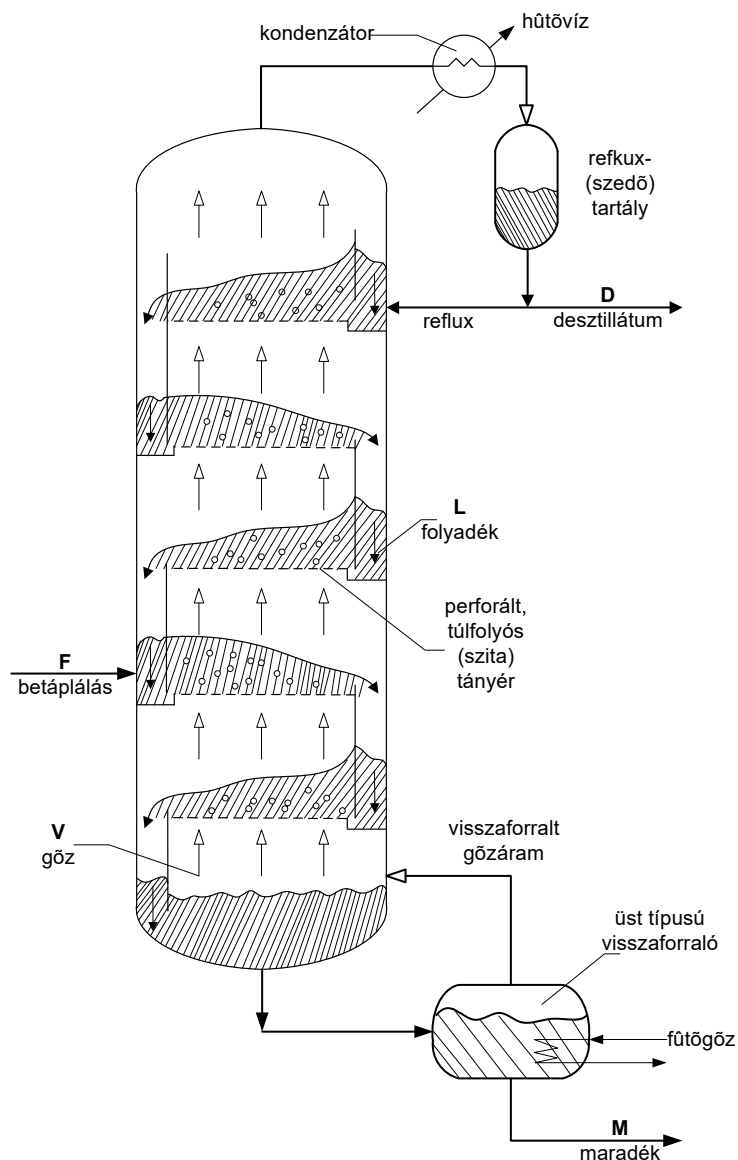
Vegyipari műveletek 3 kurzushoz

Összeállította:  
Dr. Szepesi L. Gábor  
egyetemi docens

Az egyszerű desztillációk könnyen kivitelezhetők, de megvannak az elválasztási korlátaik. Ezek az elválasztási korlátok gyakran nem teszik lehetővé, hogy a kívánt tisztaságú termékeket előállítsuk. Ilyenkor egy lehetséges megoldás, hogy a desztillációt addig ismételjük a desztillátummal ill. maradékkal, amíg a kívánt terméktisztaságot el nem érjük. A folyamatos egyensúlyi desztilláció ismételt végrehajtása energetikailag rendkívül kedvezőtlen, hisz az elegyet el kell párologtatni, majd a gőzöket kondenzáltatni kell. Energetikailag kedvezőbb, ha a gőzöket nem kondenzáltatjuk, hanem felhasználjuk a következő egyensúlyi fokozat fűtésére.



### Rektifikálás megvalósítása



Egy tányéros kolonnában a tányérok u. azt a funkciót töltik be mint a korábbi elvi vázlaton az egyensúlyi egységek. Vagyis a tányérről felszálló gőz és folyadék egymással egyensúlyban vannak. Ez a gyakorlatban nincs mindig így, ezért azt a tányért, amelyről a felszálló gőz és a lecsurgó folyadék ténylegesen egyensúlyban vannak ( $y_n \parallel x_n$ ) *elméleti tányérnak* nevezik. (Elméleti tányér fogalmát lásd az 5. fólián).

A desztilláló oszlopot alul az ún. visszaforralóban fűtik, és így állítják elő az elválasztáshoz szükséges gőzarámot. Ha ún. üst típusú visszaforralót alkalmaznak, akkor az elpárologtatás részleges, a visszaforralóból veszik el a maradékot vagy más néven fenékterméket, és az üst maga is megfelel egy elméleti tányérnak. Ha ún. termoszfion típusú visszaforralót alkalmaznak, akkor a visszaforrálás teljes, a maradékot az oszlop aljából, fenekéből veszik el, a visszaforráló nem jelent újabb elválasztást azaz egy újabb elméleti tányért.

Oszlop teteje – reflux: nagyságát a művelet határozza meg.

### Biner zeotrop elegyek rektifikálása

Ide sorolhatjuk mindazokat az elegyeket, melyek nem képeznek azeotropokat.

A betáplálás feletti más néven felső oszloprész az ún. *dúsító vagy rektifikáló zóna/szekció*, míg a betáplálás alatti vagy alsó oszloprész az ún. *szegényítő, kigőzölő vagy sztrippelő zóna/szekció*.

A kolonna teljes anyagmérlege:

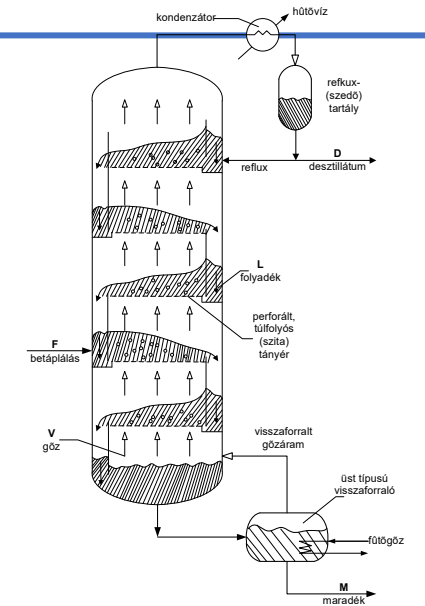
$$F = M + D$$

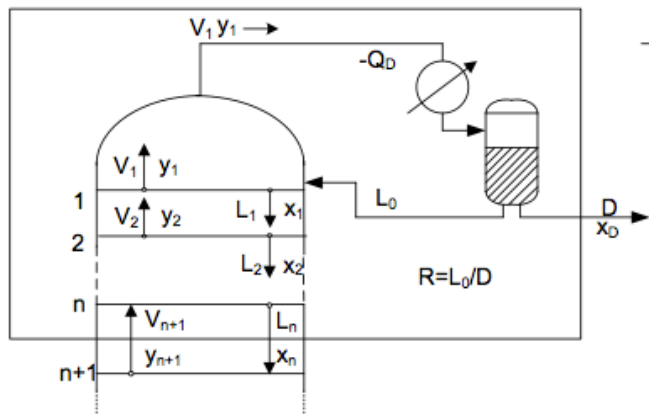
Komponensmérlege:

$$Fx_F = Mx_M + Dx_D$$

A desztilláló oszlop belső anyagáramait tanulmányozva jelentős egyszerűsítést tehetünk, ha alkalmazzuk az ún. *állandó moláris párolgás és túlfolyás tételét*, mely kimondja, hogy a kolonna belső áramai mólban kifejezve állandóak. (Természetesen gondolnunk kell arra, ha betáplálás ill. elvétel történik az oszlopba ill. oszlopból.)

- az egyes komponensek párolgáshő mólra vonatkoztatva közel állandóak,
- a hőmérsékletváltozásból eredő szenzibilis hőmennyiség-változások a párolgáshőhöz képest elhanyagolhatók,
- az elegyedési hőeffektus elhanyagolható,
- a hőveszteség elhanyagolható.





Az anyag- és komponensmérleg felírható a kolonna bármely részére, így pl. a felső  $n$  tányérra, beleértve az oszlopfejet is:

$$V_{n+1} = L_n + D$$

$$V_{n+1}y_{n+1} = L_nx_n + Dx_D$$

Az ekvimoláris párolgás-túlfolyás tétel értelmében a belső áramokat a felső részben  $V$ -vel és  $L$ -el jelöljük, továbbá:

$$V_{n+1} = V_n = V_{n-1} \dots = V$$

$$L_n = L_{n-1} = L_{n-2} = \dots = L$$

Az alsó részben az áramokat  $V'$ -vel és  $L'$ -el jelöljük, továbbá:

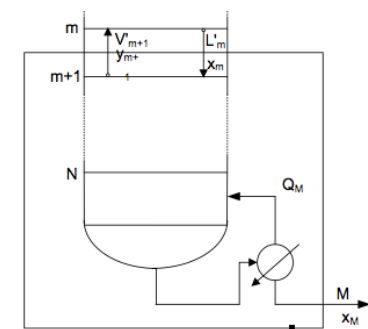
$$V'_{m+1} = V'_m = V'_{m-1} = \dots = V'$$

$$L'_m = L'_{m-1} = L'_{m-2} = \dots = L'$$

**Oszlop felső munkavonala:**

$$y_{n+1} = \frac{L}{V}x_n + \frac{D}{V}x_D \quad V = L + D \quad R = \frac{L}{D}$$

$$y_{n+1} = \frac{R}{R+1}x_n + \frac{x_D}{R+1}$$



Alsó munkavonal meghatározása:

$$L'_m x_m = M x_M + V'_{m+1} y_{m+1}$$

$$y_{m+1} = \frac{L'}{V'} x_m + \frac{M}{V'} x_M$$

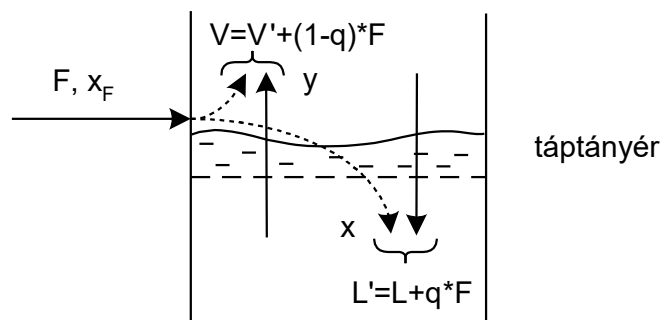
### A betáplálás hőállapota, q-vonal

A rektifikáló kolonnába, az esetek túlnyomó többségében az oszlop hossza mentén táplálunk be. A betáplálás megváltoztatja az oszlop belső áramait. A változtatás mértéke attól függ, hogy az betáplálás milyen hőállapotú, vagyis a kolonnába belépve, hogyan változtatja meg a belső gőz- és folyadékáramokat. A betáplálás hőállapotát  $q$ -val jellemezzük. Ennek definíciója:

$$q = \frac{H_F - h_f}{\Delta H_{f,g}}$$

*Szavakkal:  $q$  = egy mol betáp elpárologtatásához szükséges hőmennyiség és 1 mol betáp párologáshőjének a hányadosa.*

*Másrészt azt adja meg, hogy a betáplálás hányad része kerül a folyadékfázisba.*



A betáplálási helyen az alsó és felső munkavonal egyenlete metszik egymást:

$$V_{n+1}y_{n+1} = L_nx_n + Dx_D$$

$$L'_m x_m = Mx_M + V'_{m+1}y_{m+1}$$

Az *indexelést elhagyva*:

$$Vy = Lx + Dx_D$$

$$V'y = L'x + Mx_M$$

Kivonva a két egyenletet egymásból:

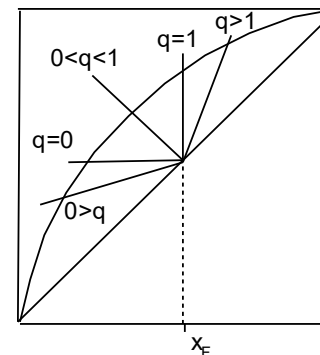
$$(V' - V)y = (L' - L)x - Mx_M - Dx_D$$

Felhasználva az ábra jelöléseit:  $F(q - 1)y = qFx - Fx_F$

**A q-vonal egyenlete:**

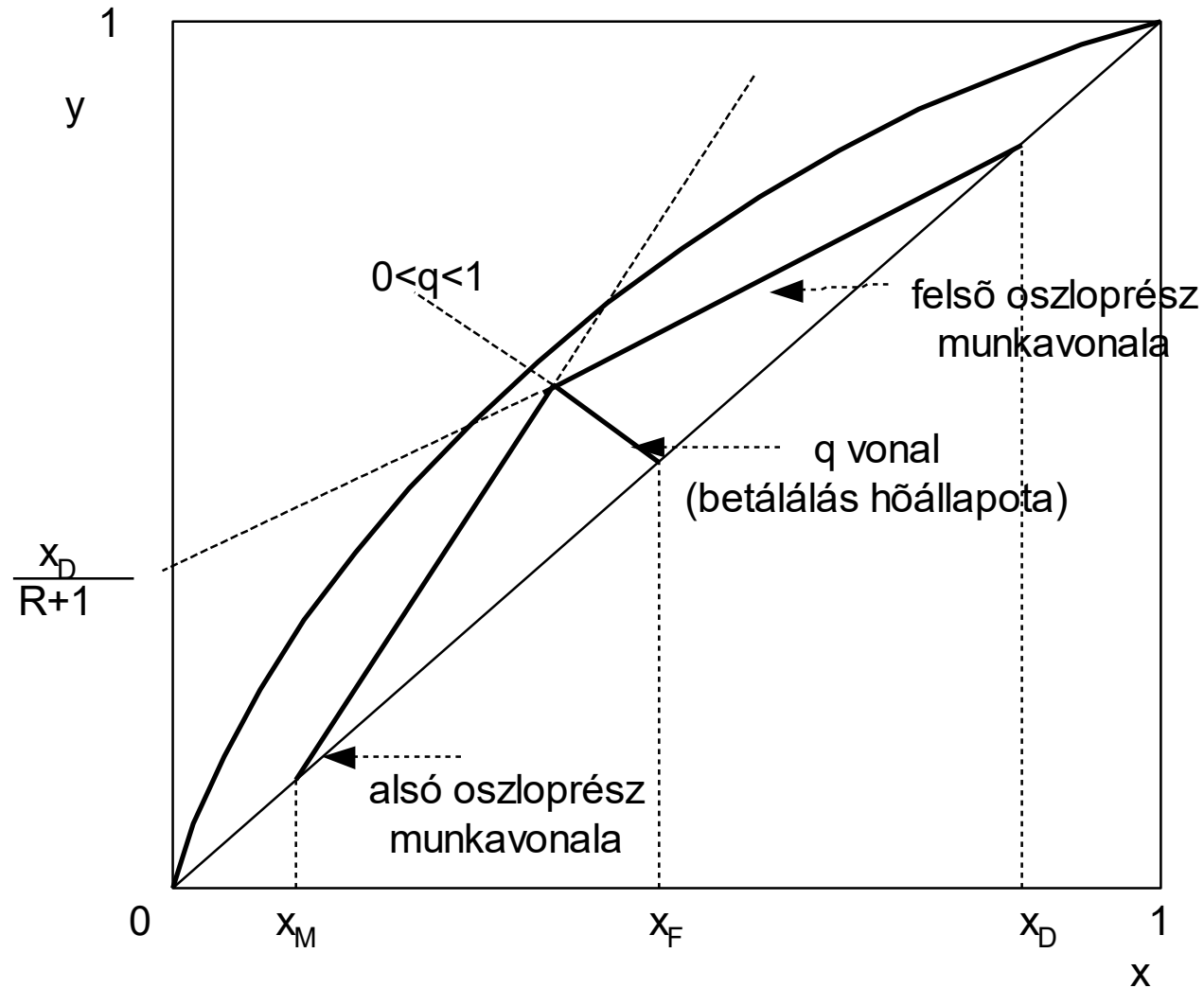
$$y = \frac{q}{q - 1}x - \frac{x_F}{q - 1}$$

A betáplálás	q
hideg, buborékpont alatti hőmérsékletű folyadék	q > 1
telített, buborékponton lévő folyadék	q = 1
gőz és folyadék elegye (buborék és harmatpont hőmérséklete között)	0 < q < 1
telített gőz (harmatponti hőmérsékleten lévő gőz)	q = 0
túlhevített gőz (harmatpont hőmérséklete felett lévő gőz)	q < 0

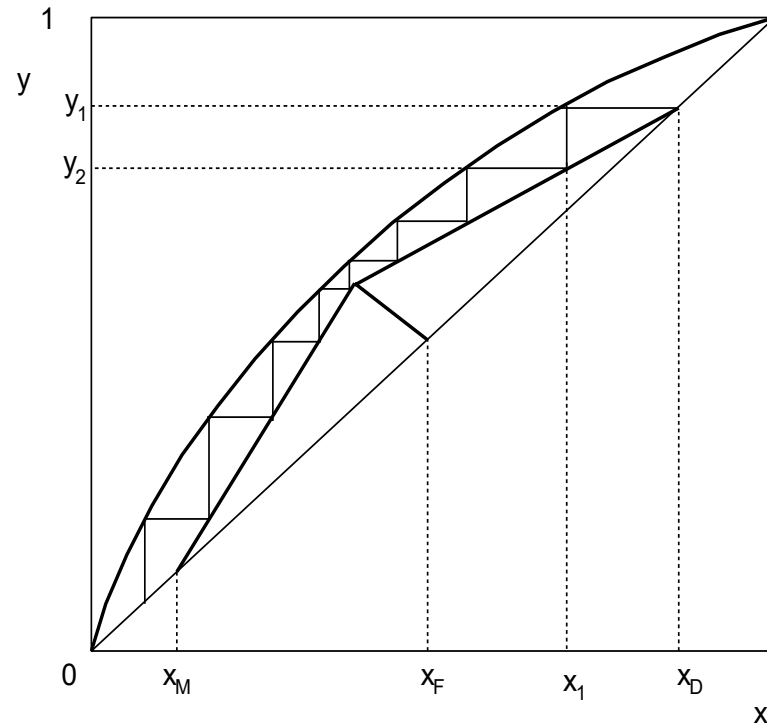


- Munkavonalak ábrázolása egyensúlyi diagramban – zeotrop elegy esetén

Hogyan rajzolhatók meg a munkavonalak?





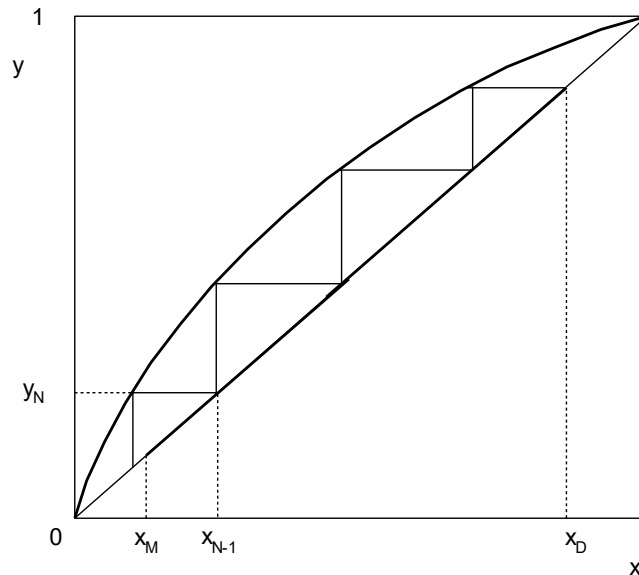


Betáplálás optimális helye:

A rektifikáló oszlop elméleti tányérszámainak meghatározásakor az a tányér, amelyik a felső és az alsó munkavonal metszéspontjában, azaz a hármás metszéspontban van, az lesz a betáplálás optimális helye. Ha nem erre a tányérra táplálunk be, akkor romlik a rektifikáló oszlop elválasztási hatékonysága.

Gyakorlat: több betáplálási hely kialakítása!!!

## Minimális tányérszám meghatározása – grafikus módszer



## Minimális tányérszám meghatározása – Fenske egyenlet

Alkalmazzuk a relatív illékonyság összefüggését az 1-es tányérra:

$$\frac{y_1}{1 - y_1} = \alpha_1 \frac{x_1}{1 - x_1}$$

Majd a 2. tányérra is:  $\frac{y_2}{1 - y_2} = \alpha_2 \frac{x_2}{1 - x_2}$

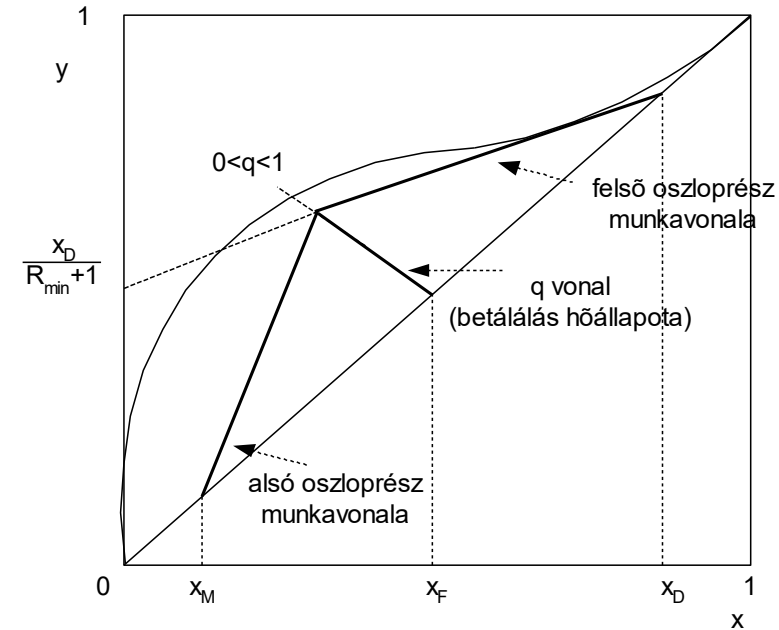
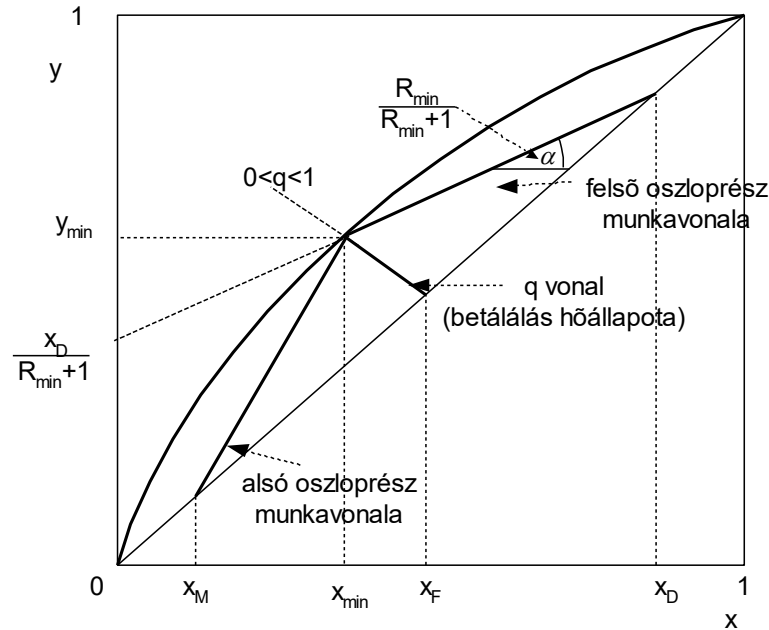
Teljes reflux esetén:  $y_i = x_{i-1}$       valamint       $y_1 = x_D$

Felírható ezen rekurzív formula:  $\frac{x_D}{1 - x_D} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \dots \alpha_N \frac{x_N}{1 - x_N}$

$$\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \dots \alpha_N = \bar{\alpha}^N$$

$$N_{min} = \frac{\lg \frac{x_D(1-x_M)}{(1-x_D)x_M}}{\lg \bar{\alpha}}$$

## Minimális refluxarány meghatározása – grafikus úton



## Minimális refluxarány meghatározása – Underwood összefüggés:

Abban az esetben, ha  $q=1$ :

$$R_m = \frac{1}{\alpha - 1} \left( \frac{x_D}{x_F} - \alpha \frac{1 - x_D}{1 - x_F} \right)$$

Köszönöm a figyelmet, egyelőre ennyi😊

# Oszlopszerkezetek

Vegyipari műveletek 3 kurzushoz

Összeállította:  
Dr. Szepesi L. Gábor  
egyetemi docens

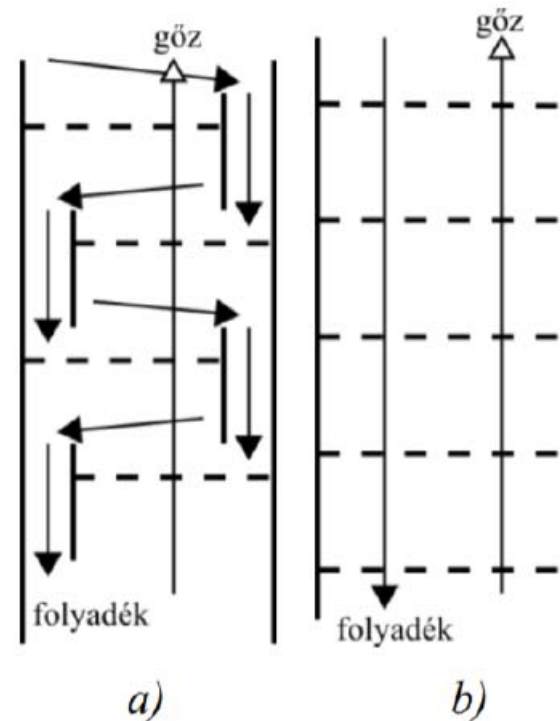
### Tányéros oszlopszerkezet kialakítása

A tányérok vagy tálcák egymástól megfelelő távolságra (kb. 300-800 mm) elhelyezkedő vízszintes elemek.

A tányérokon gőz-folyadék diszperz rendszert tartalmazó réteg alakul ki. A gőz ezen a rétegen kisebb-nagyobb buborékok vagy összefüggő gőzáram formájában áthalad a feljebb lévő tányérra. A folyadék a lejjebb lévő tányérra távozik.

A belső áramok szerint egy oszlop lehet:

- Túlfolyós
- Túlfolyó nélküli (szokás átcsöpögő vagy zuhanyozó tányérnak nevezni)

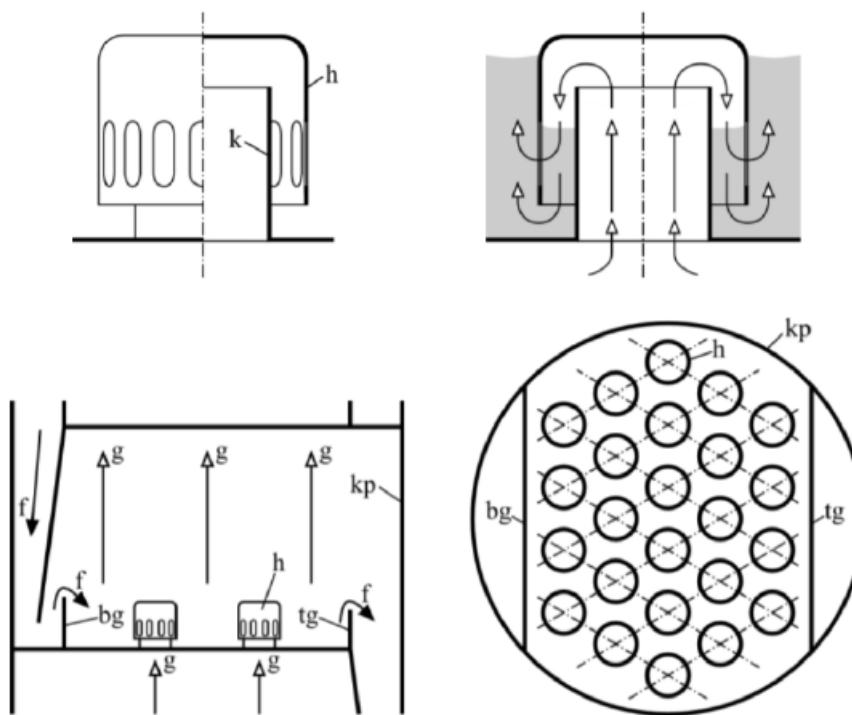


### Tányértípusok

**Harangsapkás vagy buboréksapkás tényér.** A legrégebbi tányértípus. A felszálló gőz a kéményeken áthaladva a harangokon belül a folyadék alá jut és azon átbuborékol. A harangokon vagy sapkákon különböző alakú, méretű perforációk lehetnek, amelyeken a gőz átbuborékol.

*Előnyei:* rugalmas működés, jó hatásfok, nagy tapasztalat és üzembiztonság.

*Hátrányai:* bonyolult konstrukció, nagy szerkezeti anyagigény, nagy beruházási költség, korlátolt kapacitás.

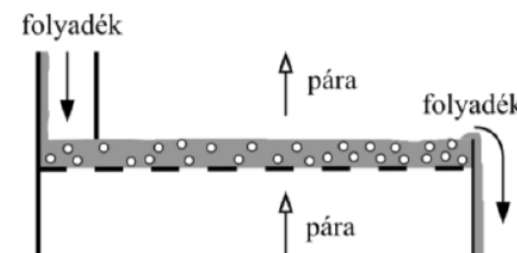


### Szitatányér

leggyakrabban a szesziparban és cseppfolyósítható gázok szétválasztására alkalmazzák.

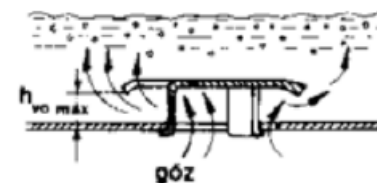
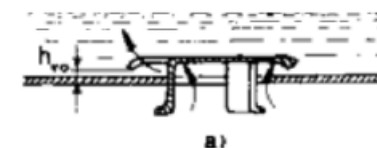
*Előnyei:* egyszerű konstrukció, olcsó, jó hatásfok.

*Hátrányai:* kevésbé rugalmas, érzékeny az alulterhelésre (a folyadékréteget a gőzsebesség dinamikus nyomása tartja fenn, ha ez nincs meg, a folyadék átcsöpög a lyukakon így romlik a hatásfok).



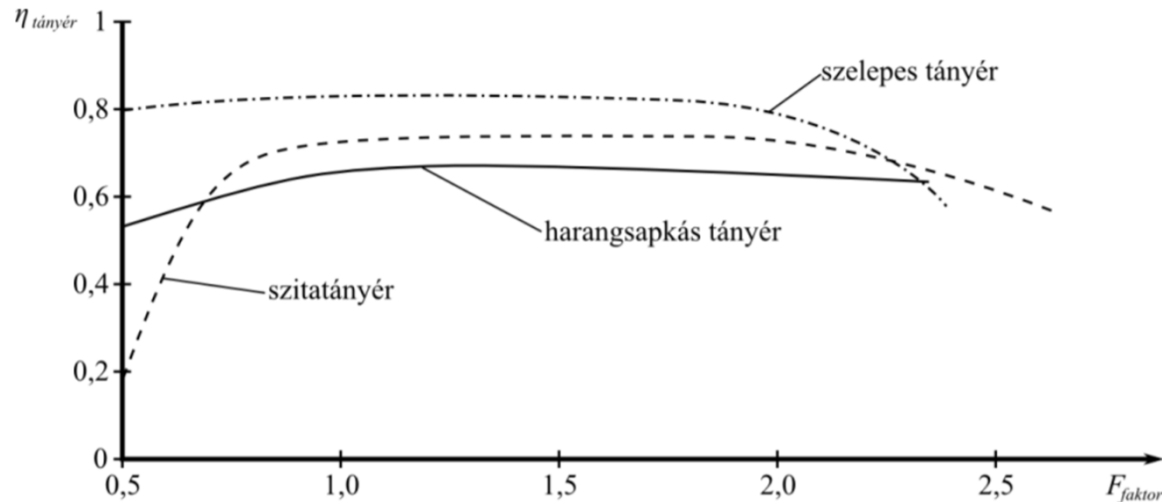
### Szelepes tányér

legkorszerűbb tányérkonstrukció. Célja, hogy a mindenkori változó terheléshez alkalmazkodó, azzal összhangban lévő átömlési szabad keresztmetszetet alakítsanak ki. Az átömlési keresztmetszet változását a szelepek felemelkedése és visszасüllyedése biztosítja.





Tányéros oszlopoknál a tányérhatásfok függ a terhelési tényezőtől



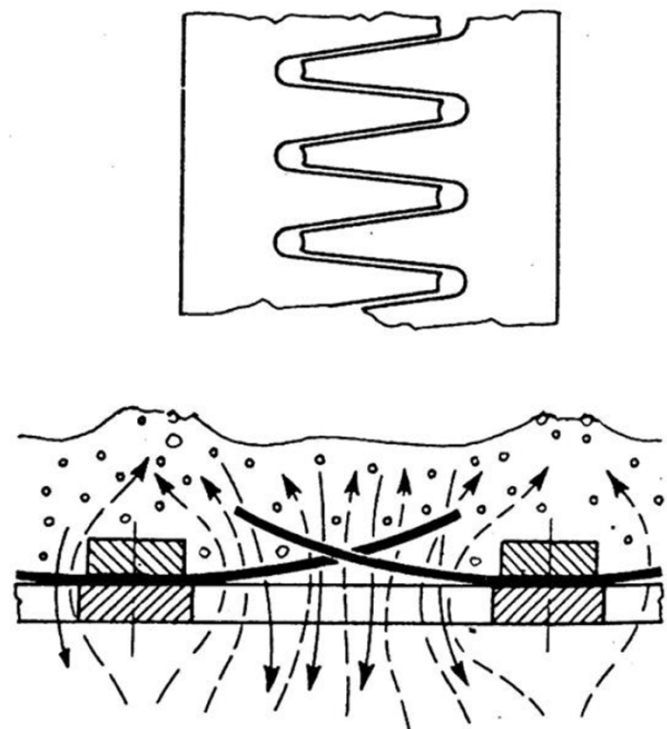
A minimális terhelési tényező alatt az adott tányér nem működik. Az ábra jól szemlélteti a szitatányérok alulterhelésre való érzékenységét.

A terhelési tényező maximuma az elárasztás (flooding) jelensége, amikor a tányéron képződő hab eléri a felette lévő tányért, amely következtében csökken a hatásosság a folyadékfázisok keveredése miatt. A terhelési tényező maximuma a tányértávolságtól is függ. Akkor optimális a terhelési tényező értéke, ha a tányérhatásfok maximális.

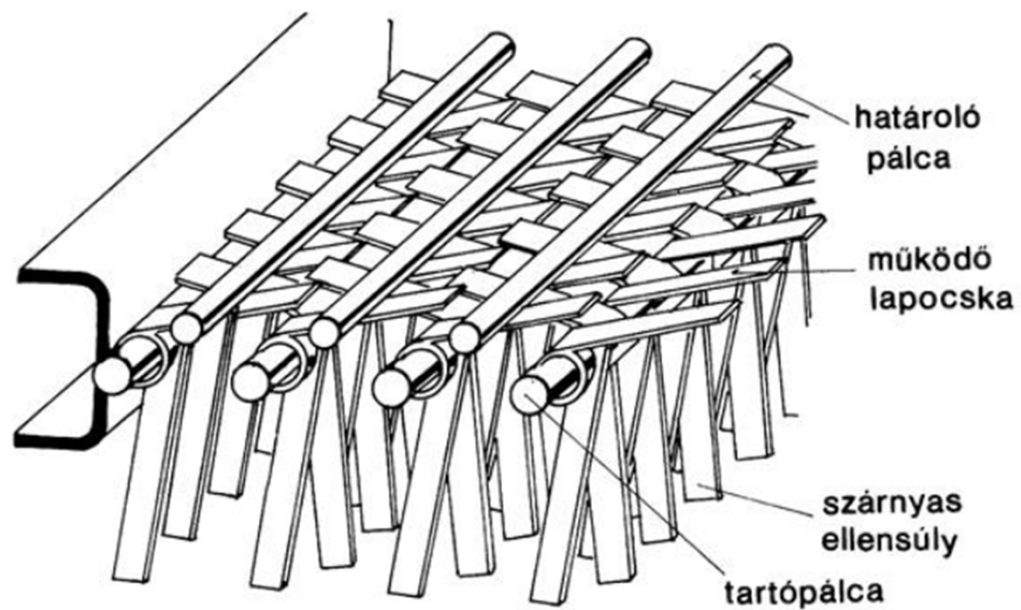
A terhelési tényező értéke folyamatosan változik, mivel a felszálló gőzfázis sűrűsége az összetételtől, a nyomástól és a hőmérséklettől is függ. Az oszlop hossza mentén alulról felfelé a nyomás és a hőmérséklet is csökken.

Magyarokhoz köthető tányérok

Rezgőnyelves



KEBIZUTA



### Töltött oszlopszerkezet kialakítása

A töltelékes oszlopokat, tornyokat rendszerint gáz-folyadék érintkeztető rendszerekben használják. Előnye a tányéros konstrukciókhoz képest, hogy általában kisebb beruházási költséggel járnak. Kis keresztmetszetek esetén ahol a tányéros konstrukció nem valósítható meg szintén töltelékes oszlopokat választanak a szétválasztás megvalósításához. A töltelékes oszlopokat két nagy csoportra lehet bontani:

- rendezett és
- rendezetlen.

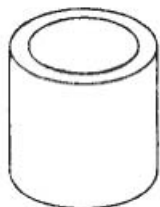
A két előbbi töltelék kialakítás kombinálható az ún. szabályosan rakott rendezetlen töltetekkel. A torony konstrukciója általában hengeres kialakítású, töltettartó rács és folyadékelosztó egységekből áll.

### Rendezetlen töltetek

A töltelékek kezdetben szabálytalan őrölt ércdarabok, tört kokszdarabok halmaza alkotta. Későbbiekben alkalmaztak kerámiagolyókat, majd Rashig alkalmazott először kerámiagyűrűket. Az ilyen típusú töltéktest készülhet fémből és műanyagból is. Az egyszerű gyűrűs töltéktestekből számos változatot fejlesztettek ki. Általában három fő típusba sorolhatóak: gömb, nyereg és gyűrű alakú testek.

Mindegyik típusnak megvan a jellemző előnye a folyadék-gáz érintkeztetés szempontjából a költség, a rendelkezésre álló felület, a folyadékkialakítás, a nyomásveszteség, a súly és a korróziós ellenállás terén.

## Néhány jellemző típus



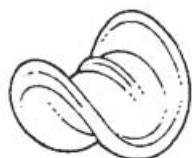
Raschig gyűrű



Pall gyűrű (fém)



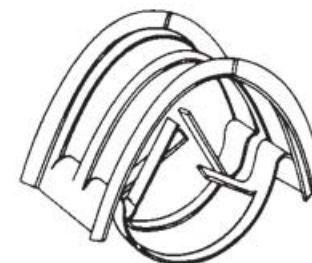
Pall gyűrű (műanyag)



Intalox-nyereg



Super Intalox nyereg



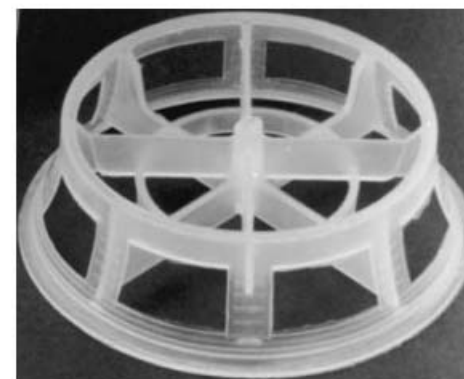
Intalox-nyereg (fém)



Nutter-gyűrű



Rashig super gyűrű



Cascade mini-gyűrű

A mai modern rendezetlen töltetek (random packing) meglehetősen bonyolult felületekkel rendelkeznek annak érdekében, hogy minél intenzívebb és minél nagyobb felületen menjen végbe az anyagátadás. Az egyik jelentős gyártó (Sulzer) új fejlesztésű, hatékony töltetei az alábbi ábrán látható:



Nutter-ring



I-ring



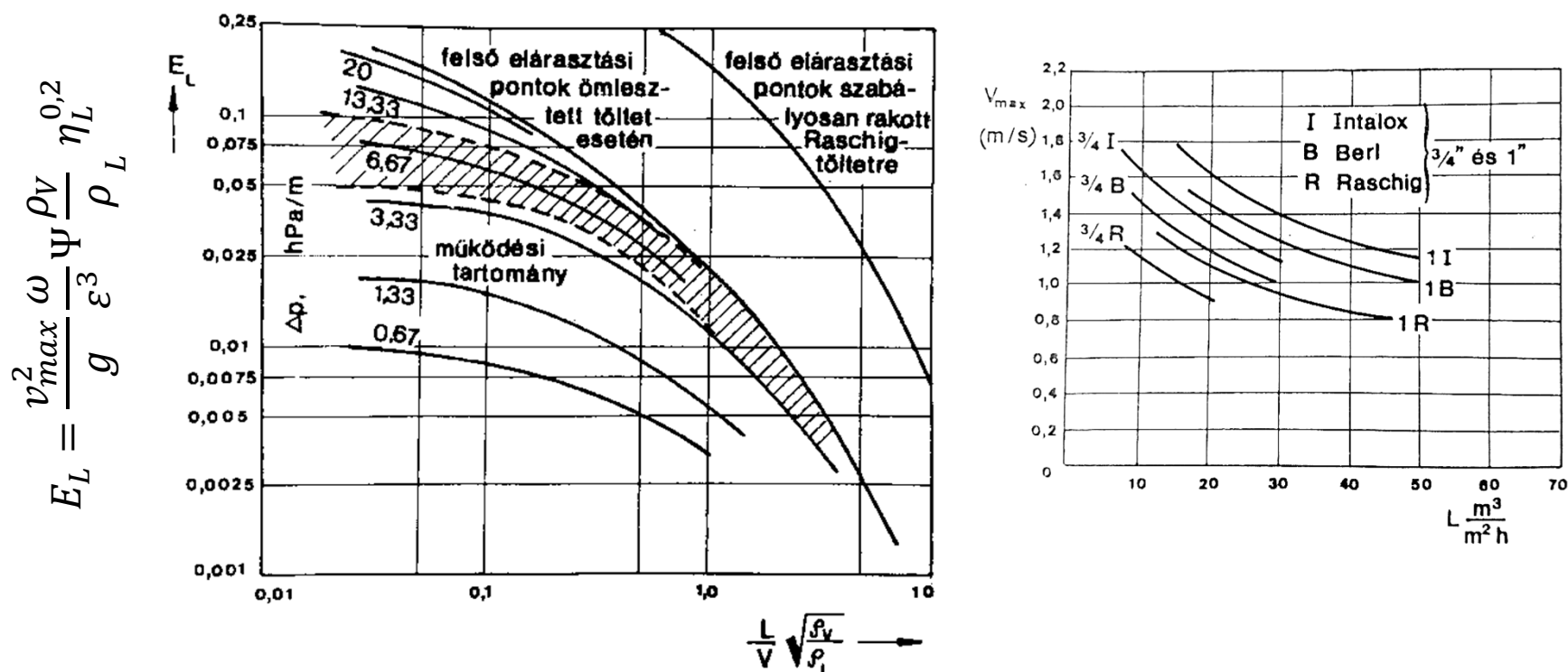
C-ring



P-ring

## Működési tartomány

Többen próbálkoztak a nyomásveszteség és a gázáramlás összefüggésének általánosításával mindenféle töltetre vonatkozóan azonban az általánosítás nem alkalmas az áramlás teljes tartományára, mert a folyadék hold-up hatása az áramlási keresztmetszetekre különböző töltetek esetén más és más. 1938-ban Scherwood és munkatársai, majd 1945ben Lobo és Zenz sokféle töltettel, különböző folyadékokkal és gázokkal végzett összehasonlító vizsgálatokat és szerkesztettek egy „általános” diagramot a terhelési állapotokra.



### ▣ Kolonnaátmérő meghatározása

A rektifikáló oszlop átmérőjét általában a következő összefüggéssel határozhatjuk meg:

$$d = \sqrt{\frac{4}{\pi} \Re \frac{T}{p} \frac{1}{w} \dot{D}} \qquad d = 3,25 \sqrt{\frac{T}{p} \frac{1}{w} \dot{D}}$$

Ahol  $\dot{D}$  a maximális gőzáram a vizsgált oszloprészben (mol/s) ;  
T üzemi hőmérséklet;  
p üzemi nyomás, Pa  
w megengedett (szabad oszlopkm.-re vonatkoztatva) gőzsebesség, m/s

### ▣ Megengedett gőzsebesség meghatározása (gőz- gázterhelés)

A legrégebbi publikált összefüggés *Souders* és *Brown*-tól származik:

$$w = B \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G}} \qquad B: \text{Brown állandó (m/s)}$$

Bevezetve a gázterhelésre vonatkozó F-faktort:  $F = w \sqrt{\rho_G}$   
A nettó áramlási keresztmetszetre vonatkoztatva:  $F_n = w_n \sqrt{\rho_G}$

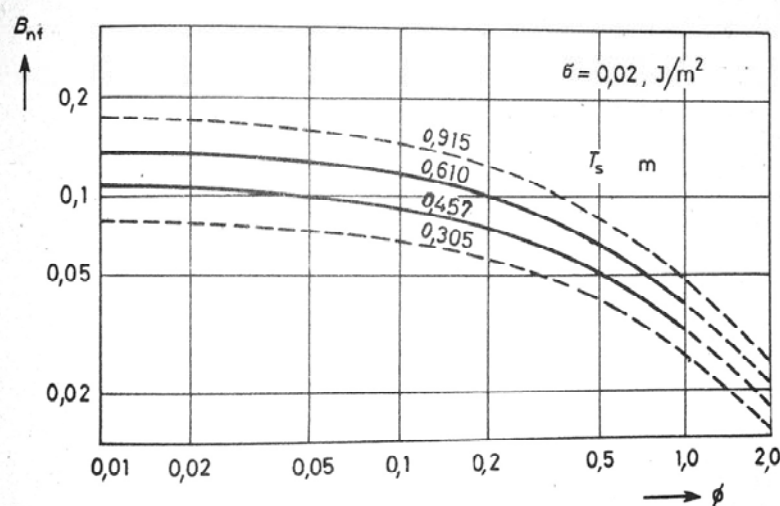
Elárasztási sebesség (flooding) diagram alapján:

$$w_{nf} = B_{nf} \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G}}$$



## Oszlopszerkezetek – Vegyipari Műveletek 3 kurzushoz

Fair-terhelhetőségi diagram buboréksapkás tányéros oszlopra:



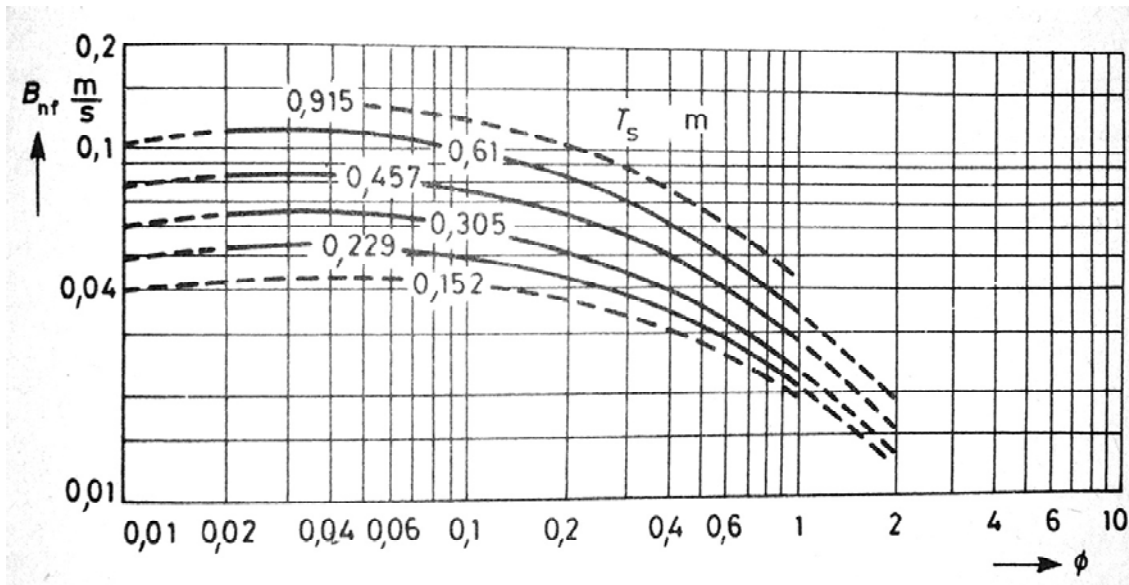
Más felületi feszültség esetén:

$$B = B_{diagr} \left( \frac{\sigma}{0,02} \right)^{0,2}$$

$T_s$  : tányértávolság

$$\phi = \frac{L_m}{G_m} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} = \frac{L_v}{G_v} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}}$$

Fair-terhelhetőségi diagram szitatányéros oszlopra:





Stichlmair-féle összefüggés a Brown-állandóra:

$$B = 2,5 \left( \varphi^2 \frac{\sigma g}{\rho_L - \rho_G} \right)^{0,25}$$

A maximálisan megengedhető gázsebesség az elárasztási sebességből:

$$w_{nmax} = 0,8w_{nf}$$

### ▣ Legnagyobb folyadékterhelés meghatározása

Nagy folyadékterhelés következtében az aknában (lefolycső) a gőz nem tud távozni, az akna megtelik a gáz-folyadék eleggyel!

A legnagyobb folyadékterhelés gyakorlati szempontból:

- a gátterhelés, azaz az  $L_v/l_w$  érték 60 m<sup>3</sup>/(mh) alatt kell tartani ( $l_w$ : gáthossz, kb. 0,7 D)
- a sebesség az aknában ne lépje túl a 0,1 m/s értéket
- a tartózkodási idő (ha az akna teljesen folyadékkal van tele) nagyobb legyen, mint 5 s
- a tiszta folyadék réteg magassága ne lépje túl a lefolyó felét

### ▣ Legkisebb folyadékterhelés meghatározása

Szintén gyakorlati megfontolások alapján:

a gátterhelés, azaz az  $L_v/l_w$  érték legyen nagyobb, mint 2 m<sup>3</sup>/(mh)

### ▣ Tányérok nyomásvesztése

Ha gáz áramlik egy bizonyos folyadékréteggel rendelkező tányéron, akkor a nyomásvesztés:

$$\Delta p = \Delta p_t + h_L \rho_L g$$

Ahol a száraz tányér nyomásvesztése:

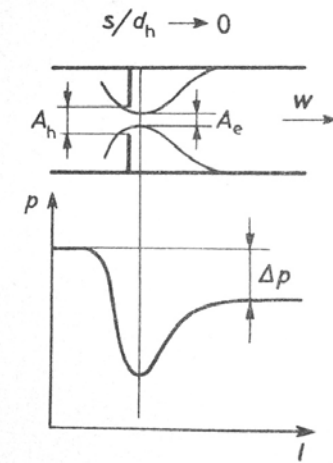
$$\Delta p_t = \zeta \frac{F_h^2}{2}$$

F<sub>h</sub>: az ún. F-faktor a lyukra vonatkoztatva. Az ellenállástényező:

$$\zeta = \left( \frac{1}{\alpha} - \varphi \right)^2 \quad \alpha = \frac{w_h}{w_e}$$

$\alpha$  kontrakciós tényező, elméleti értéke: 0,61.

$$\varphi = \frac{w}{w_h}$$



A gőz folyadék határon fellépő nyomásvesztés:

$$\Delta p_{hatar} = \sigma \frac{NY_K}{NY_F}$$

Túlfolyós tányér esetében figyelembe kell venni a gátmagasságot valamint a folyadékgradienst így a teljes nyomásvesztés:

$$\Delta p = \Delta p_t + \Delta p_{hatar} + p_{folyadekoszlop}$$

Működési feltétel:

$$2 \frac{\Delta p}{\rho_g g} \leq H_{talcatav}$$

- ▣ Elárasztási sebesség számítása töltött oszlop esetén

Iterációval határozható meg:

$$\lg \left( \frac{w^2 a_p}{g \epsilon^3} \frac{\rho_G}{\rho_L} \mu^{0,16} \right) = -A - 1,75 \left( \frac{L}{V} \right)^{0,25} \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0,125}$$

A=0,073 abszorpció esetén, A=0,125 rektifikálás esetén

Köszönöm a figyelmet, egyelőre ennyi😊

# Abszorpció

Vegyipari műveletek 3 kurzushoz

Összeállította:  
Dr. Szepesi L. Gábor  
egyetemi docens

### Abszorpció

A gázabszorpció az a művelet, amikor a gázelegyet folyadékkal érintkeztetjük abból a célból, hogy a gáz egy vagy több komponensét kioldjuk, és a folyadékban ezek oldatát hozzuk létre.

Ezekben a műveletekben anyagátadásra van szükség a gázáramból a folyadékba. Ha a folyamat az ellenkező irányban megy végbe, azaz a folyadékból a gázba, akkor deszorpciónak vagy kihajtásnak (sztrippelésnek) hívjuk.

Mivel a két folyamat lényegileg teljesen megegyezik, így e két műveletet egyszerre tanulmányozhatjuk.

Abszorpcióra használt berendezés az abszorber.

### Típusai

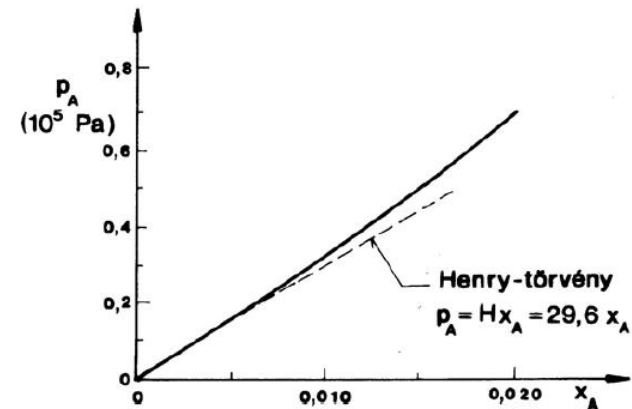
**Fizikai abszorpció**, amikor az elválasztandó gázkomponens oldódik az abszorbensben, és a komponens oldódását a gáz- és folyadékfázis közt beálló egyensúlyi viszonyok szabják meg. Az egyensúly beálltakor a kérdéses komponens gázfázisban mért parciális nyomása és a folyadékfázisban lévő koncentrációja közti összefüggést a Henry-törvény írja le.

$$p_A = H \cdot x_A \rightarrow y_A = H' \cdot x_A$$

ahol  $p_A$  az A komponens parciális nyomása (Pa),  $x_A$  az A komponens móltörtje,  $m$  pedig a Henry állandó.

**Kemisorpció**, amikor a gáz abszorpcióját a folyadékfázisban kémiai reakció követi, és az abszorpció ezért nem tekinthető egyensúlyi folyamatnak.

Abszorpció alatt általában az egyensúlyra vezető, más néven fizikai abszorpciót értjük, ezzel fogunk foglalkozni.



### Gáz-folyadék egyensúlyok

- a gáz- és folyadékfázis közti egyensúly kialakulását a nyomás, a hőmérséklet és az összetétel befolyásolja
- az egyensúly kialakulását a Gibbs-féle fázisszabály szabja meg

$$Sz + F = K + 2$$

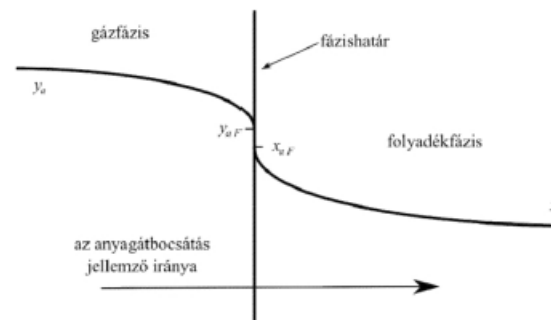
ahol  $Sz$  a szabadsági fokok száma,  $F$  a fázisok száma,  $K$  a komponensek száma.

- pl. kén-dioxid eltávolítása levegőből, víz abszorbenssel:
  - fázisok száma: 2 (gáz+folyadék)
  - komponensek száma: 3 (víz, kén-dioxid, levegő)
  - szabadsági fok: 3
  - a nyomás és hőmérséklet megválasztása esetén 1 marad
  - ha adott a kén-dioxid összetétele a folyadékfázisban ( $x_A$ ), a gőzfázisban lévő koncentráció meghatározott
  - gőzfázisban  $y_A$  móltörttel vagy  $p_A$  parciális nyomással jellemezhetjük
- Henry-törvény ezt az összefüggést írja le ( $p_a = H \cdot x_A$ )
- $H$  a Henry-állandó [ $\text{N/m}^2$ ]
- korlátai: csak rosszul oldódó gázokra, vagyis kis folyadékkoncentrációk tartományában érvényes
- a hőmérséklet csökkentésével az oldódás mértéke növelhető!



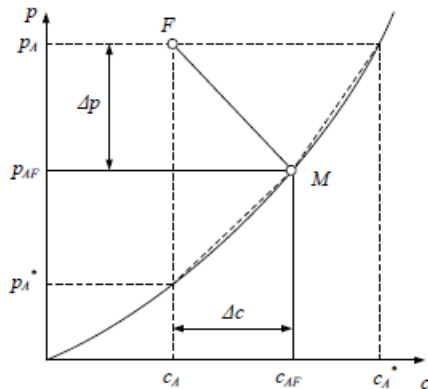
### Az abszorpció mechanizmusa

- anyagátadási folyamat ← gáz és folyadék érintkezik, a gázfázisból egy vagy több komponens a folyadékfázisba kerül
- összetett folyamat: anyagtranszport a gázfázisban, átlépés a határfelületen, anyagtranszport a folyadékfázisban
- a koncentrációgörbe törését a két fázis határán az eltérő koncentrációegységek használata okozza
- hatékonyságnövelés eszközei: anyagátbocsátási felület, fázishatár felület növelése (tányéros oszlop, töltelékes oszlop)



- **Feltételezés: a határfelületen nincs ellenállás!**

## Kialakuló anyagáramok



$$\dot{n}_A = k_G \cdot (p_A - p_{AF})$$

$$\dot{n}_A = k_L \cdot (c_{AF} - c_A)$$

$$\dot{n} = K_G \cdot (p_A - p_A^*)$$

Ahol:

- $k_G$ : gázfázis anyagátadási együtthatója  $\left[ \frac{\text{mol}}{\text{m}^2\text{s}} \right]$
- $k_L$ : a folyadékfázis anyagátadási együtthatója  $\left[ \frac{\text{mol}}{\text{m}^2\text{s}} \right]$
- $K_G$ : gázfázisra vonatkoztatott egyesített anyagátbocsátási tényező  $\left[ \frac{\text{mol}}{\text{m}^2\text{s}} \right]$

- helyettesítsük egyenessel az egyensúlyi görbét:

$$p_A - p_A^* = p_A - p_{AF} + m \cdot (c_{AF} - c_A)$$

ahol  $m$  az egyenes iránytangense (Henry-állandóból)

- rendezzük át az egyenleteket:

$$p_A - p_{AF} = \frac{k_L}{k_G} \cdot (c_{AF} - c_A)$$

$$K_G \cdot \left[ \frac{k_L}{k_G} \cdot (c_{AF} - c_A) + m \cdot (c_{AF} - c_A) \right] = k_L \cdot (c_{AF} - c_A)$$

- kifejezve az anyagátbocsátási tényezőt:

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{m'}{k_L}$$

- levezetés a folyadékoldalra:

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{k_l} + \frac{1}{m'' \cdot k_G}$$

- az anyagátviteli tényezők meghatározása a hőátviteli tényezők meghatározási módjával teljesen analóg:

$$Re_g = \frac{V_g \cdot 4 \cdot \varepsilon}{A_Q \cdot a \cdot \nu_g}$$

$$Sc_g = \frac{\nu_g}{D_g}$$

$$Sh_g = 0,407 \cdot Re_g^{0,655} \cdot Sc_g^{0,3}$$

$$k_G^* = \frac{Sh_g \cdot D_g \cdot a}{4 \cdot \varepsilon}$$

$$k_G = k_G^* \cdot \frac{\rho_g}{M_g}$$

$$Re_l = \frac{m_l \cdot d_p}{A_Q \cdot \rho_l \cdot \nu_g}$$

$$Sc_l = \frac{\nu_l}{D_l}$$

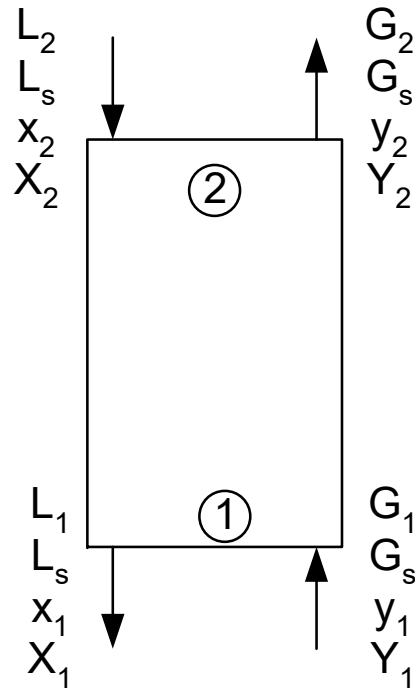
$$Ga_l = \frac{d_p^3 \cdot g}{\nu_l^2}$$

$$Sh_l = 0,32 \cdot Re_l^{0,59} \cdot Sc_l^{0,5} \cdot Ga_l^{0,17}$$

$$k_L^* = \frac{Sh_l \cdot D_l}{d_p} \rightarrow k_L = k_G^* \cdot \frac{\rho_l}{M_l}$$

# Abszorpció – Vegyipari Műveletek 3 kurzushoz

## Ellenáramú abszorber



Vezessük be az alábbi jelöléseket:

$$X = \frac{x}{1-x} \quad \text{abszorbeált / oldószer}$$

$$Y = \frac{y}{1-y} \quad \text{abszorbeálandó / iners}$$

$$G_S = G(1-y) \quad L_S = L(1-x)$$

$$G_S = G \frac{1}{1+Y} \quad L_S = L \frac{1}{1+X}$$

$G_1$ : belépő gázmennyiség;  
anyagmennyiség

$G_S$ : inert

$L_2$ : belépő folyadékmennyiség;  
mennyiség

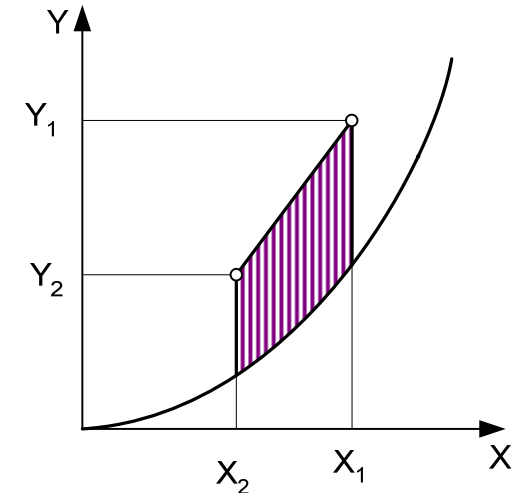
$L_S$ : tiszta oldószer

Anyagmérleg:  $G_S (Y_1 - Y_2) = L_S (X_1 - X_2)$

Az oszlop egy tetszőleges pontjában:  $G_S (Y_1 - Y) = L_S (X_1 - X)$

Fajlagos locsolás:  $l = \frac{L_S}{G_S} = \frac{Y_1 - Y_2}{X_1 - X_2}$

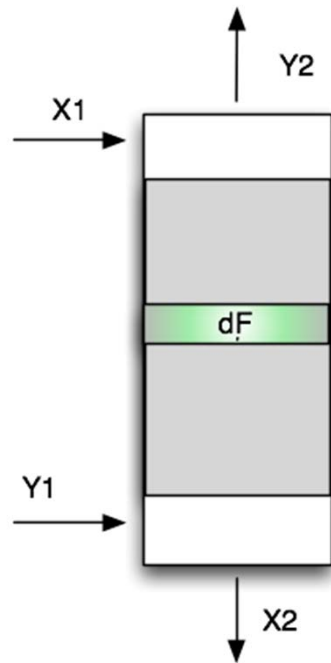
Abszorpciós faktor:  $A = \frac{l}{m}$



$A > 1$  esetén megvalósítható. Mi történik  $A < 1$  esetén???

### ■ Töltelékes abszorber méretezése

Műveleti szempontból azt a felületet kell meghatározni, ahol az anyagátadás végbemegy. Tekintsük az alábbi töltelékes oszlopot:



Elemi felületen átadott anyag mennyisége:

$$dG_A = K_G (Y - Y^*) dF$$

A gázfázisból kikerült anyag mennyisége:

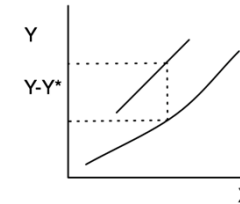
$$dG_A = -G_S dY$$

Átrendezve a fenti két egyenletet:

$$-\frac{dY}{Y - Y^*} = \frac{K_G dF}{G_S}$$

Elvégezve az integrálást kapjuk a szükséges felületet:

$$\int_{Y_2}^{Y_1} \frac{dY}{Y - Y^*} = \frac{K_G F}{G_S} \quad \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{dY}{Y - Y^*} = NTU$$



NTU: átviteli  
egységyszám,  
gázfázisra  
vonatkoztatva

Teljes oszlopra felírt anyagmérleg:  $G_A = G_S (Y_1 - Y_2)$        $G_S = \frac{G_A}{(Y_1 - Y_2)}$

Az abszorpció során átadott anyagmennyiség:  $G_A = K_G F \frac{Y_1 - Y_2}{NTU}$

### □ Töltelékes abszorber méretezésének lépései:

1. Anyagmérleg, minimális locsolás meghatározása
2. Átviteli egységyszám meghatározása (NTU)
3. Közepes hajtóerő meghatározása

$$\Delta k = \frac{Y_1 - Y_2}{NTU}$$

4. Kétfilmelméletből ismert egyesített anyagátadási tényező meghatározása ( $K_G$ )
5. Anyagátbocsátáshoz szükséges felület meghatározása (F)

$$F = \frac{G}{K_G \Delta k}$$

6. Töltelékkel kitöltendő térfogat:

$$V_t = \frac{F}{\varphi_{ap}} \quad \varphi_{ap} \text{ nedvesített fajl. felület}$$

7. Oszlop km meghatározása

$$\Omega = \frac{\dot{V}}{w}$$

8. Oszlop magasság meghatározása

$$H_t = \frac{V_t}{\Omega}$$

### ▣ Elárasztási sebesség számítása

Iterációval határozható meg:

$$\lg \left( \frac{w^2 a_p}{g \epsilon^3} \frac{\rho_G}{\rho_L} \mu^{0,16} \right) = -A - 1,75 \left( \frac{L}{V} \right)^{0,25} \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0,125}$$

A=0,073 abszorpció esetén, A=0,125 rektifikálás esetén

### ▣ Peremjárás

A lecsurgó folyadék a perem irányába mozdul el, így nagyon hosszú töltelékoszlop esetén száraz rész fog kialakulni. Ez elkerülendő! Folyadék újraelosztó beépítése szükséges!

### □ Ellenáramú elegyszétválasztás kinetikus elmélete

Ha oszlopbetétek alkotják a fázis-határfelületet növelő elemeket, vagy permetező oszlopokat használnak, akkor az anyag- és hőcserében részt vevő fázisok a teljes oszlopmagasság mentén érintkeznek egymással. Ebben az esetben az elválasztó fokozatok elmélete helyett (amely csak a fokozaton belüli fázisérintkezést enged meg) az ellenáramú elválasztásnak a kinetikus elméletét alkalmazzuk.

Tegyük fel, hogy az oszlop mentén a folyadék és gázáramok konstansak. Az oszlop egy  $dz$  magasságában kicserélt anyag:

$$dN = \dot{G}dy = \dot{L}dx$$

Valamint korábbról:

$$dN = k_G (y - y^*) dA$$

$$dA = aA_q dz \eta$$

Az elemi felület az alábbi összefüggéssel számolható:

$$\dot{G}dy = k_G (y - y^*) \eta a A_q dz$$

Majd kifejezve  $dz$ -t és integrálva:

$$Z = \underbrace{\frac{\dot{G}}{k_G \eta a A_q}}_{\text{HTU}} \underbrace{\int \frac{dy}{y - y^*}}_{\text{NTU}}$$

NTU: átviteli egységek száma; HTU: átviteli egységmagasság



### □ HTU meghatározása

Kellő mennyiségű mérési adat birtokában a HTU értéke meghatározható hasonlósági kritériumok segítségével.

$$HTU = H_G + \frac{H_L}{A}$$

A: abszorpciós faktor

$$H_L = a \left( \frac{L}{\eta} \right) Sc^b$$

$$H_G = \frac{cG^d}{L^e} Sc^f$$

$$Sc = \frac{\nu}{D}$$

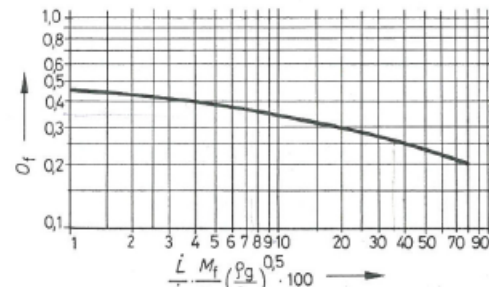
### Elárasztási sebesség

A  $w_t$  elárasztási terhelés az oszlop szabad keresztmetszetére vonatkoztatott azon gázsebesség, amelynek elérésekor éppen megkezdődik a reflux, a folyadékfázis torlódása. Összefüggése:

$$w_t = 3,14 \cdot \frac{O_f}{\sqrt{\frac{a}{\varepsilon} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_l} \cdot \eta_l^{0,12} \frac{\rho_w}{\rho_l}}}$$

ahol  $a$  a fajlagos felület [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ],  $\varepsilon$  pedig a relatív szabad hézagterfogat [%]. Az összefüggésben szereplő  $O_f$  értéket a következő összefüggés függvényében határozható meg:

$$A_f = \frac{L_2}{G_1} \cdot \frac{M_l}{M_g} \cdot \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0,5} \cdot 100$$



Az elárasztási sebesség függvényében határozható meg a maximális gázsebesség:

$$w_0 = (0,7 \dots 0,8) \cdot w_{el}$$

A gázsebesség függvényében pedig az oszlop átmérője:

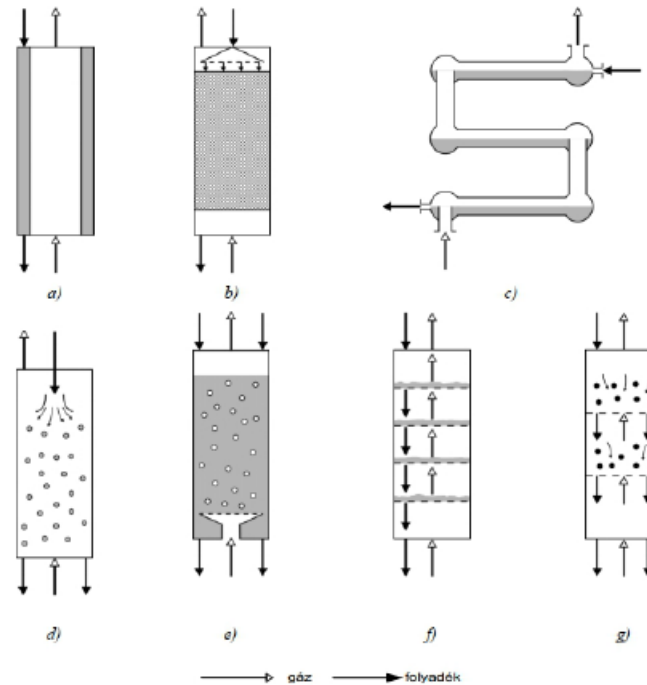
$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot G_1}{w_0 \cdot \pi}}$$

### Fontosabb tölteléktest típusok

Tölteléktest típus	Anyag	Méret mm	Halmazsűrűség kg/m <sup>3</sup>	Darabszám m <sup>3</sup> -enként 1000/m <sup>3</sup>	Fajlagos felület <i>a</i> , m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	Hézagterfogat $\epsilon$ , %	
Raschig	Kőagyag	15x15x2	700	210	330	70	
		25x25x3	620	46	195	73	
		50x50x5	520	6,4	98	78	
	Acél	100x100x10	450	0,75	44	81	
		15x15x0,5	660	230	350	92	
		V2A	25x25x0,8	640	51	220	93
		V4A	50x50x1,0	430	6,5	110	95
			100x100x1,5	300	0,75	48	96
Pall	Kőagyag	25x25x3	620	46	220	73	
		50x50x5	550	6,3	120	78	
	Fém	15x15x0,4	510	220	360	93	
		25x25x0,8	460	52	215	94	
		50x50x0,8	320	6,3	105	96	
	Műanyag	15x15x1,0	120	215	350	88	
		25x25x1,3	85	52	220	90	
		50,50,1,5	72	6,4	110	92	

## Abszorberek

A gyakorlatban igen sokféle abszorbert használnak, melynek oka az abszorpció sokfélesége. Az abszorberek alkalmazása sokrétű, különböző jellegű feladatokra mindig más és más abszorber a legmegfelelőbb.



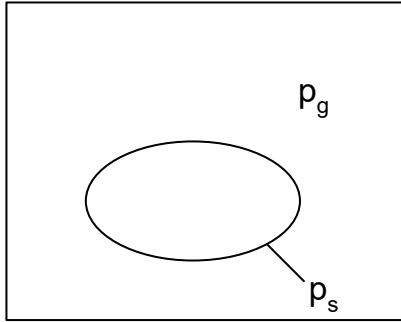
Köszönöm a figyelmet, egyelőre ennyi😊

# Szárítás

Vegyipari műveletek 3 kurzushoz

Összeállította:  
Dr. Szepesi L. Gábor  
egyetemi docens

### □ Szárítás elméleti alapjai



$p_g$ : a nedvesítő folyadék gőzének parciális nyomása a felület mentén

$p_s$ : a nedvesítő folyadék gőzének nyomása a szárító közegben

A szárító közeg általában a levegő. Levegő jellemzése: ideális gáztörvénnyel!

$p_g > p_s$  : szárítás     $p_s > p_g$  : nedvesítés

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad p \cdot \frac{V}{m} = \frac{R \cdot T}{M} \Rightarrow \frac{1}{\rho} = \frac{R \cdot T}{p \cdot M} \Rightarrow \rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}$$

A levegő nyomása:

**Relatív nedvességtartalom:**

$$\varphi = \frac{\rho_g}{\rho_{gt}} = \frac{p_g \cdot M_{\text{víz}}}{R \cdot T} \cdot \frac{R \cdot T}{p_{gt} \cdot M_{\text{víz}}} = \frac{p_g}{p_{gt}}$$

**Abszolút nedvességtartalom: (1 kg száraz levegőben lévő nedvesség kg-ban)**

$(1+x) = 1$  kg száraz levegő +  $x$  kg nedves levegő

$$x = \frac{\rho_g}{\rho_1} = \frac{p_g \cdot M_{\text{víz}}}{R \cdot T} \cdot \frac{R \cdot T}{p_1 \cdot M_1} = \frac{M_{\text{víz}}}{M_{\text{lev}}} \frac{p_g}{p_1} = \frac{18}{29} \frac{p_g}{p - p_g} = 0,622 \frac{p_g}{p - p_g}$$

**Nedves levegő hőtartalma** (1 kg száraz levegőre és x kg nedves levegőre vonatkozik)

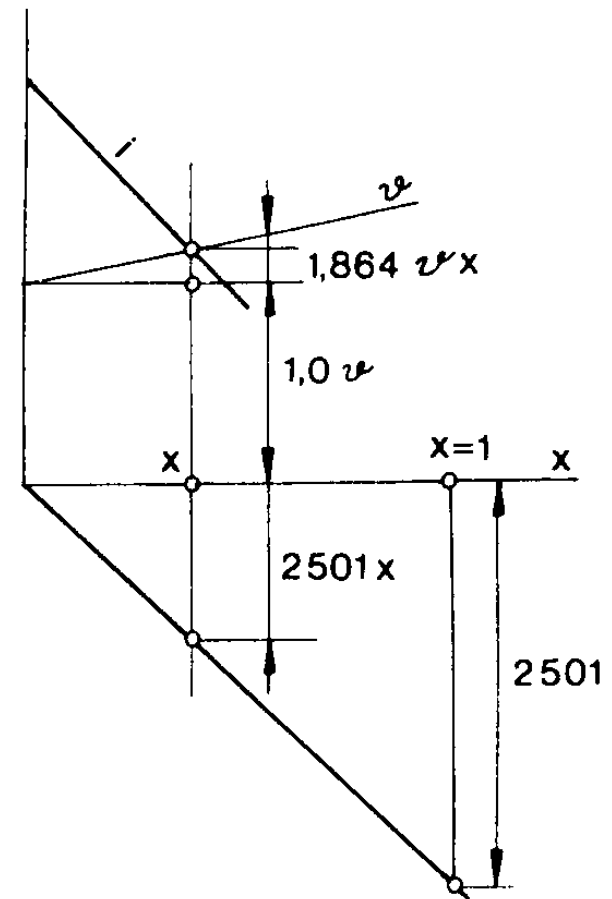
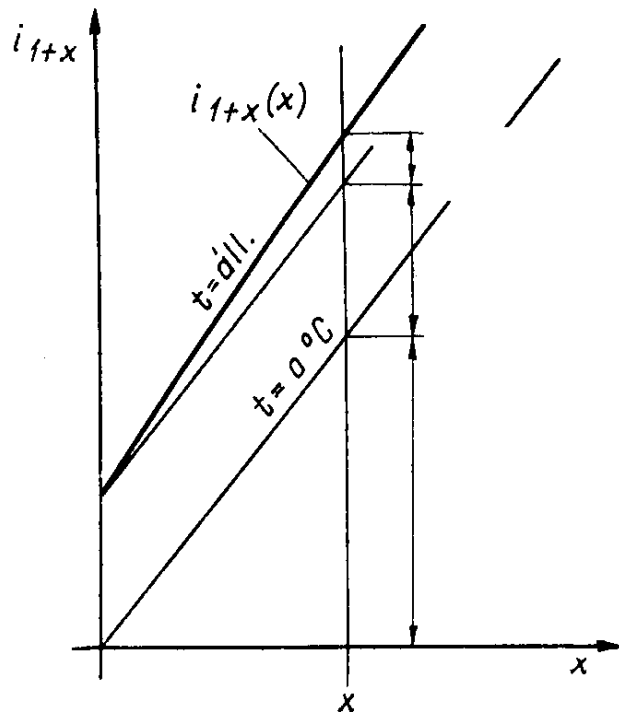
Megállapodás:

$$i = c_1 \cdot t + x \cdot (r_0 + c_g \cdot t) = (c_1 + x \cdot c_g) \cdot t + r_0 \cdot x$$

$$c_1 = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}; \quad r_0 = 2501 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}; \quad c_g = 1,864 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

**Izoterma egyenlete:**

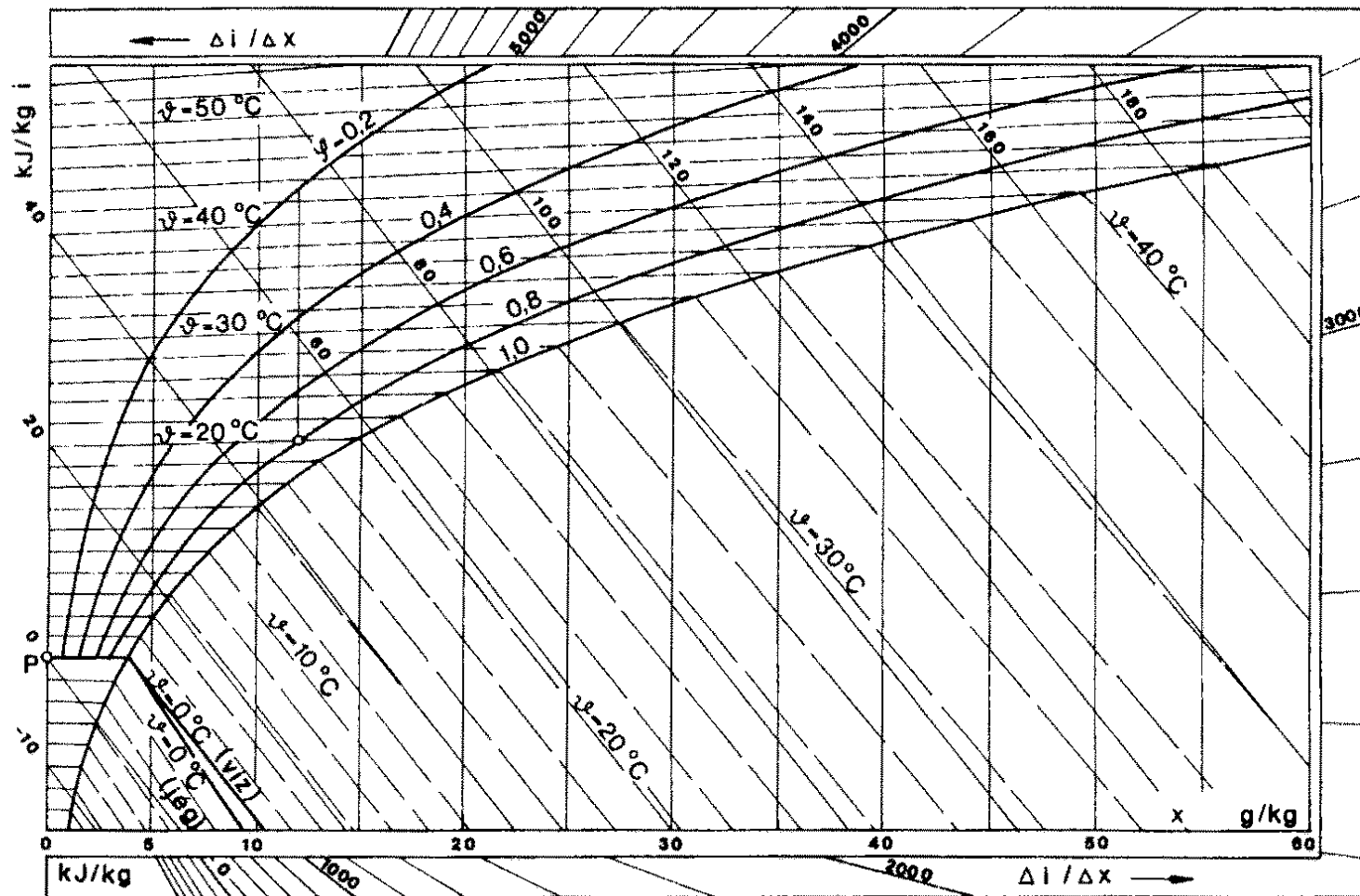
$$\left( \frac{\partial i}{\partial x} \right)_{t=\text{áll}} = c_g \cdot t + r_0$$





## Szárítás – Vegyipari Műveletek 3 kurzushoz

### Mollier, Ramzin stb. i-x diagram



Kétfázisú területen:

$t > 0$  pára kicsapódás, harmat

$t < 0$  jég képződés, zuzmara

### Nedves anyag jellemzése

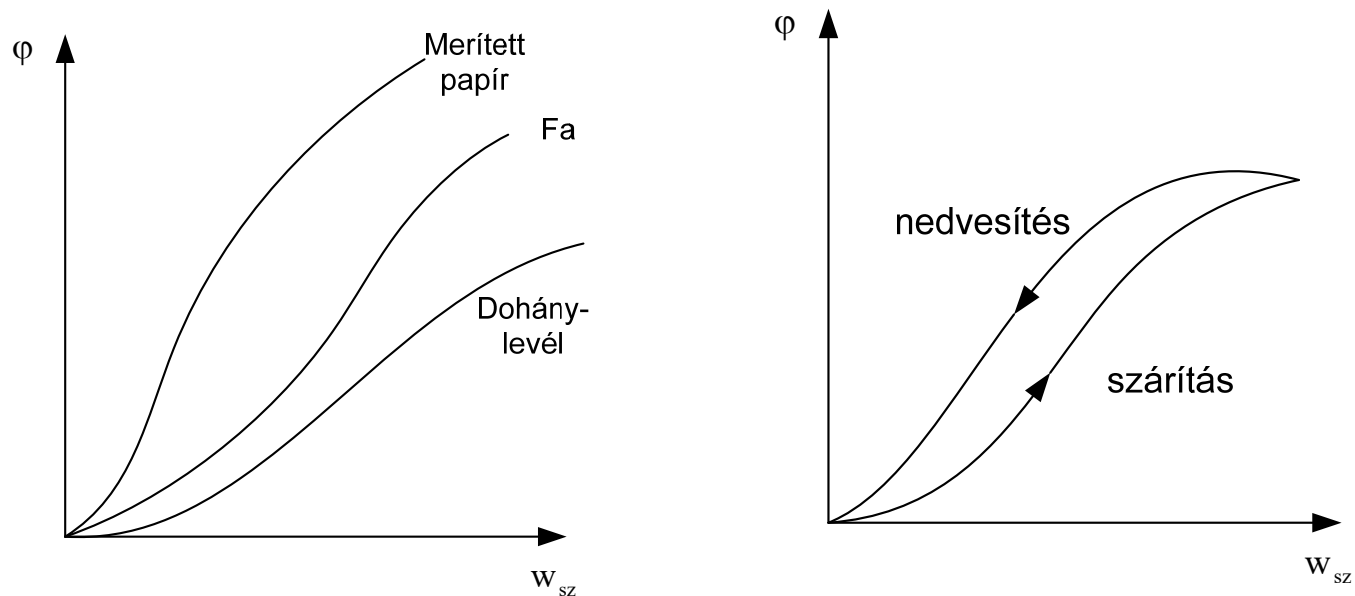
Nedves anyagra vonatkozó nedvességtartalom:

$$W = \frac{m_n}{m_n + m_{sz}}$$

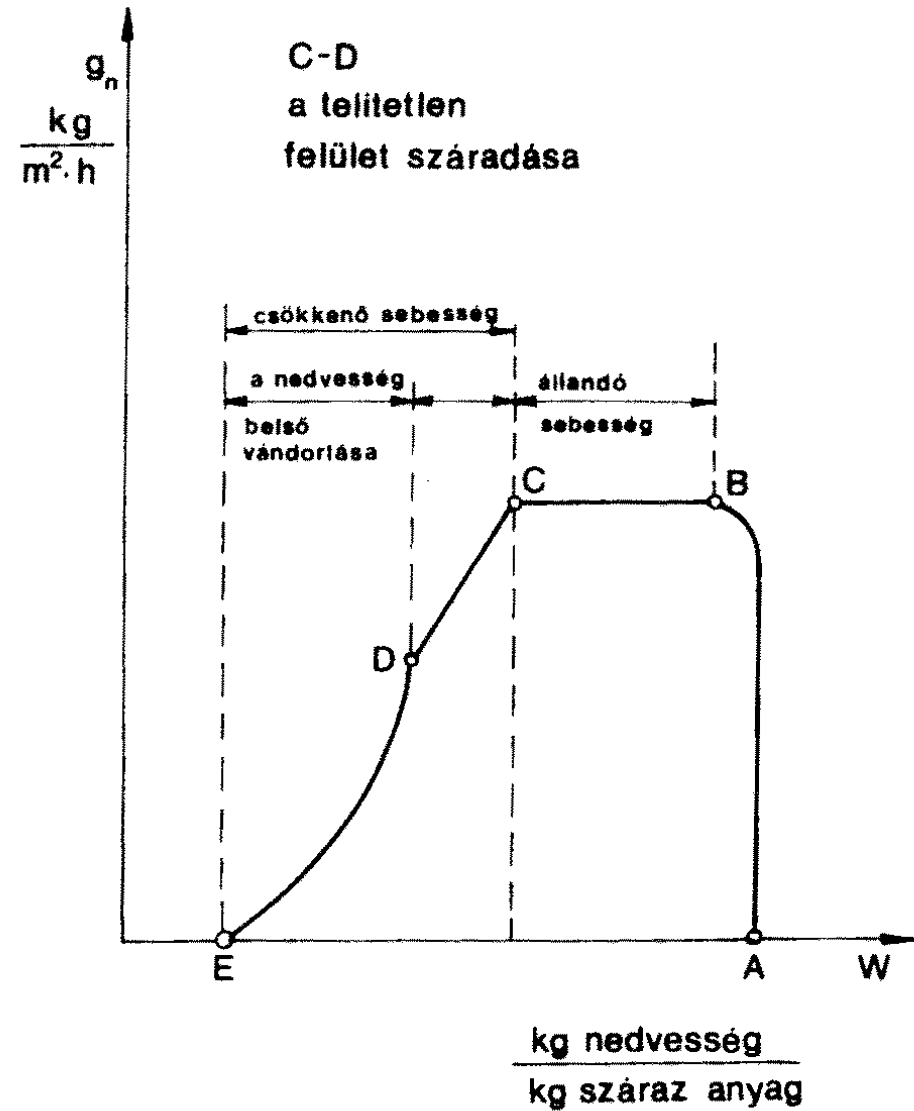
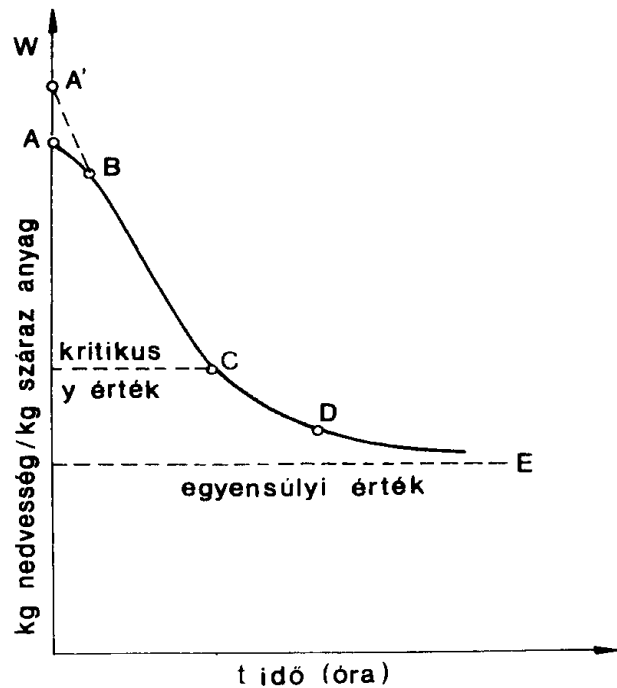
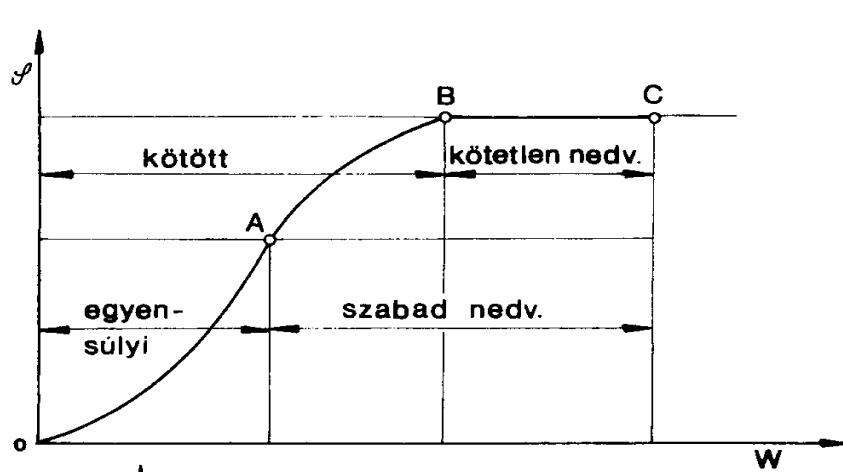
Száraz anyagra vonatkozó nedvességtartalom:

$$W_{sz} = \frac{m_n}{m_{sz}}$$

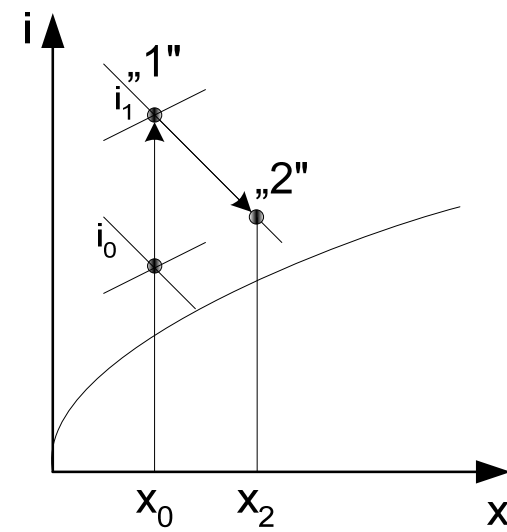
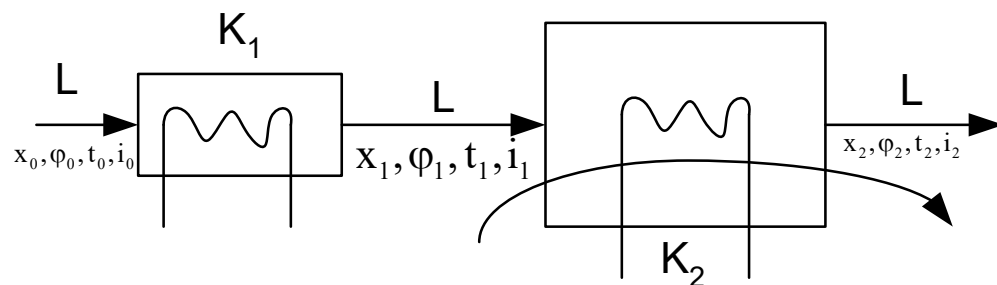
### Egyensúly a nedves anyag és a szárító közeg között



Száraz anyagban lévő nedvesség felosztása, száradási sebesség



Elméleti szárító



Anyagmérleg:

$$L \cdot x_0 + \text{víz} = L \cdot x_2$$

$$\text{víz} = L \cdot (x_2 - x_0)$$

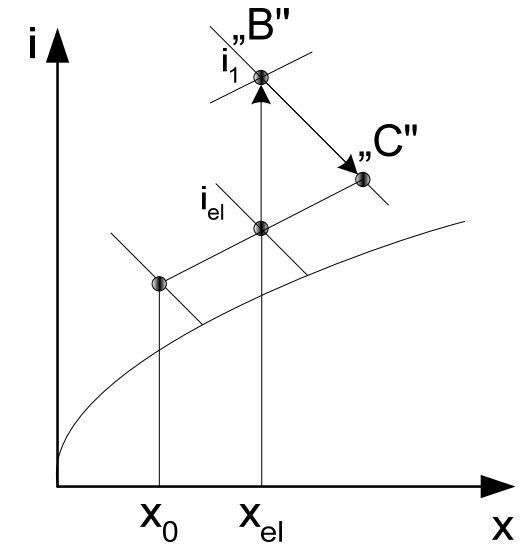
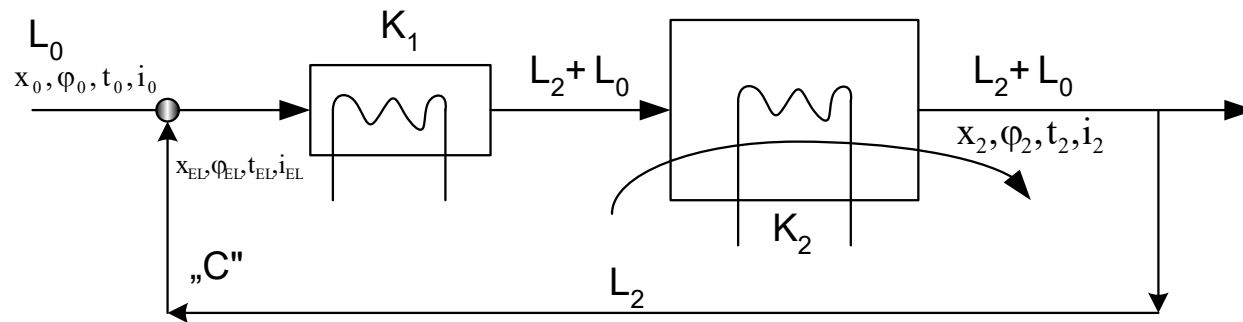
$$1 = \frac{L}{\text{víz}} = \frac{1}{x_2 - x_0}$$

Energiaszükséglet:

$$Q = L \cdot (i_2 - i_0) = 1 \cdot \text{víz} \cdot (i_2 - i_0)$$

$$\frac{Q}{\text{víz}} = q = 1 \cdot (i_2 - i_0) = \frac{i_2 - i_0}{x_2 - x_0}$$

Cirkulációs szárító



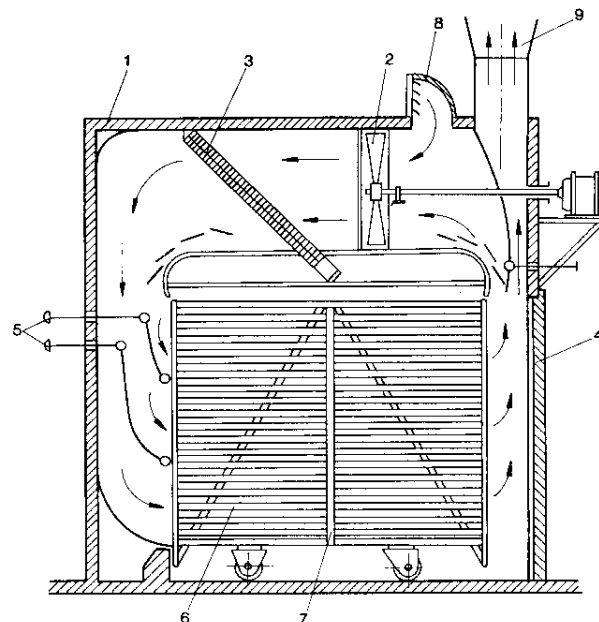
Anyagmérleg:

$$L \cdot x_0 + L_2 \cdot x_2 = L_{el} \cdot x_{el}$$

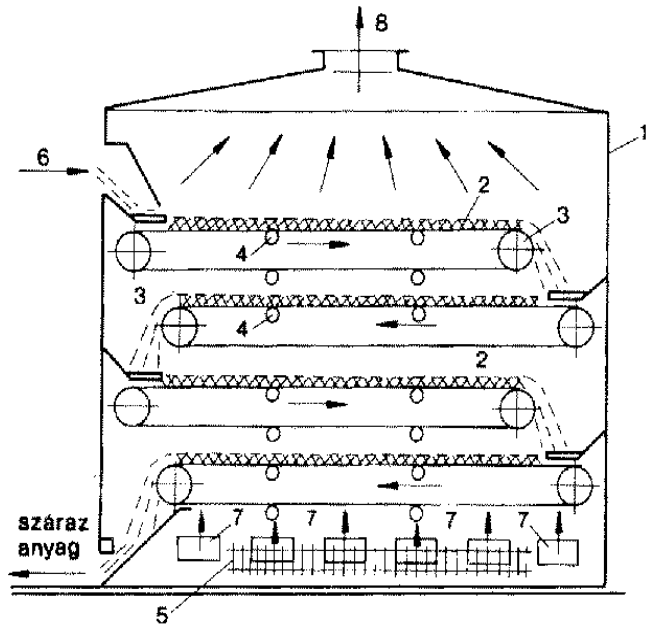
$$x_{el} = \frac{L_0 x_0 - L_2 x_2}{L_0 + L_2}$$

$$i_{el} = \frac{L_0 i_0 - L_2 i_2}{L_0 + L_2}$$

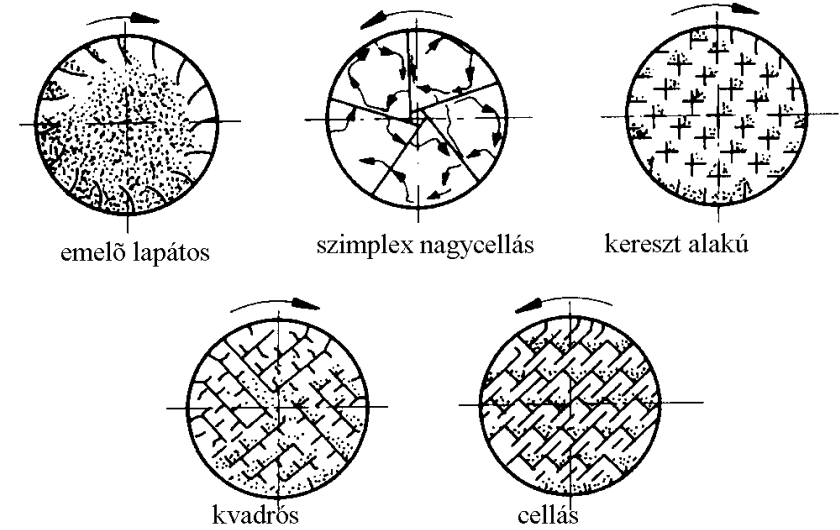
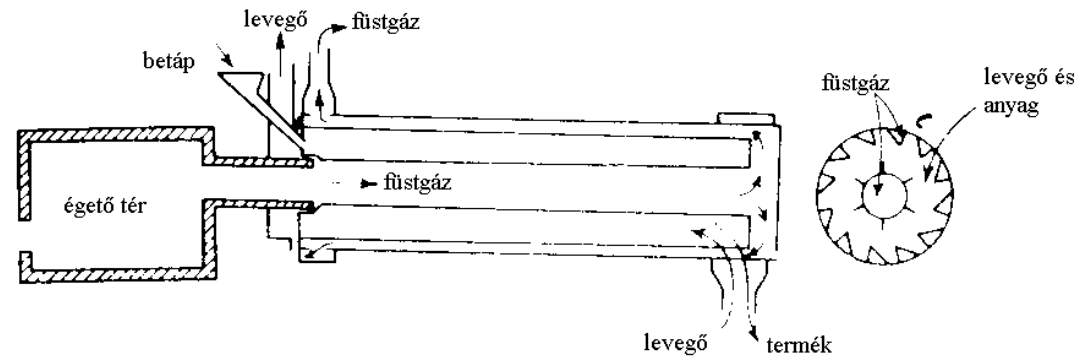
Cirkulációs arány =  $\frac{L_2}{L_0}$



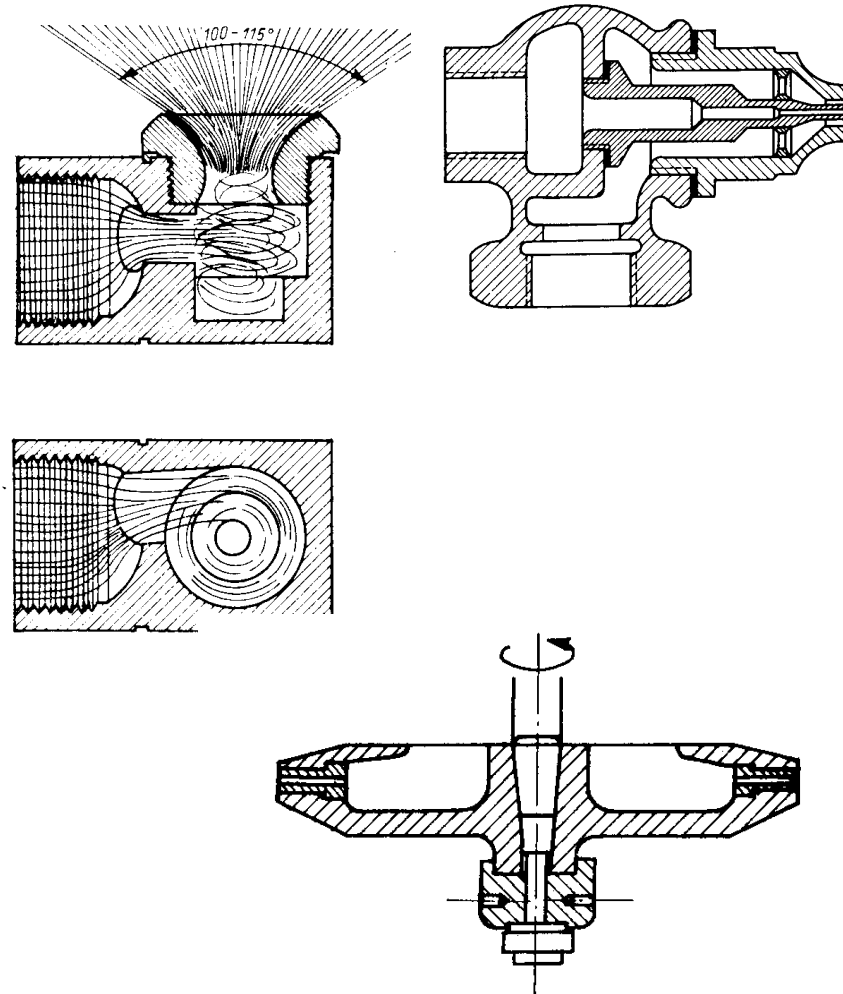
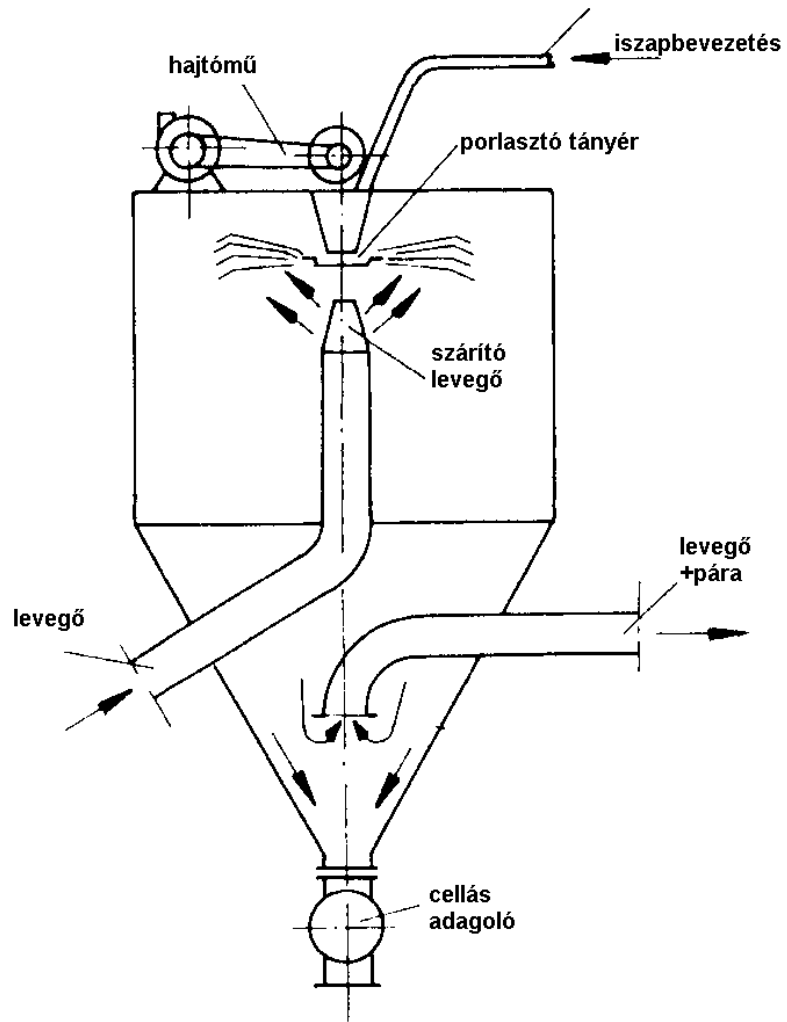
### Szalagszárító



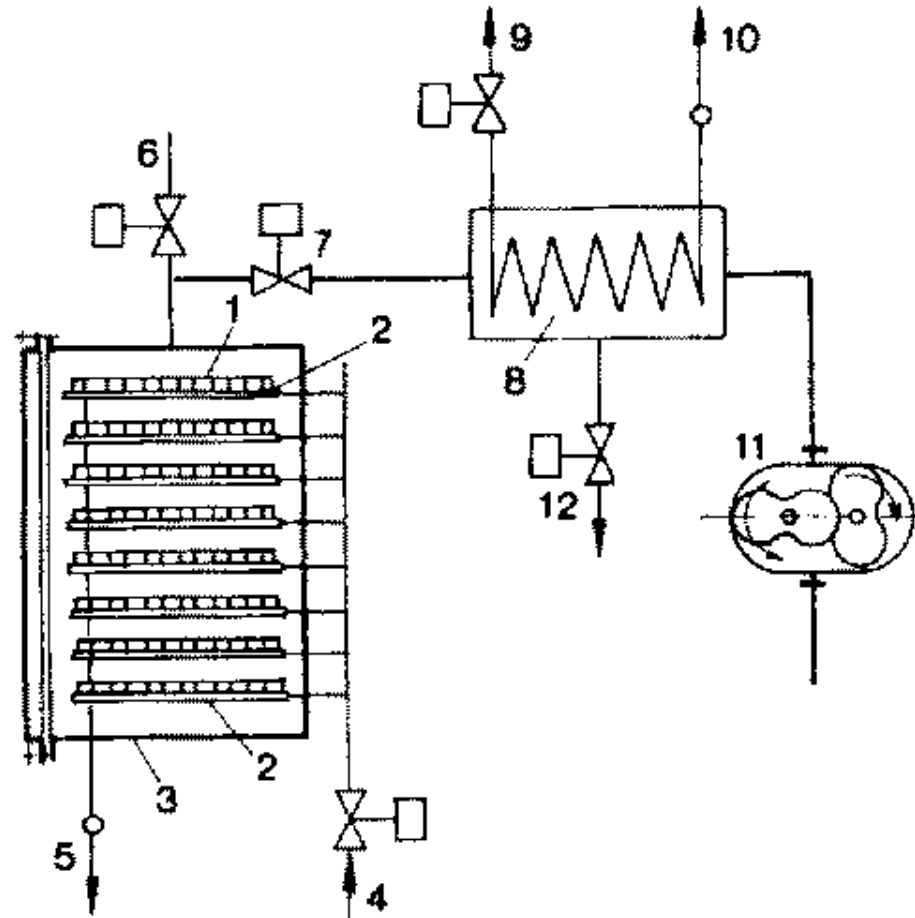
### Dobszárító



## Porlasztó szárító



## Kontakt tálcás vákuumszárító





Köszönöm a figyelmet, egyelőre ennyi😊