

VEGYIPARI MŰVELETEK ÉS IRÁNYÍTÁSUK III.

Vegyipari technikus tanulók részére

Ez a tankönyvpótló jegyzet a Petrik Lajos Két Tanítási Nyelvű Vegyipari, Környezetvédelmi és Informatikai Szakközépiskola nappali és levelező munkarendben tanuló, illetve az iskola által szervezett tanfolyami foglalkozásokon résztvevő, a vegyipari szakmacsoport technikus szakmaiban képesítést szerző tanulók részére készült Bertalan Zsolt – Csirmaz Antal – Szabó László – Uhlár Zoltán: Műszaki ismeretek, MK 1999. és Vegyipari műveletek és irányításuk, KIT 1999 tankönyvei, valamint a szerzők Digitális tudástár, MK, KIT és más kiadványokban megjelent szövege, ábrái és példái alapján, az új OKJ szerinti aktualitással. A jegyzet kereskedelmi forgalomba nem hozható, más képzésben nem használható fel.

Összeállította: Bertalan Zsolt és Uhlár Zoltán

2012.

3. A HŐ- ÉS ANYAGÁTADÁS MŰVELETEI

3.1. HŐÁTADÁS, KALORIKUS MŰVELETEK

A műszaki hőtan a termodinamikai törvényszerűségek gyakorlati megvalósításával foglalkozó tudományág. A vegyipari alkalmazások szempontjából legfontosabb területe a hőcsere művelete és a hőcserélő berendezések kialakítása, működtetése. A hőcsere az anyagok között végbemenő energiaátadás, amelynek során a résztvevő anyagok hőtartalma megváltozik.

3.1.1. A hőcsere folyamata

A hőcsere **hajtóereje a hőmérsékletkülönbség!** A hőcsere technikai megvalósítása és az átadható hőmennyiség meghatározása több körülménytől függ. Ezek közül a fontosabbak:

- a hőcsere **közvetlenül**, az anyagok érintkezésével, vagy **közvetve** (pl. egy cső falán keresztül) megy végbe;
- a hőcsere anyagai milyen halmazállapotúak: folyadék, gőz, gáz;
- a hőcsere anyagai milyen halmazállapot-változáson mennek keresztül: folyadék melegszik vagy hűl, folyadék elpárolog, gőz kondenzálódik;
- a hőcsere anyagai egyneműek, vagy több anyag keverékeként vesznek részt a hőcserében: tiszta folyadék, folyadékelegy vagy például nedves levegő;
- a hőcserélőben milyen az anyagok áramlása és egymáshoz viszonyított mozgási iránya. Pl.: duplikátorban kevert folyadék, egyenáramú vagy ellenáramú hőcserélő, keresztáramú gőzkondenzátor, vagy függőleges csővel működő filmbepárló stb.

A hőcsere folyamatát a résztvevő anyagok hőtartalom-változásával (entalpia-változás) jellemezzük. A műszaki gyakorlatban a folyadékállapotbeli fajlagos hőtartalmat vesszük kiindulási alapul. A hőcserélőben bármely anyag által leadott vagy felvett hőmennyiség a tömeg (vagy tömegáram) és a hőtartalomváltozás szorzataként számítható ki J (vagy W) egységben!

Ismert tömegű anyag által leadott vagy felvett hőmennyiség:

$$Q = m \cdot \Delta h$$

Megjegyzés: A szakirodalom nem egységes a hőmennyiség jelölésében! Találkozhatunk **a \dot{Q} J/s, azaz W, Q, q és Φ jelölésekkel is.** Azt, hogy hőmennyiségről [J], [kJ] vagy hőáramról (hőteljesítményről) [W], [kW] beszélünk, az egyenletek „tömeg értéke” határozza meg. Időegység alatti tömegáram [kg/s] esetében ($\dot{Q} = dQ/dt$) [J/s]=[W] teljesítményt kapunk, míg például 100 kg víz felmelegítéséhez Q [J], [kJ] energia, azaz hőmennyiség szükséges!

A fajlagos hőtartalom az anyag hőállapotára jellemző fizikai mennyiség. Megállapodás alapján értéke azonos azzal a hőmennyiséggel, amely az egységnyi tömegű anyag 0°C-ról egy adott hőmérsékletre való melegítéséhez szükséges. [J/kg] vagy [kJ/kg]

Az alábbi táblázat a hőtartalom(entalpia) halmazállapot-változás szerinti értékeinek meghatározását mutatja:

Halmazállapot	Hőtartalom (entalpia) kJ/kg	Jelmagyarázat
Tiszta folyadék	$h = c \cdot t$	c – fajhő, t – hőmérséklet
Forrásponti folyadék	$h = c \cdot t_{fp}$	t_{fp} – forrásponti hőmérséklet
Telített gőz	$h = c \cdot t_{fp} + \Delta h_p$	Δh_p – párolgáshő
Túlhevített vízgőz	$h = c \cdot t_{fp} + \Delta h_p + c_p \cdot (t_{th} - t_{fp})$	t_{th} – túlhevítési hőmérséklet
Folyadékelegy	$h = w \cdot h_A + (1 - w) \cdot h_B$	w – az 'A' komponens tömegtörtje
Nedves levegő	$h = c_L \cdot t + x \cdot (c_V \cdot t + \Delta h_v)$	x – a levegő abszolút nedvességtartalma

Például ha 20°C hőmérsékletű vizet 80°C-ra melegítünk, akkor a hőtartalma 83,7 kJ/kg értékről 335 kJ/kg értékre növekszik, mert a víz fajhője: 4,187 kJ/kg°C.

Ha a vizet **forráspontig melegítjük** 0,1 MPa nyomáson (itt a víz forráspontja 100°C), akkor hőtartalma 418,7 kJ/kg lesz. A forrásponti hőmérsékletű vizet **elpárolgatva** hőtartalma 2674 kJ/kg-ra növekszik. A gőzzel fűthetünk egy hőcserélőben valamilyen más anyagot. Ezekben a készülékekben általában csak kondenzálódik a gőz, ismét forrásponti hőmérsékletű folyadék lesz belőle. A hőcserélőben 1 kg gőz által **átadott energia: 2256 kJ/kg!**

Az alábbi táblázat a hőcsere különböző technikai típusait mutatja be:

Hőcsere	Típus	Készülék	Felhasználási terület
Folyadékok vagy gázok melegítése, hűtése folyadékkal	Közvetett , halmazállapot változás nélkül	Duplikátoros tartály vagy csököteges hőcserélő	Alapanyagok előmelegítése, oldódás növelése, reakciósebesség növelése, termékek lehűtése, hulladékhő hasznosítás.
Folyadékok vagy gázok melegítése gőzzel, gőzök kondenzációja	Közvetett , a hőhordozó halmazállapotának megváltozásával	Duplikátoros tartály vagy csököteges hőcserélő	Folyadékok melegítése kazánban előállított vízgőzzel. Betáplálás előmelegítése, bepárlóból vagy desztillálóból érkező párlat kondenzációja.
Folyadékok elpárolgatása, forralás	Közvetett , a hőfelvevő halmazállapotának megváltozásával	Csököteges hőcserélő, vagy függőleges elrendezésű, ejtőcsővel szerelt forraló.	Folyadékok forralása, elpárolgatása bepárláshoz, desztillációhoz vagy kristályosításhoz.
Levegő melegítése	Közvetett	Csököteges vagy lemezes hőcserélő kalorifer	Levegő melegítése szárításhoz vagy fűtéshez
Barometrikus keverőkondenzátor	Közvetlen	Csökkentett nyomáson (vákuum) üzemelő, tálcás, speciális készülék	Vákuum-bepárló utolsó fokozatában keletkező gőzök kondenzációja közvetlen vízérrintkezéssel, hidrosztatikai elven működő készülékben.
Ipari hűtőtorony	Közvetlen	Torony vagy kamra kialakítású áramlástechnikai készülék	Nagyobb üzemek hűtővíz ellátását biztosító berendezés, amelyben a vizet levegővel, a párolgatás által okozott hőelvonás révén hűtik.
Ipari sólé előállítás	Közvetett	Kompresszoros vagy abszorpciós hűtőrendszer	Ipari sóoldat hűtése azzal a céllal, hogy a hideg folyadék más rendszerekben technológiai hűtőanyagként használható legyen.

A hőcserével kapcsolatos számítások az 1.3.1. és 1.3.2. pontban tárgyalt anyag- és energiamérlegre vezethetők vissza. A számításoknál – emlékeztetőül – használhatjuk az ott „műveleti centrumnak” nevezett energiamérleg felírási módot, általában ez adja a lehető legpontosabb, és a tévedés lehetőségét legjobban kizáró megoldást.

3.1.2. Közvetlen hőátadás, hűtőtorony

Ha egy készülékben, hordóban vagy tartályban két, különböző hőmérsékletű folyadékot összekeverünk, akkor az elegy részecskéi között hőáramlás indul el, magasabb hőmérsékletű molekula hőt ad át a hidegebb (alacsonyabb hőmérsékletű) anyagnak. Az így kialakított keverő hőcserélőben a felmelegedő, illetve a lehűlő közegek egymással elkeverednek, és a hőcsere közvetlen érintkezés útján megy végbe. Az érintkeztetés nem csak folyadékok, de gőz és folyadék vagy gáz és folyadék között is megvalósítható.

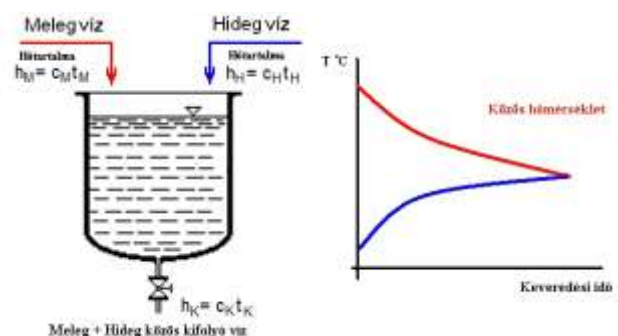
A közvetlen hőcsere ipari alkalmazása:

- víz, vagy vízzel elegyedő folyadék lehűtése másik – elegyedő – folyadékkal;
- víz vagy vizes oldat melegítése közvetlen gőzbevezetéssel;
- gőz kondenzációja közvetlen vízbekeveréssel;
- víz lehűtése levegő áramban, részleges párologtatással.

Két folyadék összekeverése

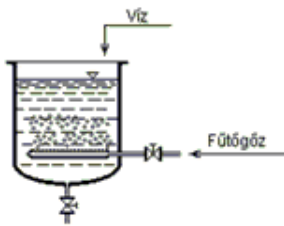
A közvetlen hőcsere legegyszerűbb esete, amikor két különböző hőmérsékletű, egymással elegyedő folyadékot összekeverünk. A melegebb folyadék hőtartalma $h_M = c_M t_M$, a hideg: $h_H = c_H t_H$ és a közös hőtartalom: $h_K = c_K t_K$. A hőtartalmakat megszorozva a hideg és meleg anyag mennyiségével:

$$m_M \cdot c_M \cdot t_M + m_H \cdot c_H \cdot t_H = (m_M + m_H) \cdot c_K \cdot t_K$$



A fenti összefüggésben szereplő c_K közös fajhő természetesen csak akkor értelmezhető egyszerűen, ha egyébként azonos anyagokról van szó. Ilyenkor a számításokból akár el is hagyható. Ellenkező esetben a fajhő értékét a mennyiségek arányának megfelelően kell figyelembe venni!

Megjegyzés: Az összekevert folyadékoknak nem kell feltétlenül egymással elegyedőnek lenni, a hőcsere akkor is végbemegy, ha egyébként a folyadék alkotói fázisokra bomlanak. Ez történik **extrakciókor** is!



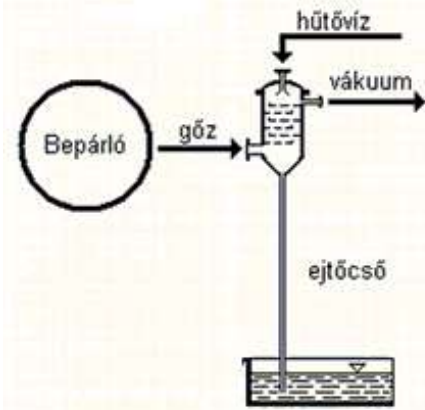
Kicsit bonyolultabb a feladat, ha **folyadékba vízgőzt** vezetünk melegítés céljából. Ilyenkor a légkörinél általában nagyobb nyomású gőz előbb kondenzál a folyadékban, majd tovább hűl, a közös hőmérsékletig. Erre látunk példát a bal oldali ábrán. A hőmérleg ebben az esetben:

$$m_G \cdot (c \cdot t_{Gf} + \Delta h_G) + m_V \cdot c \cdot t_V = (m_G + m_V) \cdot c \cdot t_K \text{ [J] vagy [kJ]},$$

ahol m_G a fűtőgőz, m_V a víz mennyisége, t_{Gf} a gőz forrásponti hőmérséklete a befűvés gőznyomásán, Δh_G a gőz párologáshője, t_V a víz hőmérséklete, és t_K a közös hőmérséklet a művelet végén. (Példát lásd az I. fejezetben!)

<p>Feladat: Keverőtartályban 2 tonna 90 °C hőmérsékletű glicerinhoz hűtés és hígítás céljából 1000 kg 20 °C hőmérsékletű vizet kevernek. A glicerinnel fajhője: 2370 J/kg°C, a víz fajhője: 4187 J/kg°C. Határozzuk meg az elegy hőmérsékletét a keverés után!</p> <p>A feladat megoldásánál ügyeljünk az alábbiakra:</p> <ul style="list-style-type: none"> - a két anyag fajhője különböző, tehát nem lehet velük „egyszerűsíteni”! - minden mennyiséget azonos mértékegységben és nagyságrendben kell a képletbe beírni! 	<p>Megoldás: A két folyadék keverésére felírt egyenletet átrendezése után a közös hőmérséklet:</p> $t_K = \frac{m_G \cdot c_G \cdot t_G + m_V \cdot c_V \cdot t_V}{m_G \cdot c_G + m_V \cdot c_V} \text{ [}^\circ\text{C]},$ <p>ahol indexben G a glicerinnel, V a víz adatait jelenti:</p> <p>Az elegy hőmérséklete a keverés után:</p> $t_K = \frac{2000 \cdot 2370 \cdot 90 + 1000 \cdot 4187 \cdot 20}{2000 \cdot 2370 + 1000 \cdot 4187} = \underline{\underline{57,2 \text{ }^\circ\text{C}}}$
--	---

A közvetlen hőcsere másik fontos eszköze a **barometrikus keverőkondenzátor**. Ezt a berendezést vákuumban működő bepárlókészülékek pára-kondenzátoraként használják. A bepárlóból érkező oldószergőz a hosszúságú készülékben elhelyezett csepegtető tálcákon érintkezik a hűtővízzel. A víz a kondenzátummal együtt az ejtőcsőbe kerül, amelyben a szívócsőhöz, vagy pipettához hasonló módon a vákuummal egyensúlyt tart a folyadékoszlop magassága, a már ismert $p = h \cdot \rho \cdot g$ összefüggés szerint. A légkörinél kisebb p nyomást, azaz vákuumot külön vákuumszivattyú állítja elő. Az ejtőcső mindig csak annyi folyadékot enged a rendszerből kifolyni, amennyi a vákuum által meghatározott vízoszlop magasságot megnövelné. Így alkalmas a pára-kondenzátum folyamatos elvezetésére.

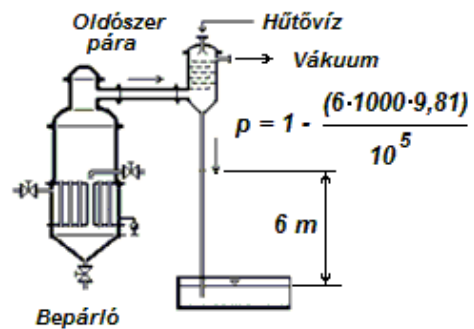


Feladat:

Barometrikus keverőkondenzátorban **Robert-bepárlóból** érkező - 600 kg/h mennyiségű - oldószer (vízgőz) kondenzáltatunk vízzel. A keverőkondenzátor ejtőcsővében 6 méteres vízoszloppal tart egyensúlyt a bepárlóban előállított vákuum. Határozzuk meg a hűtéshez szükséges víz mennyiségét m³/h egységben, ha a hűtővíz 10 °C hőmérsékletéről 40 °C-ra melegszik! A hűtővíz és a pára-kondenzátum fajhője 4,2 kJ/kg°C.

A feladat megoldásához használjuk fel az alábbi táblázatot:

Gőznyomás (bar)	Hőmérséklet °C	Párolgáshő kJ/kg
0,2	60	2350
0,4	76	2300
0,6	86	2250
0,8	94	2200



Megoldás:

A keverőkondenzátor **hőmérlege**: $\dot{m}_S \cdot (c \cdot t_S + \Delta h_S) + \dot{m}_V \cdot c \cdot t_{be} = (\dot{m}_S + \dot{m}_V) \cdot c \cdot t_{ki}$

ahol S betű a bepárlóból érkező oldószer párákat – ún. **másodlagos gőzt** – V pedig a hűtővizet jelöli!

A 6 méteres vízoszloppal egyensúlyt tartó vákuumérték az ábrán látható összefüggés alapján: **0,41 [bar]**

Ebből, a táblázat szerint a bepárló forrásponti (üzemi) hőmérséklete: 76 °C (a nyomást 0,4 bar értékre kerekítve), és az oldószer párolgáshője: 2300 kJ/kg.

Rendezzük át az egyenletet, fejezzük ki az \dot{m}_V hűtővíz mennyiséget és írjuk be az adatokat!

1) $\dot{m}_S \cdot (c \cdot t_S + \Delta h_S) - \dot{m}_S \cdot c \cdot t_{ki} = \dot{m}_V \cdot c \cdot t_{ki} - \dot{m}_V \cdot c \cdot t_{be}$, és

2) $\dot{m}_V = \frac{\dot{m}_S \cdot ((c \cdot t_S + \Delta h_S) - c \cdot t_{ki})}{c \cdot (t_{ki} - t_{be})}$, [kg/h], behelyettesítés után:

3) $\dot{m}_V = \frac{600 \cdot ((4,2 \cdot 76 + 2300) - 4,2 \cdot 40)}{4,2 \cdot (40 - 10)} = \underline{\underline{11670 \text{ [kg/h]}}}$

Tehát a hűtéshez több mint 11 tonna víz kell óránként, ami elég tekintélyes anyagfelhasználás.

Gyakorló feladat:

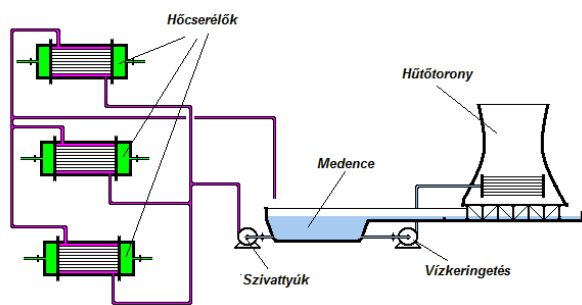
Hány százalékkal csökkenthető a hűtővíz felhasználás, ha az ejtőcsőben a víz szintjét 8 méterre növeljük, és a hűtővíz kilépő hőmérséklete elérheti az 50 °C értéket?

(A megtakarítás (kerekítve): **27%**)

A hűtőtorny a keverő típusú közvetlen hőcserélők jellegzetes berendezése. Nagymennyiségű víz lehűtésére alkalmazzák, részben a hideg levegő hűtőhatása, de még inkább a levegő párologtató tulajdonsága felhasználásával. Hőerőművekben kondenzációhoz, vegyi gyárakban nagymennyiségű hűtővíz előállításához, és a hűtési feladat elvégzése utáni regenerálásához használják.



A hűtőtorny egy tölcser alakú cső, amelyben a felfelé áramló levegő – Bernoulli törvénye értelmében - felgyorsul, nyomása csökken. A nyomáscsökkenés hatására a bevezetett meleg víz egy része elpárolog, és gőz formájában a levegőhöz keveredik.



A párologáshoz szükséges hőenergiát a lényegében **adiabatikus** rendszer részben a levegőtől, de főleg magától a melegebb víztől vonja el, aminek következtében a víz el nem párologó része lehül. A hideg, újra felhasználható víz a torony alatti medencében gyűlik össze, ahonnan szivattyú továbbítja a hőcserélők felé. Erre látunk példát a jobb oldali ábrán.

A levegő áramlása és így a hűtőhatás ventilátorral fokozható. Ilyen elven működik a Heller-forgó

rendszerű hűtőtorny is., amely már nem tölcser alakú, hanem a tetején axiális ventilátorokkal szerelt négyoszloplú, zárt építmény.

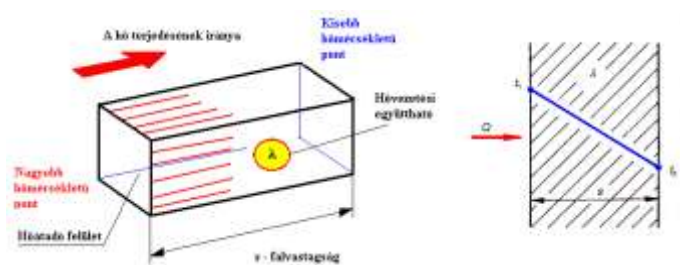
3.1.3. Közvetett hőcsere és számításai

A közvetett hőcsere ipari jelentősége sokkal nagyobb a közvetlenél. Általában a hűtő vagy fűtő anyagok nem keveredhetnek, sőt nem is érintkezhetnek a hűtendő vagy fűtendő anyaggal, ezért a hőenergia átadását egy elválasztó fal biztosítja. A hőátvitel hajtóereje a **hőmérsékletkülönbség**. Folyamata:

- A meleg anyag **átadja** hőenergiáját egy részét az elválasztó falnak;
- A fal tovább**vezeti** a hőenergiát a másik anyag irányába;
- A hideg anyag felveszi a hőenergiát a faltól – azaz a fal **átadja** a hőenergiát a hidegebb anyagnak.

Az **átadás + vezetés + átadás** folyamatot **hőátbocsátásnak** nevezzük. Jellemző adata a **hőátbocsátási együttható**, vagy hőátbocsátási tényező. Jele: **k**, mértékegysége: **W/m²K**

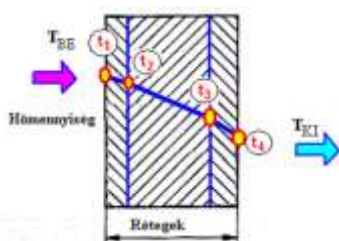
A hőátbocsátási folyamat lényeges eleme a két közeget elválasztó falban végbemenő **hővezetés**. Ez feltétele a hőcserének, hiszen, ha a közegek egymástól távol vannak, vagy a fal túlságosan vastag, akkor nem megy végbe az energiaátadás. (Kivétel ez alól a **hősugárzás** esete, de ennek ipari jelentőségét most nem tárgyaljuk.) A hővezetést a jobb oldali ábra mutatja be.



Az „s” vastagságú, szilárd testben a „Q” hőenergia $t_1 - t_2$ hőmérsékletkülönbség hatására, a hővezetés irányára merőleges „A” felületen halad t_2 felé. A továbbítható hőenergia nagyságát az anyagra jellemző **λ hővezetési együttható** határozza meg.

$$Q = \frac{\lambda}{s} \cdot A \cdot (t_1 - t_2)$$

Az összefüggésből látható, hogy a λ/s érték a szilárd test, nevezzük **falnak**, hővezető képességét határozza meg. Ha azt akarjuk, hogy a hőtároló tulajdonság jó legyen, akkor vagy nagy λ értékű, vagy kis falvastagságú (s) anyagot kell választanunk. Hőszigetelés alkalmazásánál pedig éppen fordítva van. Többrétegű fal esetében inkább az egyes rétegek hőellenállását célszerű vizsgálnunk, ami az **$R = \frac{s}{\lambda}$** szerint értelmezhető.

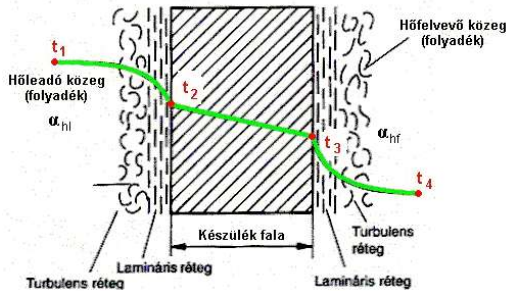


Az egyes rétegek hőellenállásai, akárcsak villamos áramkörök soros ellenállásai, **összeadódnak**, tehát:

$$R = \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3},$$

viszont a hőcsere szempontjából éppen nem az ellenállás, hanem a hőtovábbító képesség lényeges, ami, alkalmazva a **k** fogalmát:

$$k = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3}} \text{ W/m}^2\text{K}$$



A többrétegű hőátadó falak hőtovábbító képességének meghatározási logikáját alkalmazhatjuk a közvetett hőcsere teljes folyamatára. A melegebb anyag hőátadás képességét az **α_{meleg}** , a hidegebb anyagét az **α_{hideg}** betűvel jelölt **hőátadási tényező** határozza meg.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{meleg}} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_{hideg}}} \text{ W/m}^2\text{K}$$

Különböző szilárd anyagok hővezetési tényezőjét, illetve a folyadékok és gázok hőátadási együtthatóját számos szakirodalmi táblázatban megtaláljuk. Példaként tekintünk át az alábbi táblázatokat:

A hőátadás módja	Víz	Levegő	Megjegyzés, érvényesség
	W/m ² K	W/m ² K	
Turbulens kényszeráramlás csőtengellyel párhuzamosan	1200---5800	35---60	v = 0,2 --- 1,5 m/s; (levegőre 8 --- 15) Re = 7500 --- 50000
Turbulens kényszeráramlás csővel szöglet zárva	3100 --- 10000	70 --- 100	
Szabadáramlás	350 --- 1000	300 --- 800	
Lamináris kényszeráramlás a csőtengellyel párhuzamosan	300 --- 400	250 --- 350	v = 0,1 --- 1 m/s Re = 700 --- 1900
Víz forrása	2000 --- 20000		légtörny nyomáson
Vízgőz kondenzációja	9000 --- 15000		5 bar gőznyomásig

Anyag (λ)	
W/mK	
Acél	50
Alumínium	203
Saválló acél	14,5
Öntöttvas	60,5
Réz	311
Bronz	58
Ezüst	418
Beton	0,18
Üveg	1,16
Parafa	0,05
Polisztirolhab	0,03
Poliuretánhab	0,02
Üveggyapot	0,06

Feladat:

Számítsuk ki annak a saválló acélból készült hőcserélőnek a hőátbocsátási tényezőjét, amelynek hőátadó felülete 6 mm vastag, egyik oldalán kondenzáló gőzzel fűtjük, másik oldalon pedig víz áramlik szabadáramlással. (Gőzfűtésű vízmelegítő)

Megoldás:

A feladat megoldásához a $k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{meleg}} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_{hideg}}}$ összefüggést alkalmazzuk.

A táblázatból, egyéb információ hiányában $\alpha_{gőz} = 10000$, és $\alpha_{víz} = 500 \text{ W/m}^2\text{K}$ értékeket választunk. Behelyettesítés után:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{10000} + \frac{0,006}{14,5} + \frac{1}{500}} = \underline{\underline{397,8 \text{ [W/m}^2\text{K]}}}$$

Gyakorló feladat:

Számítsuk ki, hogy hány százalékkal változik a hőátbocsátási képesség, ha a hőcserélő közönséges acélból készül, viszont a vízzel, vagy egyéb folyadékkal érintkező részt 2 mm vastag rétegben zománcozzák. A zománc hővezetési együtthatóját az üvegével megegyezően 1,16 W/mK értéknek vehetjük!

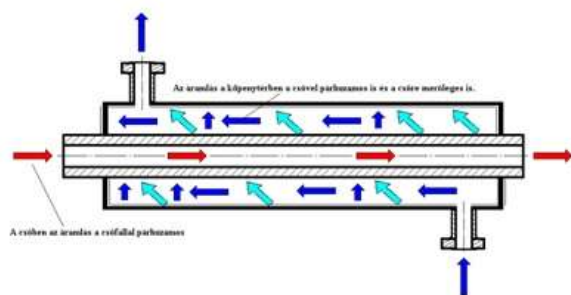
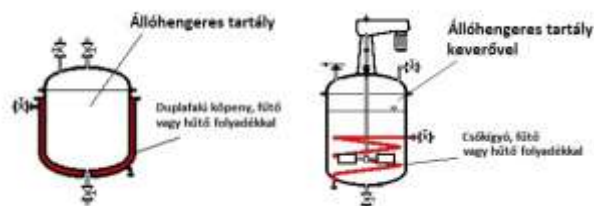
($k = 253,5 \text{ [W/m}^2\text{K]}$, ami 36,2%-os csökkenés!)

Egy 5 mm-es acélból készült vízforraló tartályt kívülről poliuretánhabbal szigetelünk. A szigetelést 3 mm vastag alumínium lemez védi a külső sérülésektől. Milyen vastag szigetelésre van szükség, ha a külső tér felé történő hőátbocsátási együttható értékét $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ alatt akarjuk tartani?

($s = 20 \text{ mm}$ poliuretánhab megfelelő)

Az ipari hőcsere legegyszerűbb formája a folyadékok közötti közvetett hőátadás. Megkülönböztetünk statikus hőcsere és dinamikus, áramló közegek között végbemenő hőcsere. Mindkét esetben a hőátadás szilárd falon keresztül megy végbe. A melegebb folyadék a hőenergiájának egy részét a hőcsere falán keresztül átadja a "túloldalon" lévő hidegebb folyadéknak.

A **statikus hőcsere** legegyszerűbb készülékei az állóhengeres tartályok, amelyet vagy egy "termoszzerű" külső köpenyből, vagy a tartályban elhelyezett csőgyűből fűtenek, illetve hűtenek. Folyadék hőcsere ritkábban alkalmazzák, gyakoribb megoldás a gőzzel való fűtésük! A tartály külső köpenyét hőszigeteléssel látják el, amire az előző oldali számításoknál láttunk példát.



A **dinamikus hőcsere**t legtöbbször vízszintes elrendezésű csöves hőcsereelőben hajtják végre. Két csőben, egymástól elválasztva azonos vagy ellentétes irányban mozog a meleg és a hideg anyag. A hőátadás a mindkét oldalról folyadékkal érintett cső falán keresztül valósul meg. Az anyagok hőmérséklete a cső fala mentén változik. A melegebb folyadék általában a belső cső belsejében folyik, míg a hidegebb, hűtő folyadék a belső cső körüli **köpenyterében** áramlik.

A gyakorlatban a hőcsereelő köpenyterében több cső fut párhuzamosan. A melegebb folyadék a hőcsereelő végén kialakított záró elemben „osztódik” szét a csövek száma szerint. A csövekben megtörténik a köpenyoldal felé irányuló hőátadás, majd a **csőköteg** másik végén a folyadékáramok ismét egyesülnek. Az így kialakított szerkezetet **csőköteges hőcsereelőnek** nevezzük.

A hőcsereelőben végbemenő hőenergia átadást a már korábban megismert hőmérleg segítségével határozzuk meg:

$$\dot{m}_1 \cdot h_{1BE} + \dot{m}_2 \cdot h_{2BE} = \dot{m}_1 \cdot h_{1KI} + \dot{m}_2 \cdot h_{2KI}, \text{ [J/s], azaz [W]}$$

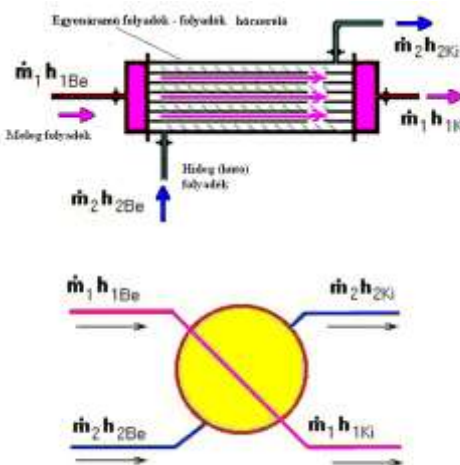
(Ahol m a mennyiséget, h a hőtartalmat jelöli. Lásd az ábrán! Figyeljük meg továbbá, hogy a meleg és a hideg folyadék nem keveredik, tehát ezeknél a számításoknál az anyagmérlegnek nincs jelentősége!)

A számítások célja az adott fűtési vagy hűtési feladat eléréséhez szükséges fűtő- vagy hűtőanyag mennyiségének a meghatározása. A hőmérsékletértékeket technológiai paraméterként adjuk meg.

Folyadékok esetében: $\dot{m}_1 \cdot c_1 \cdot t_{1BE} + \dot{m}_2 \cdot c_2 \cdot t_{2BE} = \dot{m}_1 \cdot c_1 \cdot t_{1KI} + \dot{m}_2 \cdot c_2 \cdot t_{2KI}$.

Ha feltételezzük, hogy az „1” index a melegebb (M), „2” index a hidegebb (H) anyagot jelöli, akkor egy olyan feladatnál, ahol a hidegebb hűtővíz mennyiségét kell meghatározni, az egyenletet átrendezve:

$$\dot{m}_H = \frac{\dot{m}_M \cdot c_M \cdot (t_{MBE} - t_{MKI})}{c_H \cdot (t_{HKI} - t_{HBE})} \text{ [kg/s], (vagy [kg/h] gyakorlati érték, ha } m_M \text{ értéke [kg/h] volt)}$$



<p>Feladat: Csőköteges hőcsereelőben óránként 1500 kg 2,3 KJ/kg °C fajhőjű olajat hűtünk vízzel. Az olaj hőmérséklete 120 °C, amit legalább 50 °C-ra kell lehűteni. A víz átlagos belépő hőmérséklete 15 °C, kilépésnél a 45 °C értéket nem haladhatja meg. Határozzuk meg a szükséges hűtővíz mennyiségét!</p>	<p>Megoldás: A fenti összefüggés behelyettesítésével: $\dot{m}_H = \frac{1500 \cdot 2,3 \cdot (120 - 50)}{4,18 \cdot (45 - 15)} = 1926 \text{ [kg/h] hűtővíz}$</p>
--	--

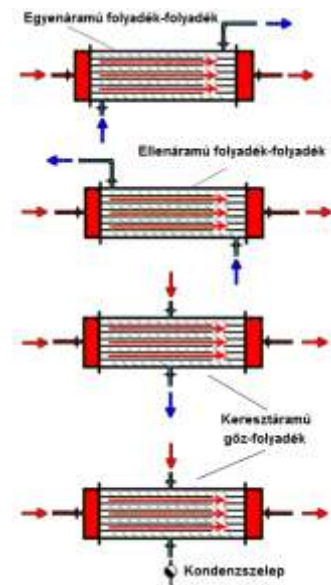
3.1.4. Csőköteges hőcserélők főbb típusai az áramlási irány és a halmazállapot szerint

A folyadékokra alkalmazott közvetett hűtadás kiterjeszhető gázokra és halmazállapotukat megváltoztató gőzökre. Ennek alapján megkülönböztetünk:

- folyadék – folyadék típusú, halmazállapot-változás nélkül;
- gőz – folyadék típusú, az egyik oldalon halmazállapot-változással;
- gőz – gőz típusú, ahol mind a két oldalon van halmazállapot-változás.

A folyadék – folyadék típusú hőcserélőket egyen- vagy ellenáramba kötve működtetünk, míg a gőz – folyadék hőcserélők, például a gőz kondenzációját biztosító berendezések általában **keresztáramúak!**

A kondenzátor típusoknál megkülönböztetünk párahűtő és gőzzel fűtő berendezéseket. A párahűtőkben (például a desztillációnál) a gőz nem csak kondenzálódik, hanem a kondenz-folyadék tovább is hűl. A gőzzel fűtő készülékekből a kondenzvizet különleges szelep távolítja el, a kondenz-folyadék hőmérséklete és nyomása a gőzével azonos. A **kondenzszelep** jelölését a jobb oldal alsó ábrán látjuk!



Feladat:

1000 kg/h izopropil-alkoholt (ip) melegítünk 3 bar nyomású gőzzel 20 °C-ról 70 °C-ra. Az izopropil-alkohol fajhője: 3,59 kJ/kg. Határozzuk meg a szükséges fűtőgőz mennyiségét (kg/h)egységben!

Gőznyomás (bar)	Hőmérséklet °C	Párolgáshő kJ/kg
1,0	100	2242
2,0	121	2188
3,0	134	2158
4,0	144	2136
5,0	152	2120
6,0	159	2106

Megoldás:

Gőzzel való fűtésnél a gőz a hőcserélőben csak kondenzálódik, nyomása, hőmérséklete állandó marad. Így az energiamérleg átrendezés után:

$$\dot{m}_{g\ddot{o}z} \cdot \Delta h_{g\ddot{o}z} = \dot{m}_{ip} \cdot c_{ip} \cdot (t_{ipKI} - t_{ipBE})$$

Ebből: $\dot{m}_{g\ddot{o}z} = \frac{\dot{m}_{ip} \cdot c_{ip} \cdot (t_{ipKI} - t_{ipBE})}{\Delta h_{g\ddot{o}z}}$, tehát:

A gőz párolgáshő adatát a táblázatból keressük ki, ennél a feladatnál a gőz hőmérséklete lényegtelen!

$$\dot{m}_{g\ddot{o}z} = \frac{1000 \cdot 3,59 \cdot (70 - 20)}{2158} = 83,1 \text{ [kg/h]}$$

Gyakorló feladatok:

Csőköteges hőcserélőben óránként 1200 kg 2,3 KJ/kg °C fajhőjű olajat melegítünk gőzzel, 30 °C-ról 85 °C-ra. A fűtőgőz 4,3 bar nyomású. Határozza meg a fűtéshez szükséges gőz óránkénti mennyiségét!

Megoldás:

A fűtőgőz adatait a táblázatból, interpolálással határozzuk meg: $\Delta h_{g\ddot{o}z} = 2131 \text{ kJ/kg}$,

$$\dot{m}_{g\ddot{o}z} = 71,2 \text{ kg/h}$$

Óránként 1,5 m³ oldatot melegítünk csőköteges hőcserélőben 15 °C-ról 102 °C-ra, azaz az oldat forráspontjára, 5 bar nyomású gőzzel. Az oldat sűrűsége: 1,26 kg/dm³, fajhője: 3,96 kJ/kg °C.

- 1) - mennyi fűtőgőzre van szükség óránként?
- 2) - mekkora a hőcserélő hőteljesítménye, vagyis az időegység alatt átadott hőmennyiség?

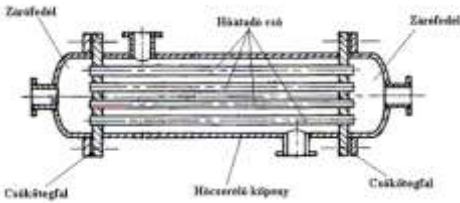
$$(\dot{m}_{g\ddot{o}z} = 307,2 \text{ kg/h}, \quad \dot{Q}_{h\ddot{o}csere} = 180,9 \text{ kW})$$

Óránként 600 kg gőz halmazállapotú, 1 bar nyomású toluolt kondenzáltatunk hőcserélőben 15 °C hőmérsékletű vízzel. A toluol hőmérséklete 111 °C, fajhője: 1,88 kJ/kg °C, párolgáshője 363 kJ/kg. Mennyi hűtővízre van szükség, ha a toluolt 50 °C-ra hűtjük, és a víz legfeljebb 40 °C kilépő hőmérsékletű lehet?

$$(\dot{m}_{v\ddot{i}z} = 2738 \text{ kg/h})$$

3.1.5. Felületi hőcserélők és számításaik

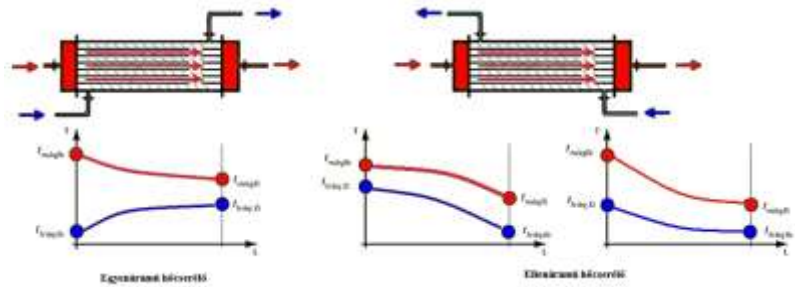
A közvetett hőátadást megvalósító felületi hőcserélők **regenerátor** vagy **rekuperátor** jellegűek lehetnek. A regenerátor két ciklusban hajtja végre a hőcserét. Először a meleg anyag az energiáját átadja valamilyen hőtároló közegnek, majd ez „regenerálódik” a második ciklusban a hűtőközeggel való érintkezéssel. Ilyen rendszerű, például a háztartási hűtőtáska hűtőpatronja is. Ipari jelentősége inkább a csöves szerkezetű, folyamatos közvetett érintkezést megvalósító, rekuperátor elvű hőcserélőnek van.



Az egyszerű, **merevsöves, egyjáratú, csőköteges hőcserélő** szerkezeti rajzát látjuk jobb oldali ábrán. A csöveket a **csőköteggel** rögzíti, és egyúttal elkülöníti a **köpenytértől**. Az ábra szerinti készülék folyadék-folyadék típusú és egyen- vagy ellenáramú egyaránt lehet, attól függően, hogy a köpenytérbe (jobbról balra mozgatva) bevezetett folyadékkal szemben áramlik (balról jobbra), vagy vele egy irányban (jobbról balra) a csőoldal folyadéka.

A hőcsere hajtóereje a hőmérsékletkülönbség, tehát a csövek két oldala között mindenhol különböznie kell a hőmérsékletnek. A csőfal mentén haladó anyag hőmérséklete különbözőképpen változhat a belső oldalon és a külső oldalon. Ezért a hőcsere hőmérsékletkülönbsége pontról pontra változhat. A hőcserélőben a hőmérséklet változását a **hőfoklefutási** diagram segítségével ábrázolhatjuk.

A jobb oldali ábrán a folyadék hőcserélők jellegzetes hőfoklefutási diagramjait látjuk egyenáramú (bal) és ellenáramú (jobb) kapcsolásban. A hőfoklefutási diagram általában logaritmikus jellegű, tehát a hőmérsékletkülönbséget is a **logaritmikus középérték** szerint számítjuk ki.

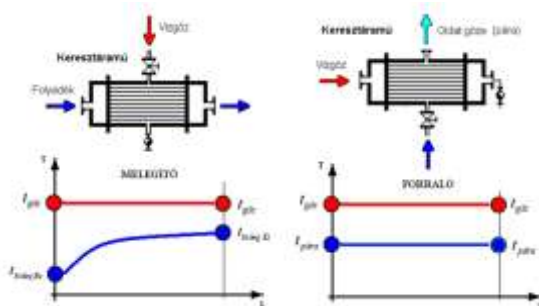


Az ábrán látható jelölésekkel a hőcserélő logaritmikus hőmérsékletkülönbsége:

$$\Delta t_{log} = \frac{\Delta t_N - \Delta t_K}{\ln\left(\frac{\Delta t_N}{\Delta t_K}\right)} \text{ °C}$$

ahol Δt_N a nagyobbik, Δt_K pedig a kisebbik hőmérsékletkülönbség a cső két oldala között.

Egyenáramú hőcserélők esetében a nagyobbik hőmérsékletkülönbség (Δt_N) egyértelműen a folyadékok belépő oldalán van, míg az ellenáramú hőcserélőknél a hőmérséklet-lefutási diagram vagy felülről, vagy alulról domború, attól függően, hogy a hőcserélő melyik végén nagyobb a hőmérsékletkülönbség. Ha a hideg oldali belépésnél nagyobb a hőmérsékletkülönbség, akkor a diagram felülről, míg ellenkező esetben alulról domború!

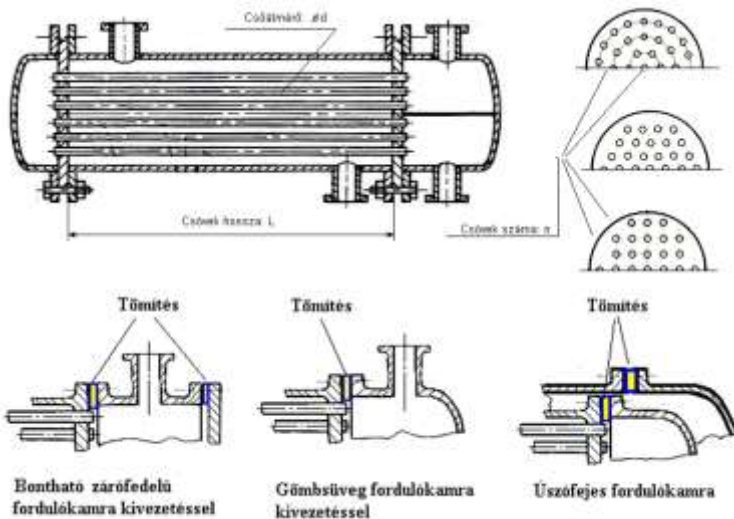


Különleges esetet képvisel a folyadék-gőz, illetve a gőz-gőz típusú hőcserélő, amelynek a cső egyik, vagy mindkét oldalán csak halmazállapot-változás van. Például a **gőzfűtésű melegítő** vagy a **forraló** esetében a fűtőgőz hőmérséklete nem változik a kondenzációkor. A folyadék felmelegszik, vagy a forrásponti hőmérsékletű folyadék elpárolog. Ez utóbbi esetben a hőcserélő közepes hőmérsékletkülönbsége megegyezik a **tényleges hőmérsékletkülönbséggel**, azaz $\Delta t = t_{gőz} - t_{pára,forrásponti}$!

A hőcserélő **szerkezetével kapcsolatos számítások** célja a hőátadáshoz szükséges **felület** meghatározása. Általános esetben írható, hogy a hőcserélőben átadott (átadható) hőmennyiség a készülék felületétől, a hőmérsékletkülönbségtől és a hőátbocsátási együtthatótól függ. Folyadék típusú hőcserélőknél: $\Delta t = \Delta t_{log}$

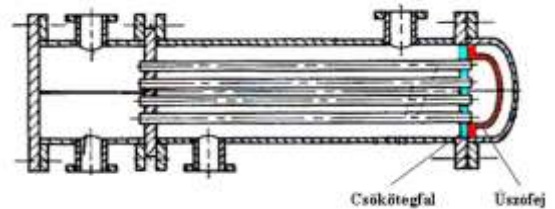
$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta t \quad W$$

Így az előző fejezetben megismert energiamérleg számítások és a hőcserélő technikai számításai együtt alkotják a hőcserével kapcsolatos számításokat.



A hőcserélő hosszúsági méreteinek csökkentése és kedvezőbb áramlási viszonyok elérése érdekében a csőfelület megtartása mellett gyakran alkalmazzák az egy irányba vezető járatok számának megosztását, a **többjártatú** hőcserélő kialakításával.

Az ábrán is látható módon a csövek egy részében jobbról balra, majd a másik részben pedig balról jobbra áramlik az anyag. Az anyagok be- és elvezetése osztott belépő kamrával, a fordulás pedig **fordulókamrával** valósítható meg. Az ábrán a fordulókamrák és a csőköteg-fal kapcsolódás megoldásai, és tömítésük is megfigyelhető.



Figyeljük meg, hogy az alsó jobb oldali ábrán a **hőkompenzációra** látunk megoldást. Nagy hőmérsékletkülönbség esetén a csövek hőtágulása olyan mértékű járulékos terhelést jelenthet, amely kiszakítja a csöveket a csőköteg-falból vagy más módon károsítja a berendezést. Az **úszófejes** vagy **lencsekompenzátoros** hőcserélő szerkezetes biztosítja a csőköteg hosszirányú elmozdulását és ezáltal megakadályozza a hőfeszültség kialakulását.

Feladat:

Óránként 12 tonna 20 °C hőmérsékletű toluolt 90°C-ra melegítünk 3,5 bar nyomású fűtőgőzzel. A toluol fajhője 1,88 kJ/kg°C. A hőcserélő hőátbocsátási együtthatója: $k=1500 \text{ W/m}^2\text{K}$. A fűtőgőz hőmérséklete 139 °C, párolgáshője: 2146 kJ/kg.

- 1) Mekkora a fűtés gőzszükséglete? [kg/h]
- 2) Mekkora a közepes hőmérsékletkülönbség? [°C]
- 3) Mekkora a hőcserélő fűtőfelülete? [m²]

Megoldás:

Az előző pontban tárgyalt feladatoknál tanultak alapján a fűtőgőz szükséges mennyisége:

$$\dot{m}_{g\ddot{o}z} = \frac{\dot{m}_{to} \cdot c_{to} \cdot (t_{toKI} - t_{toBE})}{\Delta h_{g\ddot{o}z}} = \frac{12000 \cdot 1,88 \cdot (90 - 20)}{2146} = \underline{737 \text{ kg/h}}$$

A közepes hőmérsékletkülönbség: $\Delta t_{log} = \frac{\Delta t_N - \Delta t_K}{\ln\left(\frac{\Delta t_N}{\Delta t_K}\right)}$ alapján:

$$\Delta t_{log} = \frac{(139 - 20) - (139 - 90)}{\ln\left(\frac{139 - 20}{139 - 90}\right)} = \underline{78,8 \text{ }^\circ\text{C}}$$

Az átadott hőmennyiség: $\dot{Q} = \dot{m}_{g\ddot{o}z} \cdot \Delta h_{g\ddot{o}z} \text{ W}$

$$\dot{Q} = \frac{737}{3600} \cdot 2146 = 439,3 \text{ kW}, = 439300 \text{ W}, \text{ a felület:}$$

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta t \text{ alapján: } A = \frac{\dot{Q}}{k \cdot \Delta t_{log}} = \frac{439000}{1500 \cdot 78,8} = \underline{3,72 \text{ m}^2}$$

Gyakorló feladat:

Az előző fejezet egyik feladatának folytatásaként, (Óránként 1,5 m³ oldatot melegítünk csőköteges hőcserélőben 15 °C-ról 102 °C-ra, azaz az oldat forráspontjára, 5 bar nyomású gőzzel. Az oldat sűrűsége: 1,26 kg/dm³, fajhője: 3,96 kJ/kg°C.)

- 1) - mennyi fűtőgőzre van szükség óránként? ($m_{g\ddot{o}z} = \underline{307,2 \text{ kg/h}}$)
- 2) - mekkora a hőcserélő hőteljesítménye, vagyis az időegység alatt átadott hőmennyiség? ($\dot{Q}_{h\ddot{o}csere} = \underline{180,9 \text{ kW}}$)
- 3) - Mekkora fűtőfelületű hőcserélőre van szükség, ha a hőcserélő hőátbocsátási tényezője 300 W/m²K?
- 4) - Hány darab 25 mm átmérőjű és 1,5 m hosszú csőből építsük fel a készüléket?

($\Delta t_{log} = \underline{86,3 \text{ }^\circ\text{C}}$, $A = \underline{6,98 \text{ m}^2}$, $n = \underline{59 \text{ db}}$ cső)

Csőköteges hőcserélőben óránként 1500 kg, 120 °C hőmérsékletű glicerint hűtünk vízzel 50 °C hőmérsékletre. ($c_{glic} = 2,36 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$). A hűtővíz belépő hőmérséklete 12 °C, a kilépő pedig a 45 °C! (hőcserélő $k = 1200 \text{ W/m}^2\text{K}$)

– Határozzuk meg az óránként szükséges hűtővíz mennyiségét t/h értékben!

– Határozzuk meg a hőcserélő felületét egyen- és ellenáramú kapcsolásnál!

$\dot{Q} = \underline{1,79 \text{ t/h}}$, $A_{egyen} = \underline{1,71 \text{ m}^2}$, $A_{ellen} = \underline{1,05 \text{ m}^2}$

3.1.6. A bepárlás művelete és készülékei

A bepárlás vagy **töményítés** olyan művelet, amelynek során valamilyen szilárd anyag oldatából az oldószer egy részét elpárologtatják. Az oldószer általában víz, az oldott anyag valamilyen szervesetlen só, esetleg a cukorgyártás során előállított cukor. A bepárlás általában megelőzi a **kristályosítást**, amellyel az oldott anyagot ténylegesen kinyerik az alapanyagból.

A bepárlás tehát **forralással** jár. Az alapanyagot, vagyis a híg oldatot először forráspontig **melegítik**, majd a kívánt töménység elérése érdekében az oldószer egy részét **elpárologtatják**. A művelethez elvileg bármilyen hőenergia-forrás felhasználható, de a gyakorlatban a bepárló készülékeket a légkörinél nagyobb nyomású, kazánban előállított gőzzel fűtik. Ezért a művelet leírásakor megkülönböztetjük a fűtéshez használt **primer (elsődleges) gőzt**, és a bepárlóban keletkező oldószer **szekunder (másodlagos) gőzét**.

A bepárlással az anyagokat szétválasztjuk. Ha alkalmazzuk az anyagmérleg modellt, akkor a rendszerbe bevezetett "két anyagból" a művelet során "három anyag" keletkezik. Ugyanakkor az anyagmérleg felírása korlátozott is, hiszen a fűtésre használt gőz nem keveredik az oldattal, hanem egyszerűen áthalad a készülék fűtőrendszerén.

A bepárlás anyagmérlege:

$$\dot{m}_G + \dot{m}_B = \dot{m}_{GK} + \dot{m}_S + \dot{m}_M$$

az oldott anyag mennyiségére felírva (a kondenzálódó fűtőgőz nélkül):

$$\dot{m}_B \cdot w_B = \dot{m}_S \cdot w_S + \dot{m}_M \cdot w_M$$

A bepárlás fontos jellemzője, hogy a párlat koncentrációja az oldott anyag szempontjából mindig **nulla!** Ez alapvetően különbözteti meg a folyadékelegyeket szétválasztó desztillációtól. A forralással csak a tiszta oldószer lesz gőz halmazállapotú, amit a bepárló készülékből elvezetnek és külön hűtőben kondenzáltatják. Ebből következik, hogy a részleges anyagmérleg párlatra vonatkozó tagja ($\dot{m}_S \cdot w_S$) mindig nulla, és az anyagmérleg alkalmazása is egyszerűbb.

Bepárló készülékek:

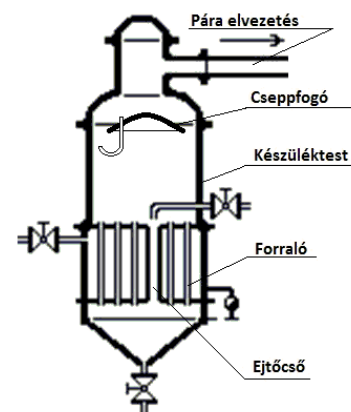
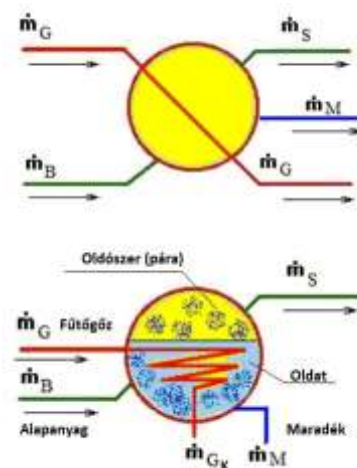
A bepárlóknál három fő készüléktípust különböztetünk meg:

- Belső fűtőterű, általában szabadáramlású, Robert-rendszerű;
- Külső fűtőterű, szabad vagy kényszeráramlású;
- Keverős vagy keverő nélküli filmbepárlók.

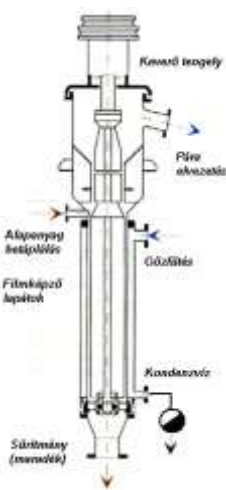
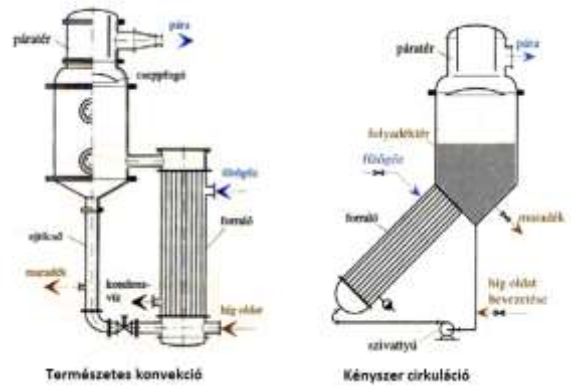
A legegyszerűbb bepárló készülék a belső fűtőterű **Robert-bepárló**. Az alul kúpos készülékben egymással párhuzamos, függőleges **forralócsövek** találhatók. A bepárlóba töltött alapanyag a forralócsöveket ellepi. A forralócsövek közül az egyik nagyobb átmérőjű a többinél. Ezt nevezzük **ejtőcsőnek**. Ebben a csőben kisebb a folyadék hőmérséklete, mint a forraló csövekben, ezáltal természetes áramlás keletkezik, amely az ejtőcsőben lefelé, a forraló csövekben felfelé mozog. A belső fűtőterű bepárlóban szabadáramlás, vagy természetes cirkuláció van. A keletkező oldószerpára a felső, gőzdúsító készülékrész felé áramlik. Az elragadott folyadékcspepeket a **cseppfogó** tartja vissza.

Az oldatra jellemző a koncentrációjától függő **forráspont növekedés**, ami miatt a forralótér hőmérséklete mindig nagyobb, mint a bepárló üzemi nyomásán keletkező oldószerpára forrásponti hőmérséklete. Hosszú csövű bepárlókban a forráspont emelkedést a folyadékoszlop hidrosztatikai nyomása is fokozza.

A forralótér és az ejtőcső elkülönítésével a hőmérsékletkülönbség növelhető, ami a természetes cirkulációnak (**hőkonvekció**) kedvez, ami növeli a bepárlás hatásfokát. A cirkuláció szivattyúval fokozható.



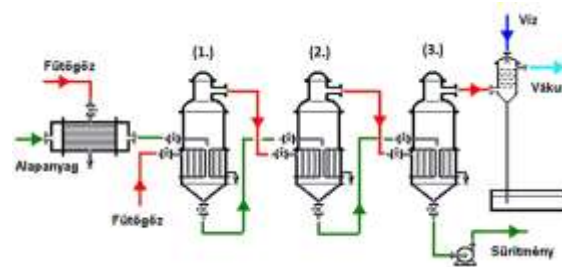
Az ábrákon függőleges és ferdesőves külső forralójú bepárlókat látunk. A **ferdesőves bepárló** előnye, hogy kisebb a habképződés veszélye, és a forraló csőköteg közvetlenül a készüléktest kúpos aljához csatlakoztatható. A ferdesőves készülék további előnye még, hogy a folyadékoszlop magasságából adódó hidrosztatikai nyomás forráspontnövelő hatása a ferde cső miatt csökken, hiszen a tényleges folyadékmagasság kisebb, mint a forralócsövek aktív hossza. Szintén a bepárlás hatásfokát javítja a vákuum alkalmazása, amely forráspontcsökkenést okoz. Vákuumbepárlással az anyagot kíméletesebben forraljuk, és energia-megtakarítás is elérhető. Ennek azért határt szab a vákuum előállításához szükséges többlet energiaigény!



A **filmbepárlók** kívülről fűtött, cső alakú készülékek. Az alapanyagot a bepárlócső belső falára locsolással vezetik. A folyadék a cső falán filmet alkotva halad lefelé. A filmréteg vastagsága több lapátból álló "kenő" keverő szerkezettel állítható be a legkedvezőbb hőátadási körülményhez. A keletkező oldószer pára a cső közepén, tengelyirányban felfelé halad, és a készülék tetejéről távozik.

Többfokozatú bepárlás:

A vákuum-bepárlás továbbfejlesztett változata a **többtestes bepárlótelep**. A berendezésben azt az elvet használják ki, hogy a forralás során keletkező gőzpára alkalmas lehet egy következő készülék fűtésére. Ennek az a feltétele, hogy a következő **fokozatban** az immár fűtésre használt **másodlagos gőz** hőmérsékleténél kisebb legyen az oldat (és oldószere) forrásponti hőmérséklete.

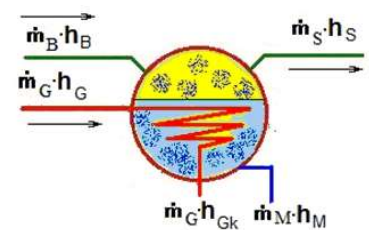


Ezt a második fokozatban alkalmazott nagyobb vákuum segítségével érik el. Természetesen az elv tovább folytatható: a második fokozatból kilépő oldószer-gőz alkalmas a harmadik fokozat fűtésére. A fokozatok végén a már megismert barometrikus keverőkondenzátor látható.

A bepárlás hőmérlege:

A bepárlás számításának legfontosabb része a művelet fűtőgőz igényének megállapítása. A forralócsövekbe vezetett fűtőgőzzel az alapanyag oldatot forráspontig melegítjük, majd az anyagmennyiség alapján kiszámított oldószert elpárologtatjuk. A számításoknál figyelembe kell vennünk:

- A fűtőgőz (primergőz) csak a párolgáshővel fűt;
- A párlat (szekundergőz) forrásponti hőmérséklete alacsonyabb mint az oldat forráspontja;
- Az alapanyagot (betáplálás) előmelegítve vezetik a bepárlóba;
- Az oldat forráspontja vákuum-alkalmazása esetében csökken;



A hőmérleg elemeit egyenletbe rendezve látható, hogy a bepárlásban résztvevő anyagok közül a betáplált oldat, az elvezetett maradék és a fűtéshez használt gőz kondenzátuma folyadék állapotú, míg a fűtéshez használt primer gőz és az oldószer (szekunder) gőze a folyadék forrásponti állapotához képest a gőz párolgáshőjével több. A hőmérleg, az ábra jelöléseivel:

$$m_B \cdot c_B \cdot t_B + m_G \cdot (c_G \cdot t_{Gfp} + \Delta h_G) = m_S \cdot (c_S \cdot t_{Sfp} + \Delta h_S) + m_M \cdot c_M \cdot t_M + m_G \cdot c_G \cdot t_{Gfp}$$

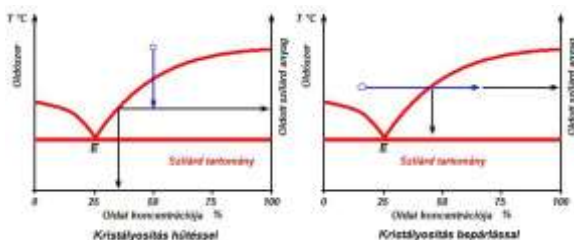
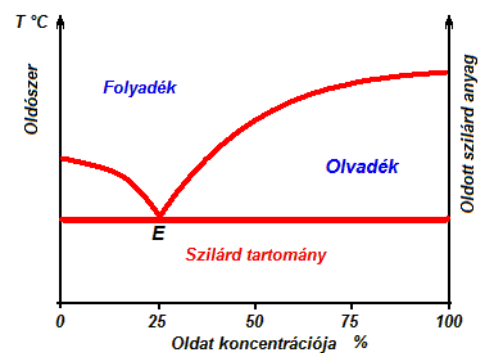
Fontos szempont, hogy a fűtőgőz és az oldószer pára nyomása különböző, mert magához a forralásos hőcseréhez **hőmérsékletkülönbségre** van szükség. Emiatt a kétféle gőz párolgáshője is különböző.

<p>Feladat: Óránként 1 t 12%-os cukoroldatot 20%-ra sűrítünk folyamatos üzemű bepárlóban. Az oldatot 60 °C hőmérsékleten táplálják a készülékbe, forráspontja 102 °C, átlagos fajhője 3,6 kJ/kg°C. Az oldószer víz ($t_S = 100$ °C, $c_S = 4,2$ kJ/kg°C, $\Delta h_S = 2200$ kJ/kg) A bepárló fűtéséhez használt gőz 5 bar nyomású. ($t_G = 150$ °C, $\Delta h_G = 2000$ kJ/kg) Határozzuk meg a keletkezett termék (maradék és párlat) mennyiségét, valamint a fűtéshez szükséges gőz óránkénti mennyiségét!</p>	<p>Megoldás: Első lépésben a bepárló anyagforgalmát határozzuk meg! Írjuk fel az anyagmérleget: $\dot{m}_B = \dot{m}_S + \dot{m}_M$ $\dot{m}_B \cdot w_B = \dot{m}_S \cdot w_S + \dot{m}_M \cdot w_M$, az $\dot{m}_S \cdot w_S = 0$ (tisztá oldószer) miatt írható: $\dot{m}_B \cdot w_B = \dot{m}_M \cdot w_M$, ebből: $\dot{m}_M = \dot{m}_B \cdot \frac{w_B}{w_M}$ $\dot{m}_M = \dot{m}_B \cdot \frac{w_B}{w_M} = 1000 \cdot \frac{12}{20} = \underline{600 \text{ kg/h}}$, és így $m_S = \underline{400 \text{ kg/h}}$</p>
<p>A következő lépésben írjuk fel a bepárlás hőmérlegét, és fejezzük ki belőle a fűtőgőz mennyiségét:</p> $\dot{m}_B \cdot c_B \cdot t_B + \dot{m}_G \cdot (c_G \cdot t_{Gfp} + \Delta h_G) = \dot{m}_S \cdot (c_S \cdot t_{Sfp} + \Delta h_S) + \dot{m}_M \cdot c_M \cdot t_M + \dot{m}_G \cdot c_G \cdot t_{Gfp}$ $\dot{m}_G = \frac{(\dot{m}_S \cdot (c_S \cdot t_{Sfp} + \Delta h_S) + \dot{m}_M \cdot c_M \cdot t_M) - \dot{m}_B \cdot c_B \cdot t_B}{\Delta h_G}, \text{ behelyettesítve:}$ $\dot{m}_G = \frac{(400 \cdot (4,2 \cdot 100 + 2200) + 600 \cdot 3,6 \cdot 102) - 1000 \cdot 3,6 \cdot 60}{2000} = \underline{526,1 \text{ kg/h}} \text{ fűtőgőz}$	

3.1.7. A kristályosítás művelete és készülékei

A kristályosítás olyan szétválasztó művelet, amelynek alkalmazásával a kinyerni kívánt anyagot szilárd kristályok formájában kapjuk. A kristályosítás történhet gáz- vagy gőzfázisból, olvadékból és oldatokból. Az iparban a kristályosítást rendszerint vizes oldatokból végzik, és leggyakrabban a bepárlást követő művelet.

Az anyagok többségének a hőmérséklet emelésével nő az oldhatósága. Az oldódási diagramon négy tartomány különíthető el. A legelső, szilárd fázisban az oldat bármilyen koncentrációja szilárd halmazállapotú. A hőmérséklet növelve az **olvadékban** megkezdődik a kristályok kiválása. Ha az oldat összetétele az „E” (**eutektikus**) összetételnél kisebb, akkor az oldószer, ellenkező esetben az oldott anyag kezd kiválni. A szilárd fázissal adott hőmérsékleten egyensúlyban levő oldatot telítettnek nevezik. A telített oldatokban a kristályok és az oldat között dinamikus egyensúly jön létre.



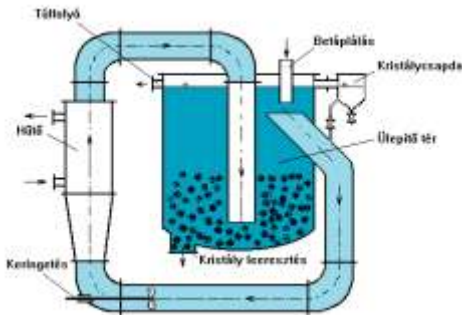
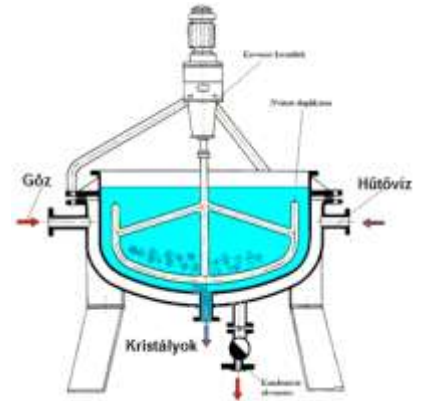
Kristályosítani csak az eutektikus összetételnél nagyobb koncentrációjú oldatból lehet. Ennek elérésére a kristályosítás történhet **hűtéssel** vagy **bepárlással**. Megfelelő (pl. az ábra szerint 50%-os) oldatból hűtéssel kristályosítjuk az anyagot. A művelet vég hőmérsékletén kiválik a 100%-os kristály és visszamarad a (kb. 35%-os) **anyalug**.

Az eutektikus összetételnél kisebb koncentrációjú oldatból hűtéssel az oldószer „kristályai” (pl. vízjég) válnak ki, ezért a koncentrációt bepárlással növelik. A keletkezett termék és a visszamaradó anyalug mennyisége a művelet végpontjában az ábrán látható szerkesztés szerinti vonalhosszakkal arányos.

A kristályosítás folyamata két lépésből áll. Az első lépés a **gócképződés**. Ilyenkor mikroszkopikus méretű kristályok keletkeznek, amelyek a második lépésben, a **kristálynövekedésben** érik el a végleges méretüket. A gócképződést az oldat keverésével, néhány szem apró kristállyal való beoltással segítjük.

Kristályosító készülékek

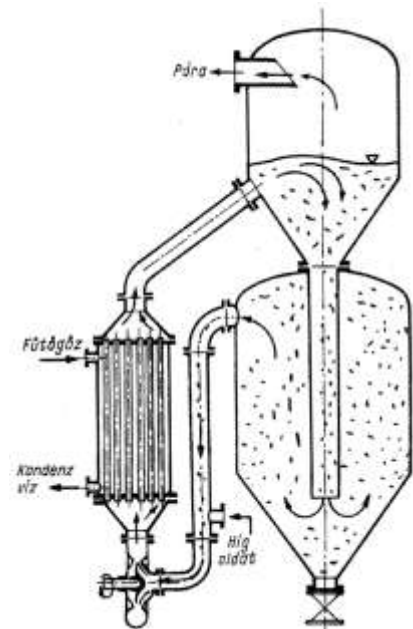
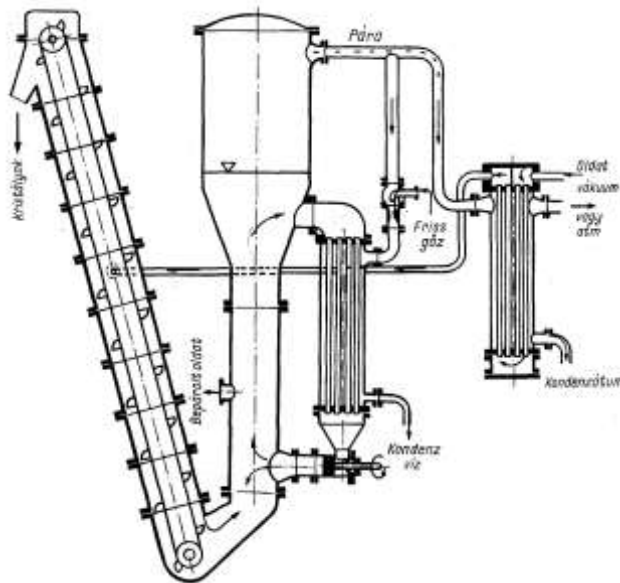
A legegyszerűbb kristályosító készülék a fűthető-hűthető keverős nyitott duplikátor. Szükség esetén a folyadékot gőzzel felmelegítjük, besűrítjük, majd hidegvíz vagy **ipari sólével** lehűtjük. A kristálygóc képződést a keverő segíti. A kristályok a készülék aljáról, megfelelő szelep vagy cellás adagoló alkalmazásával távolíthatók el.



A hűtve kristályosítás jellemző készüléke a **Kristal-készülék**.

A hűtőben túltelített állapotba kerülő anyalúgot szivattyúval keringetve vezetik az ülepítő térbe, ahol megkezdődik a kristályok kiválása. A felfelé áramló folyadék mindaddig emeli a kristályokat, amíg azok szemcsemérete az ülepedéshez szükséges méretet eléri. Ekkor a kristályok lebegő, **fluidizációs** állapotba kerülnek, majd tovább növe, lassan leülepednek. Az anyalúg a túlfolyón távozik.

A **bepárló kristályosítók** jellegzetes készüléke az **Oswald-féle** berendezés, amelyet a jobb oldali ábrán látunk. Ez a készülék is kombinálja a kristálynövesztő fluidizációs eljárást a kristályok ülepitésével. Az oldatból forralással eltávolítják az oldószer egy részét, így a túltelített oldatban megkezdődik a gócképződés, majd a kristályok növekedése.



A bepárló kristályosítók különleges esete a pára-kompressziós berendezés, ami egy **hőhasznosító** eljárás, mert a bepárlással keletkező gőzzel előmelegítjük az oldatot.

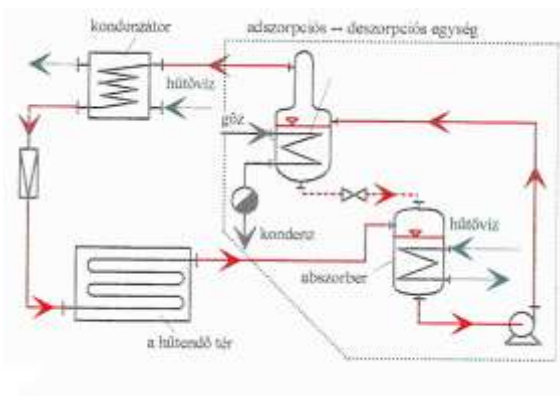
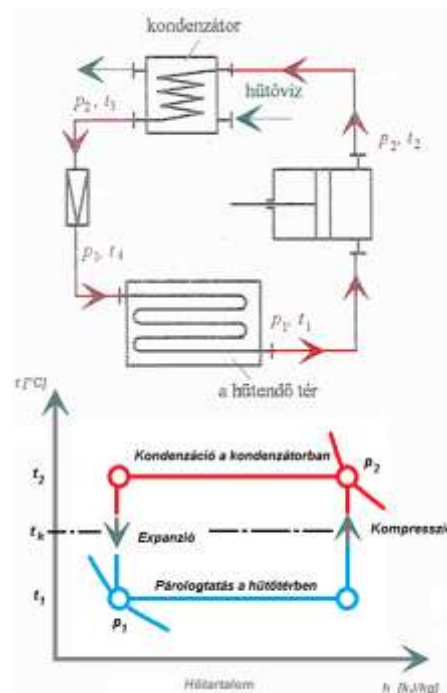
A forraló atmoszférikus vagy vákuum üzemben működik. A keletkező kristályokat serleges elevátorral lehet az ejtőcső teréből kiemelni. A vákuum megtartása érdekében az elevátor egészen a bepárlótér folyadékszintjéig a szembeáramló, előmelegített friss oldatban emeli a kristályokat. Ez befolyásolja a kristályok alakját és tisztaságát is.

Elvileg bármilyen bepárló alkalmas lehet a kristályosításra is, de a gyakorlatban csak külső fűtőterű készülékeket használnak, viszonylag nagy átmérőjű forralócsövekkel, hogy a kristálykiválás okozta eltömítődéseket megakadályozzák.

3.1.8. Hűtőberendezések, hűtéstechnika

A hőátadással járó vegyipari műveletek **hőhordozói** lehetnek természetes és mesterséges anyagok. A természetes hőhordozók közé tartozik a víz, a levegő, míg mesterséges hőhordozónak számít a fűtésre használt gőz, vagy a hűtésre alkalmazott sólé. A környezetnél alacsonyabb hőmérséklet előállítására szolgáló technikai eljárást **hűtésnek** nevezzük, berendezései pedig a **hűtőgépek**.

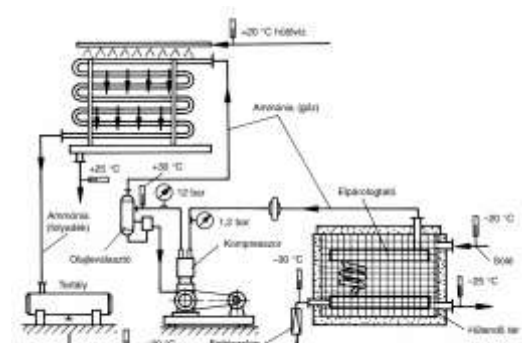
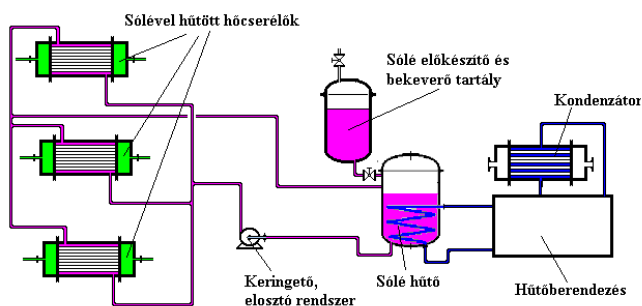
A hűtési eljárás lényegében hőtechnikai **körfolyamat**. A hűtőfolyadék p_1 nyomáson, t_1 forrásponti hőmérsékletű, amely a környezet t_k hőmérsékleténél alacsonyabb. A folyadék az **elpárolgatóban**, ami a hűtőberendezés elkülönített, zárt, **adiabatikus** alkatrésze, úgy párolog el, hogy ehhez a hűtőtérbe helyezett anyagtól, folyadéktól, szilárd tárgytól vonja el a hőt. Az elpárolgatóban elhelyezett anyag tehát lehűl. A gőz halmazállapotú hűtőfolyadékot a kompresszor p_2 nyomásra sűríti. Ezen a nyomáson a hőmérséklete t_2 lesz, ami nagyobb, mint t_k . A gőz halmazállapotú hűtőfolyadék most a kondenzátorban cseppfolyóssá válik, miközben hőmérséklete nem változik. A kondenzációkor felszabaduló hőt a környezet, vagy hűtővíz veszi fel. A hűtőfolyadék nyomása az **expanziós szelepen** keresztül kerül vissza az eredeti p_1 nyomásra – és természetesen t_1 hőmérsékletre – és a körfolyamat kezdődik előlről. A berendezést **kompresszoros hűtőnek** nevezzük. A körfolyamat által bezárt terület nagysága arányos a hűtőberendezés munkavégző képességével.



Az **abszorpciós hűtőberendezés**, amelynek működési folyamatábrája a bal oldali rajzon látható, alapelveiben megegyezik a kompresszoros körfolyamattal megvalósított hűtéssel. A kompresszor szerepét viszont az abszorpciós – deszorpciós egység veszi át. A hűtőtérrel elhagyó pára az abszorberben híg vizes oldatban elnyelődik, majd a forralóban magasabb hőmérsékletű gőzzé alakul, ami a kondenzátorban nyeri vissza eredeti állapotát. A körfolyamat többi része azonos.

Ipari sólé előállítás: (Az ábrát az 1.4.1 fejezetben ismerhettük meg.)

A hűtőberendezések alkalmazási körének egyik fontos példája az ipari sólé előállítás. A sólétartályban elhelyezett csőkígyós hőcserélőben keringetik a hűtőfolyadékot.



A kompresszió és az expanzió a hűtőberendezésben van, amelynek tetejére szerelik a kondenzátort. A sólé koncentrációját az előkészítő, bekeverő tartályban állítják be. A hűtőberendezés elrendezési vázlata és főbb gépei a bal oldali ábrán látható.

3.2. SZÁRÍTÁS ÉS LIOFILIZÁLÁS

A bepárlás és kristályosítás műveletét általában a szárítás követi, amelynek során a szilárd, szemcsés anyag nedvességtartalmát csökkentjük vagy megszüntetjük. A szárítás, mint művelet kettős jellegű:

- **kalorikus**, hőhatására végbemenő elválasztás, amelynek során a nedvesség elpárolog;
- **diffúziós**, anyagátadási jellegű, ami azt jelenti, hogy a nedvességet a hőhordozó közeg veszi fel.

Az ipari gyakorlatban kétféle szárítást alkalmaznak. **Kontakt** szárításról akkor beszélünk, amikor a szárítandó anyag közvetlenül érintkezik a szárítóközeggel, és a hőközlés is ugyanabban a térben történik. **Konvekciós** szárítás pedig akkor következik be, amikor a szárító közeget, lényegében a levegőt, előbb, külön berendezésben felmelegítik, majd ezzel a levegővel zárt rendszerben hajtják végre a szárítást.

3.2.1. A nedves levegő tulajdonságai

A levegő fontos **hőhordozó**. Nagy mennyiségben áll rendelkezésre, hűtésre és fűtésre egyaránt alkalmas. A levegő mindig tartalmaz nedvességet, tehát nem homogén rendszer. A levegő hőtani tulajdonságait az **állapotjellelmzőkkel** minősítjük, amelynek értékei a száraz levegő és a nedvesség arányától függenek.

A levegő nedvességtartalmát abszolút és relatív adatként is értelmezzük. Az **abszolút nedvességtartalom** értékét a levegőben lévő víz és a száraz levegő tömegének arányaként értelmezzük. A nedvesség vízgőz formájában van a levegőben, így mennyiségi aránya a gőz nyomása – mint tenziónyomás – és a levegő aktuális összes nyomása segítségével is kifejezhető. Ezt nevezzük **relatív nedvességtartalomnak**.

A relatív nedvességtartalom közvetlenül mérhető, egyes műanyagok, illetve a hajszál, vagy hosszú állatszór nyúlása a relatív nedvességtartalommal arányos. Maga a relatív nedvesség a $\varphi = \frac{p_{gőz}}{p_{telített\ gőz}}$ %

formában számítható, ahol $p_{gőz}$ a vízgőz parciális nyomása a levegőben, $p_{telített\ gőz}$ pedig a gőz tenziónyomása a levegő hőmérsékletén. Ebből az abszolút nedvesség:

$$x = \frac{M_{v\acute{z}}}{M_{leveg\acute{o}}} \cdot \frac{\varphi \cdot p_{tg}}{p_{\acute{o}sszes} - \varphi \cdot p_{tg}} \text{ kg/kg}, \text{ ahol: } M \text{ a molekulat\acute{o}meg, } \varphi \text{ a leveg\acute{o} relat\acute{i}v nedvess\acute{e}gtartalma, } p_{\acute{o}sszes} \text{ a leveg\acute{o} nyom\acute{a}sa \acute{e}s } p_{tg} \text{ a leveg\acute{o}ben l\acute{e}v\acute{o} g\acute{o}z tel\acute{i}tett g\acute{o}znyom\acute{a}sa.$$

Nem egyszerőbb a levegő hőtartalmának meghatározása sem, pedig erre a szárítási művelet végrehajtásához szükségünk van.

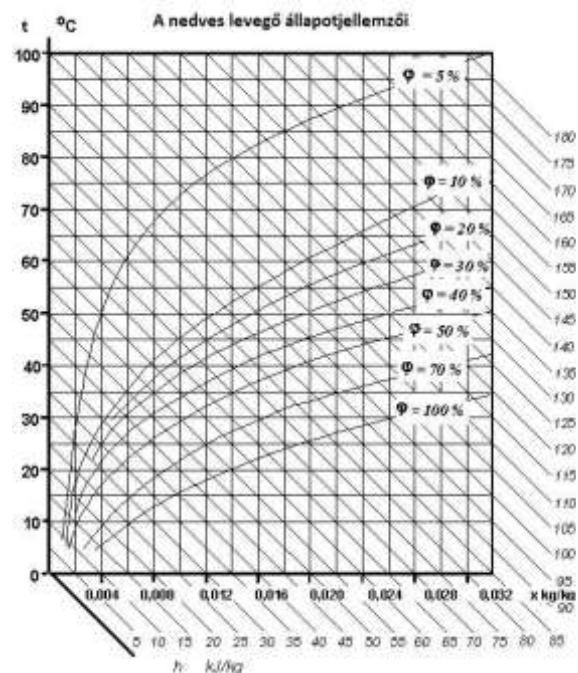
$$h = c_{leveg\acute{o}} \cdot t_{leveg\acute{o}} + x \cdot (c_{g\acute{o}z} \cdot t_{leveg\acute{o}} + \Delta h_g) \text{ [kJ/kg]}$$

A levegő hőtartalma a száraz levegő, mint gáz és a benne lévő vízgőz hőtartalmának tömegarányos keverékeként határozható meg:

A nedves levegő állapotjellelmzői a fentiek alapján szoros összefüggésben állnak. A levegő **hőmérséklete**, relatív és abszolút **nedvességtartalma** és **hőtartalma** ezért akár egy diagramban is ábrázolható. A matematikai összefüggések alapján, speciálisan szerkesztett diagramot a nedves levegő állapotdiagramjának, vagy egyszerűen csak **h-t-x** diagramnak nevezzük.

A diagram használatához elég két adatot ismerni, mert a kétdimenziós koordináta rendszerben ezek már kijelölik a levegő állapotát jelző pontot, amiből a másik két, ismeretlen adat is leolvasható.

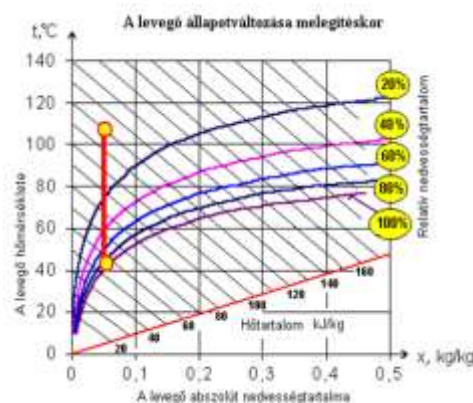
A diagram kezdő pontját általában a levegő hőmérséklete és relatív nedvességtartalma jelöli ki.



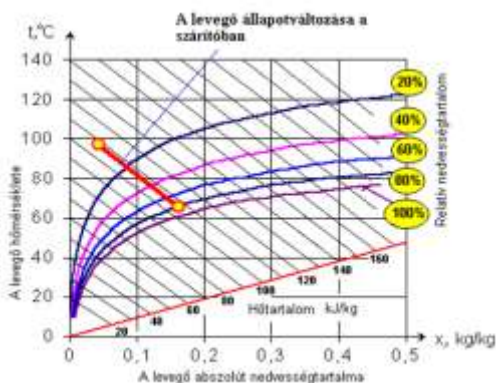
<p>Feladat: Határozzuk meg a 30 °C hőmérsékletű, 50% relatív nedvességtartalmú levegő állapotjellemzőit!</p> <p>Megoldás: A diagram alapján: $x = 0,011 \text{ kg/kg}$, $h = 58 \text{ kJ/kg}$</p>	<p>Gyakorló feladat: Számítsuk ki az előző oldalon megadott összefüggések segítségével a pontos értékeket. A vízgőz tenzió és párolgáshő értékeit vízgőz táblázatból keressük ki!</p> <p>A pontos érték: $x = 0,0134 \text{ kg/kg}$, $h = 65 \text{ kJ/kg}$</p>
<p>A pontos érték kiszámításánál és a diagram szerkesztésénél egyaránt abból indulnak ki, hogy a levegő hő-tartalmát egyrészt a száraz levegőre vonatkoztatva számítják ki, azaz $h = h_{\text{levegő}} + xh_{\text{víz}}$. Másrészt a vízgőz állapotjellemzőit, fajhőjét és párolgáshőjét a 0 °C állapotú gőzből határozzák meg: $c = 1,97 \text{ kJ/kg}^\circ$, valamint $\Delta h_{\text{gőz}} = 2493 \text{ kJ/kg}$! A különböző szakirodalmak más és más kiinduló pontot tartalmaznak, de az értékek és a későbbi számításokhoz használt diagramok között nincs jelentős eltérés.</p>	

3.2.2. A levegő állapotváltozása melegítéskor

A konvekciós szárítást meleg levegővel végezzük. A levegőt külön melegítjük fel **kalorifernek** nevezett hőcserélőben. A melegítés során a levegő hőmérséklete és hőtartalma is megnő. Fontos tulajdonsága viszont, hogy az abszolút nedvességtartalma nem változik! Ebből következik, hogy a kiinduló adatok (t_0 , Φ_0) valamint a melegítés véghőmérsékletének (t_1) ismeretében a diagram segítségével az állapotjellemzők új pontját, és ebből az új h_1 hőtartalmat is meg lehet állapítani. A h_1 és h_0 különbségéből a levegő által felvett hőmennyiség egyszerűen számítható, valamint, ha a fűtést gőzzel végezzük, akkor ebből a szükséges gőzmennyiség is meghatározható!



3.2.3 A levegő állapotváltozása szárításkor

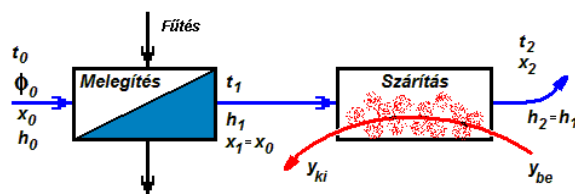


A szárító a környezetétől szigetelt, hőtechnikai szempontból adiabatikus, zárt tér. A t_1 hőmérsékletű és h_1 hőtartalmú levegő csak a szárítandó anyaggal érintkezik, és miközben annak nedvességét részben vagy egészen átveszi, lehűlés közben az abszolút nedvességtartalma, és ezzel a gőz párolgáshőjével képviselt energiataralma úgy változik, hogy a hőtartalma állandó marad ($h_2 = h_1$).

A szárítás során a levegő $x_2 - x_0$ kg/kg nedvességet vesz fel. Lehűlése legfeljebb a $\Phi_2 = \Phi_0$ értékig tarthat, ellenkező esetben a szárító környezetében kiválik a pára. A gyakorlatban azonban, a berendezés hővesztése miatt még ezt az értéket sem lehet elérni.

3.2.4. A konvekciós szárítás művelete és számításai

A konvekciós szárításnál két műveleti lépésből áll. Először a levegőt - állandó nedvességtartalom mellett - felmelegítjük, majd állandó hőtartalommal szárítunk vele. A levegő nedvességtartalma $x_2 - x_0$ értékkel nő, a szárítandó anyagé pedig $y_{be} - y_{ki}$ értékkel csökken! Az anyagmennyiséget célszerű azokra az anyagáramokra felírni, amelyek a művelet során nem változnak, tehát száraz levegő és száraz anyag.



A szárítandó anyag nedvességtartalmát kétféleképpen adhatjuk meg. A tényleges, azaz **összes anyagra vonatkoztatott** nedvességtartalom (y) általában a kiinduló érték, és a technológiai adatok is ezt írják elő. Például: *szárítsunk 1 t 15% nedvességtartalmú anyagot! A művelet végén az anyag nedvességtartalma 3% legyen!* Csakhogy a művelet végén az anyag mennyisége már nem 1 t, hanem annál a szárítás során elvont vízzel kevesebb! És ennek a kevesebb anyagnak a 3%-a víz. Az összes száraz anyag mennyisége nem változik. A szárítandó anyag $m_{\text{összes.be}} = m_{\text{száraz}} + m_{\text{víz}} = m_{\text{száraz}} + m_{\text{összes.be}} \cdot y_{\text{be}}$ [kg]

Ugyanez igaz a művelet végére is: $m_{\text{összes.ki}} = m_{\text{száraz}} + m_{\text{víz}} = m_{\text{száraz}} + m_{\text{összes.ki}} \cdot y_{\text{ki}}$ (kg).

Ha a két anyagból a száraz anyagot kifejezzük, akkor:

$$m_{\text{száraz}} = m_{\text{összes.be}} \cdot (1 - y_{\text{be}}) = m_{\text{összes.ki}} \cdot (1 - y_{\text{ki}})$$

összefüggést kapjuk, amiből a művelet végén kapott termék: $m_{\text{összes.ki}} = m_{\text{összes.be}} \cdot \left(\frac{1-y_{\text{be}}}{1-y_{\text{ki}}}\right)$ [kg].

Az eltávolítandó nedvesség: $m_{\text{víz}} = m_{\text{összes.be}} - m_{\text{összes.ki}}$

Bár a fentiekben bemutatott számítási módszer jobban követi az ipari gyakorlatot, mégis gyakran találkozunk a **száraz anyagra megadott** nedvességtartalom fogalmával. Ez az anyagban lévő víztartalom és a szárazanyag mennyiségének hányadosa: $u = \frac{m_{\text{víz}}}{m_{\text{száraz}}}$. vagy másképpen az $u = \frac{y}{1-y}$ is írható!

Ezzel leegyszerűsödik az eltávolítandó víz mennyiségének számítása: $m_{\text{víz}} = m_{\text{száraz}} \cdot (u_{\text{be}} - u_{\text{ki}})$.

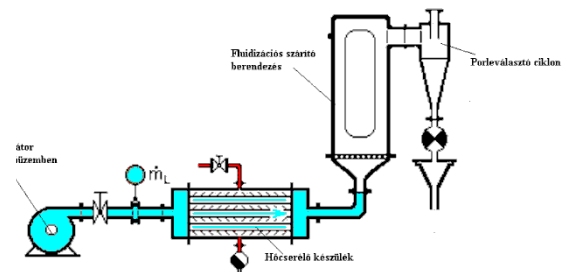
A szárításhoz szükséges levegő mennyiségét annak alapján határozzuk meg, hogy a száraz levegőre vonatkoztatott x nedvességtartalom, a diagram szerint mennyit változik. Általánosan írható:

$$m_{\text{száraz.levegő}} \cdot (x_2 - x_0) = m_{\text{víz}} = m_{\text{száraz.anyag}} \cdot (u_{\text{be}} - u_{\text{ki}})$$

A művelethez szükséges összes levegő mennyisége természetesen: $m_L = m_{\text{száraz.levegő}} \cdot (1 + x_0)$ [kg]

Feladat:

Fluidizációs szárítóban óránként 25 tonna nedves műtrágya granulátumot szárítunk levegővel. A granulátum összes anyagra vonatkoztatott nedvességtartalma 14%. A végterméket legfeljebb 2%-os nedvességtartalommal lehet csomagolni. Határozzuk meg a szárításhoz óránként szükséges levegő mennyiségét, ha átlagosan 60% relatív nedvességtartalmú, 18 °C, hőmérsékletű levegőt az előmelegítőben 90 °C-ra melegítjük fel, és a szárítóban 50 °C hőmérsékletre hűl vissza!



Megoldás:

Első lépésben határozzuk meg az eltávolítandó nedvességet! Az anyag mennyisége a művelet végén: $m_{\text{összes.ki}} = m_{\text{összes.be}} \cdot \left(\frac{1-y_{\text{be}}}{1-y_{\text{ki}}}\right)$
 $m_{\text{összes.ki}} = 25 \cdot \left(\frac{1-0,14}{1-0,02}\right) = 21,9$ tonna.
 A szárításnál $m_{\text{víz}} = 25 - 21,9 = 3,1$ t vizet kell eltávolítani.

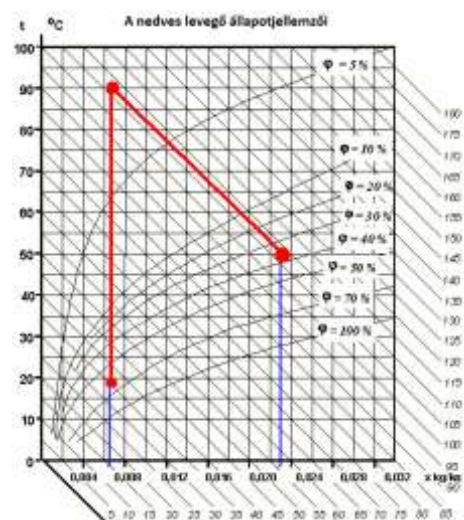
A szárító levegő a $h-t-x$ diagram alapján:

$$x_0 = 0,0065, \text{ és } x_2 = 0,023 \text{ kg/kg}$$

A levegő szükséglet: (az összes levegő!)

$$\dot{m}_L = (1 + x_0) \cdot \left(\frac{\dot{m}_{\text{víz}}}{x_2 - x_0}\right) =$$

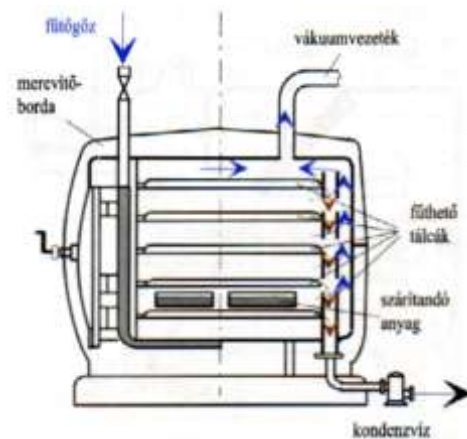
$$\dot{m}_L = (1 + 0,0065) \cdot \left(\frac{3,1}{0,023 - 0,0065}\right) = \underline{\underline{189,1 \text{ t/h}}}$$



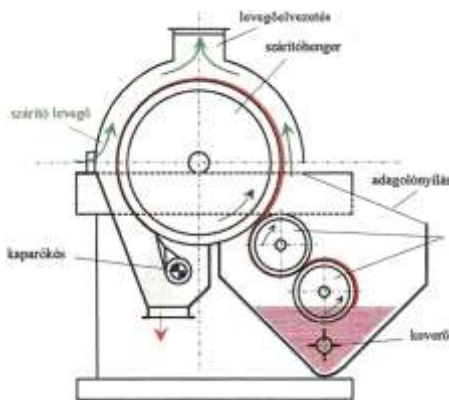
3.2.5. Szárítóberendezések

Az ipari szárítók kontakt vagy konvektív típusúak lehetnek. A legegyszerűbb készülékek olyan fűthető szekrények, amelyekben a szárítandó anyagot tálcákra helyezik. A tálcák vagy közvetlenül fűthetők, például gőzzel, elektromos árammal, vagy külön előmelegített levegőt vezetnek a **szárítószekrénybe**. A jobb hatásfok elérése érdekében vákuumot is alkalmaznak.

A konvektív szárítók jellegzetes készüléke az előző oldal feladata kapcsán megismert fluidizációs szárító. A levegő előmelegítését gőzfűtésű csököteges hőcserélőben végzik. A meleg levegővel a fluidizációs készülékben lebetgetik a nedves, szemcsés anyagot. A gázsebességet célszerűen úgy állítják be, hogy a szárítás végén az anyag a ciklonon keresztül távozzon.



<p>Feladat: Határozzuk meg az előző oldalon tárgyalt szárítási feladathoz használt levegő felmelegítéséhez szükséges gőz mennyiségét, ha a fűtőgőz 3 bar nyomású!</p> <p>Megoldás: A <i>h-t-x</i> diagram alapján a levegő hőtartalma: $h_0 = 36 \text{ kJ/kg}$ –ról $h_1 = 108 \text{ kJ/kg}$ –ra nő. A 3 bar nyomású gőz párolgáshője: 2158 kJ/kg</p> $\dot{m}_{\text{gőz}} = \dot{m}_L \cdot \frac{h_1 - h_0}{\Delta h_g} = 189,1 \cdot \frac{108 - 36}{2158} = \underline{6,3 \text{ t/h}}$	<p>Gyakorló feladat: Kontakt szárító berendezésben 5 kg $0,08 \text{ w\%-os}$ nedvességtartalmú (vizes) anyagot szárítunk. légtörny nyomáson. Számítsuk ki az energia szükségletet, ha a teljes nedvességet el kívánjuk távolítani! Az anyag $20 \text{ }^\circ\text{C}$ hőmérsékletű volt. A szilárd anyag fajhője: $0,88 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$! A vízgőztáblázatokból kikeresett adatok alapján: ($c = 1,146 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$), $Q = \underline{1355 \text{ kJ}}$</p> <p>Hány százalékkal csökken az energiaigény, ha a szárítást $0,6 \text{ bar}$ nagyságú vákuumban végezzük? $\eta = \underline{5,6\%}$</p>
--	---

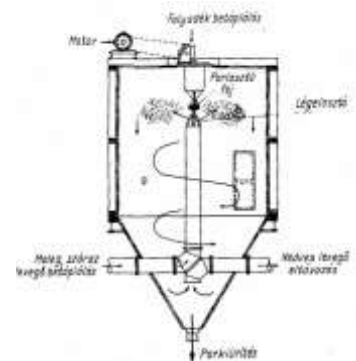


Pépes, pasztaszerű anyagok, szuszpenziók szárítására alkalmazott berendezés a **hengeres kontakt szárító**. A szárítandó anyag az adagolónyíláson át kerül a készülékbe, ahol az egymással szemben forgó hengerek „kenik” a szárítóhengerre. Nagyobb méretű hengereket belülről is fűteni lehet. A nedvesség a szárítólevegővel felül távozik, míg az anyagot a hengerről kaparókés távolítja el. A száraz, szemcsés anyagot csigas adagoló vezeti ki a készülékből.

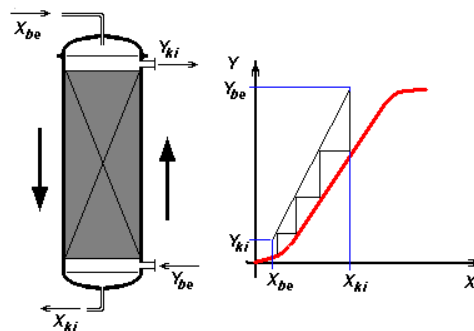
A **porlasztva szárítók** szemcsés anyagot tartalmazó folyadékok „szárítására” alkalmasak úgy, hogy egyúttal a folyadékot vagy annak egy részét elpárologtatják.

Az ábrán látható Niro-rendszerű szárító tej- vagy tojáspor, tápszer és mosószer előállítására alkalmas.

A **liofilizálás** vagy fagyasztva szárítás főleg az élelmiszeriparban használatos művelet. Az anyagot először megfagyasztják majd erős vákuumban a vizet a jégkristályokból a szárító közegbe **szublimáltatják**.



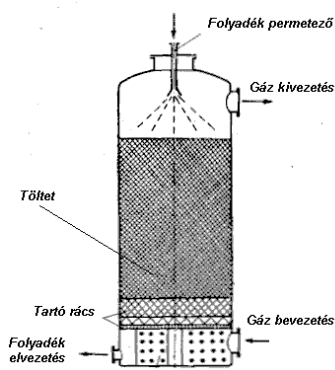
Az abszorpciót a korszerű ipari gyakorlatban folyamatos berendezésben hajtják végre. A hosszúkás, toronyszerű készülékben egymással szemben áramlik a gázelegy és az elnyelő folyadék. A művelethez szükséges érintkezést különleges **tányérszerkezet** vagy **gyűrű alakú töltet** biztosítja. Az elvi megoldás a jobb oldali ábrán látható. A gázelegy kezdeti koncentrációját a Y_{be} mólarányal jellemezzük. Ez található a torony alján az X_{ki} összetételű, már az elért oldatkonzentrációjú abszorbenssel. A gáz felfelé áramlik. Az abszorbenst, amelynek mólaránya X_{be} , és ez akár nulla is lehet, a torony tetején vezetik be, ahol a távozó tisztított gáz Y_{ki} összetételével találkozik.



Az művelet anyagmérlegét a semleges hordozó gázra (**inert gáz**) célszerű felírni, az előző pontban tárgyalt szárításhoz hasonlóan:

$$\dot{m}_G \cdot (Y_{be} - Y_{ki}) = \dot{m}_L \cdot (X_{ki} - X_{be}), \text{ és ebből a szükséges abszorbens: } \dot{m}_L = \dot{m}_G \cdot \frac{(Y_{be} - Y_{ki})}{(X_{ki} - X_{be})}, [\text{kg/s}],$$

természetesen a teljes oldószer mennyisége itt is: $\dot{m}_{\text{összes}} = \dot{m}_L \cdot (1 + X_{be})!$

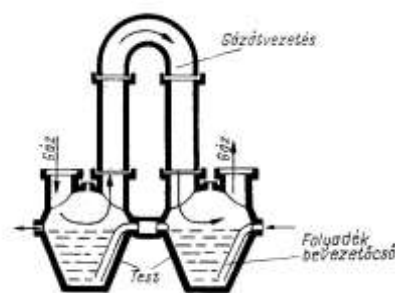


Az elvi ábrán a művelethez szükséges berendezés jellemző tulajdonságait is tervezhetjük. Az **egyensúlyi diagram** a folyadék és gázfázisok közötti egyensúlyt tartalmazza, a már tanult $y = k \cdot x$ összefüggés szerint, ahol k az egyensúlyi állandó, matematikai szempontból az egyensúlyi függvény meredeksége. A diagram elvileg egyenes, de a gyakorlatban az origó-közeli vége, és a magas koncentrációjú egyensúlyt tartalmazó másik vége enyhén görbül.

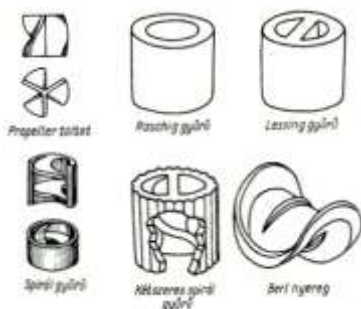
Az abszorber két végpontjára jellemző X-Y pontpárosokat bejelölve, az abszorpció **munkavonalát** rajzolhatjuk meg. A munkavonal azt mutatja meg, hogy az egymással szemben áramló anyagok milyen „távolságra” vannak az egyensúlyi állapottól.

Miután az abszorpció, természeténél fogva, egyensúlyra törekszik, a munkavonal és az egyensúlyi vonal közé szerkesztett „**lépcsőkkel**” meghatározhatjuk a művelet végrehajtásához szükséges fokozatok számát.

Tányéros készülékeknél, vagy egymással összekapcsolt kerámia abszorberekénél (**turillok**) - lásd jobb oldali ábra – ezek a fokozatszámítási módszerek egyértelműek. Ahány lépcsőt (tányért) rajzoltunk, annyi fokozatra vagy készülékre van szükség.



A különböző alakú – gyűrű, osztott gyűrű, nyereghez hasonló alakú fém vagy kerámia töltetes toronyban azonban nincs tányér, a fokozatok számát itt a töltet magasságával határozzák meg. A töltet gyári (gyártási) adata az egységnyi hosszúságú, egymásra rétegezett töltet fokozatszámának való megfelelése. Ezt az értéket **átviteli egységmagasságnak** nevezik, és HTU számként jelölik, az angol szakirodalmi megnevezés (*High Transfer Unit*) szerint.

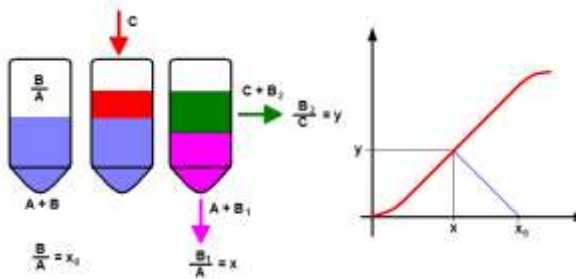


A töltet HTU száma megadja, hogy egységnyi magasságban rétegezett töltet hány elméleti fokozatnak, tányérnak felel meg.

A bal oldali ábra néhány jellegzetes töltet-típust mutat be. A töltetet szabálytalan, ömlesztett állapotban helyezik el a toronyszerű készülékben. Alul erős tartórács tartja. Ha a töltet magassága túl nagy, a kedvezőbb terhelési viszonyok miatt több tartórácscsal osztottá tehető a torony.

3.3.2. Az extrakciós műveletek és berendezéseik

Az extrakció az ad- és abszorpcióhoz jellegében és főbb tulajdonságaiban nagyon hasonló művelet. **Kivonatolásnak** is nevezik, mert az általában két komponenst tartalmazó szilárd anyagból vagy folyadékelegyből oldószer segítségével az egyik komponenst kioldjuk. Szilárd anyagok extrakcióját főleg a gyógyszeriparban alkalmazzák, ahol a rostos növényi anyagból oldószerrel kivonják a hasznosítható illó szerves folyadékot. Ezért az eljárást **kilúgozásnak** vagy **drogextrakciónak** is nevezik. Folyadékelegy szétválasztásánál olyan oldószert használnak, amely az egyik komponenst oldja – elegyet képez vele –, a másikat nem. Ezt a műveletet **szolvens extrakciónak** is nevezik.



A művelet a bal oldali ábrán követhető. Az eredetileg A+B komponensekből álló $x_0 = B/A$ koncentrációjú anyagból a „B” komponenst szeretnénk kioldani úgy, hogy a termékben „A” már ne legyen. (Megjegyzés: ez a feltétel desztillációnál soha nem teljesül!) A „C” oldószer annyira szelektív, hogy B-vel képes elegyet képezni, de A-val nem. A „C” hozzáadása után megindul „B” átoldódása, diffúziója, „C” felé, addig, amíg a kialakuló két fázis között a **megoszlási hányados** által meghatározott egyensúly létre nem jön.

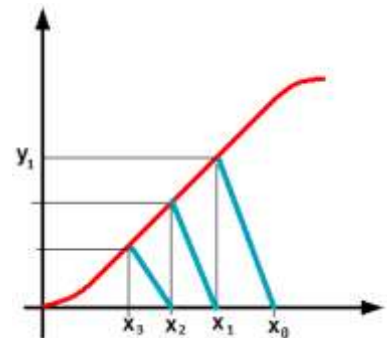
A művelet végén keletkező y összetételű fázist **extraktumnak**, a maradék x -et **raffinátumnak** nevezzük. A két fázis közötti egyensúlyt az egyensúlyi, vagy másképpen megoszlási diagram ábrázolja. A művelet **munkavonala** az x_0 pontból kiinduló és $y = K \cdot x$ egyensúlyig húzható egyenes. K a **Nerst-féle** megoszlási hányados.

A műveleti számítások során két adatot kell meghatározni:

- az extrakcióhoz szükséges oldószer mennyisége;
- folyamatos extrakció vagy ismétlődő extrakció esetén a fokozatok vagy az ismétlődések száma.

Ez utóbbi számítás hasonlít az abszorpciónál tanultakhoz, azzal az eltéréssel, hogy a következő fokozat, vagy a következő lépcső általában tiszta oldószer hozzáadást jelenti.

A jobb oldali ábrán látható, hogy $x_0 - x_3$ között fokozatosan csökken az alapanyagban lévő oldható komponens, de csökken az extraktum koncentrációja is.



Az extrakció anyagmérlege:

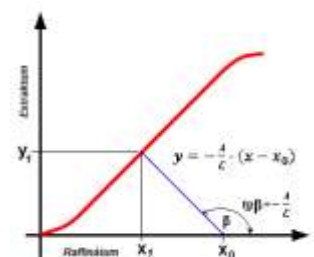
Ha az eredeti anyagunk komponenseit (m_A) „A”-val és (m_B) „B”-vel jelöljük, amelyek közül „B” képes az oldószerrel is elegyet alkotni, valamint az oldószer (m_C) = „C” akkor az extrakció részleges anyagmérlege, azokkal a mennyiségekkel, amelyek nem változnak:

$$A \cdot x_0 = A \cdot x + C \cdot y, \text{ illetve a többfokozatú extrakció első fokozatára: } A \cdot x_0 = A \cdot x_1 + C \cdot y_1$$

Megjegyzés: A pontosság érdekében ne felejtjük el, hogy az anyagmérleg eredeti alakja mind kiinduláskor, mind a művelet végén tartalmazza valamennyi anyagot: $A + B + C = A + B_1 + C + B_2$, de a részleges anyagmérleg felírásakor a kiindulási $C \cdot y_0$ elhagyható, mert y_0 értéke 0!

Az anyagmérleg segítségével több számítás is elvégezhető. Egyrészt meghatározhatjuk egy ismert megoszlási hányadosú rendszer extrakciójához szükséges oldószer mennyiségét, vagy a fenti ábra szerint az ismétlődően állandó oldószerrel való extrakcióhoz szükséges fokozatok számát, vagy egyszerűen csak az oldószer beadagolása után keletkező termékek összetételét.

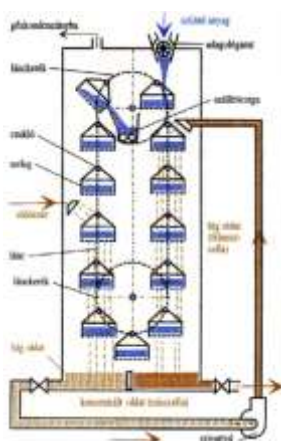
Ehhez nyújt további segítséget az $y = -\frac{A}{C} \cdot (x - x_0)$ munkavonal egyenlet!



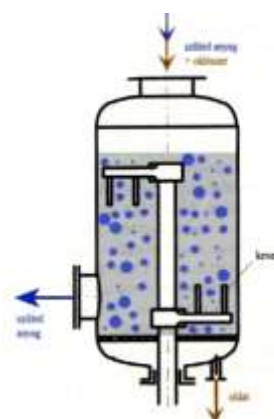
<p>Feladat: Acetonnal szennyezett ipari vizet olyan szerves oldószerrel extrahálunk, amely a vízzel nem elegyedik. A rendszer megoszlási hányadosa: $k = 1,8$. A víz szennyezettsége 30%. Az egy műveleti ciklusban feldolgozott anyagmennyiség 2 tonna, amelyhez 500 kg extraháló szert adunk. A művelet végén szétválasztjuk a keletkezett fázisokat. Hány százalék lesz a tisztított ipari víz acetontartalma?</p> <p>Végezzük el a számítást „visszafelé”! Határozzuk meg az extrakcióhoz szükséges oldószer mennyiségét, ha a tisztított vízben az első lépés után 20,6% acetontartalom maradhat!</p> <p>A feladatot a részleges anyagmérleg felírásával és megfelelő átrendezésével oldhatjuk meg, az eredmény természetesen 500 kg oldószer lesz!</p>	<p>Megoldás: A szennyezett víz (A) kezdeti koncentrációja alapján az acetont (B) tényleges mennyisége: $m_B = m_{összes} \cdot x_B = 2000 \cdot 0,3 = 600 \text{ kg}$ A víz mennyisége 1400 kg, ami nem változik, az acetont pedig 600 kg, ami megoszlik a víz és az oldószer (C) között a $k=1,8$ egyensúlyig. Csak az anyagindexekkel felírva: $k = \frac{\frac{B_2}{C}}{\frac{B_1}{A}}$, azaz $k = \frac{500}{\frac{B_1}{1400}}$ és $600 = B_2 + B_1$ $B_1 = 600 - B_2$ behelyettesítéssel: $k \cdot \frac{(600 - B_2)}{1400} = \frac{B_2}{500}$ ebből $B_2 = 234,7 \text{ [kg]}$ $B_1 = 365,22$ és $x_{raf.} = \frac{365,2}{1400 + 365,2} \% = \underline{20,6 \%}$</p>
<p>Feladat: 1,4-dioxán és víz azeotróp elegyet képez, ezért desztillációval nem választható szét, de benzol képes a dioxán átoldására. Határozzuk meg a víz végső dioxán tartalmát, ha 150 kg 20%-os anyaghoz egymás után ötször 100 kg benzolt adagolunk, majd a fázisok szétválasztása után az extraktumot elválasztva, a következő lépésben ismét friss oldószert használunk. Az extrakció megoszlási hányadosa $k = 1,32$.</p> <p>Folytassuk a számítást az ötödik lépésig úgy, hogy a raffinátumban a 120 kg víz mellett mindig az új B_x maradék dioxán van. (először 14,29 kg)</p>	<p>Megoldás: A dioxán és a víz kezdeti mennyisége: $m_B = m_{összes} \cdot x_B = 150 \cdot 0,2 = 30 \text{ kg (dioxán)}$ és $150 - 30 = 120 \text{ kg víz}$, ebből a tömegarány: $x_0 = \frac{30}{120} = 0,25$, Az oldószer hozzáadása után $A \cdot x_0 = A \cdot x_1 + C \cdot y_1$ amiből: $x_1 = \frac{A \cdot x_0}{(A + C \cdot k)}$ $x_1 = \frac{120 \cdot 0,25}{(120 + 100 \cdot 1,32)} = \underline{0,119}$ ($B_1 = 14,29 \text{ kg}$) $x_2 = \frac{120 \cdot 0,119}{(120 + 100 \cdot 1,32)} = \underline{0,056} \dots$ ($B_2 = 6,8 \text{ kg}$) Az ötödik lépés után $x_5 = \underline{0,0061}$ ($B_5 = 0,81 \text{ kg}$) és a raffinátum tömegszázalékos koncentrációja 0,6%</p>

Extrakciós berendezések

A legegyszerűbb szilárd-folyadék extraháló készülék a jobb oldali ábrán látható keverős tartály. A szilárd anyagot felül adagolják a berendezésbe, hozzáadva az extraháló szert. Megfelelő ideig keverve a kilúgozás végbemegy. A tartály aljára szerelt szűrőrács visszatartja a rostos növényi anyagot, míg az oldat (extraktum) egy alsó leürítőn keresztül távozik.



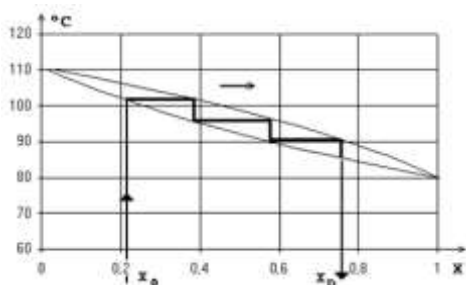
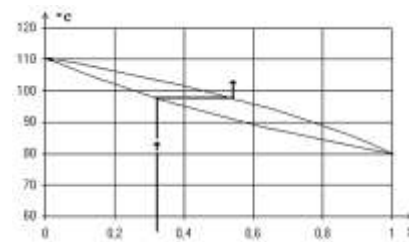
Lényegesen hatékonyabb a balra látható folyamatos üzemű **Bollmann-extraktor**. A végtelenített vonóláncre akasztott, alul rácsos kosarakba folyamatosan adagolják a rostos növényi anyagot (az ábra jobb oldalán). A friss oldószer viszont a készülék baloldalán érkezik. Így először ellenáramú extrakció valósul meg a felfelé haladó, részben már kilúgozott anyagú kosarakban, míg az ellenkező oldalon egy irányba halad az anyag is és a készülék alján elhelyezett gyűjtőből átszivattyúzott híg oldat is. Az első gyűjtő osztott kivitelű, a jobboldali felében már a koncentrált oldat (extraktum) gyűlik össze, míg a kilúgozott növényi anyagot a berendezés tetején lévő csigás adagoló távolítja el. A körbejáró kosarak helyett újabban forgótányéros osztott szitát (**rotocell extraktor**) alkalmaznak, ami hasonló elven működik.



A forrásban lévő folyadék felett kialakuló gőztérben az illékonyabb komponens addig dúsul, amíg az egyensúlyi állapot létre nem jön. A már tanult általános összefüggés a lepárlásnál módosul. Az egyensúlyt az illékonyabb komponens (B) tenzió nyomásának és az összes nyomásnak a hányadosa határozza meg.

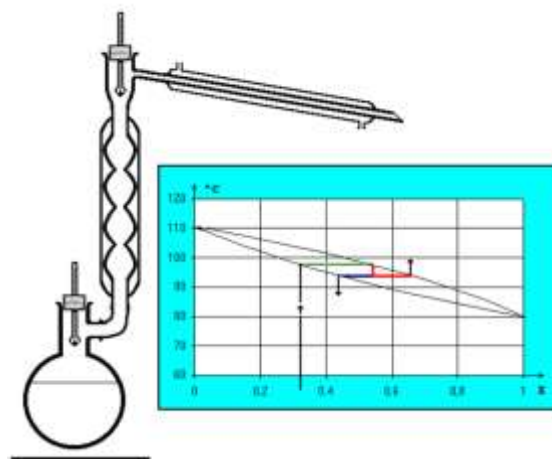
$$y = k \cdot x, \text{ itt } y = \frac{p_B^0}{p_{\text{összes}}} \cdot x$$

Az egyszerű desztilláció során a folyadékfázis feletti gőzt állandóan elvezetjük, és hűtőben kondenzáltatva külön gyűjtjük össze. Ezáltal a forralóban lévő folyadék az illékonyabb komponensben szegényedik, a forráspontja folyamatosan emelkedik, „vándorol” balra. A folyamatot vizsgálva megállapítható, hogy a desztillációval elérhető termék-koncentráció nem független az alapanyagtól, mert az x_0 kezdeti koncentrációval a t_0 forrásponti hőmérsékleten y_0 gőzfázis koncentráció tart egyensúlyt. Ha ezt a gőzt elvezetjük, az x értéke x_0 -hoz képest csökkenni fog, amivel együtt az y is csökken.

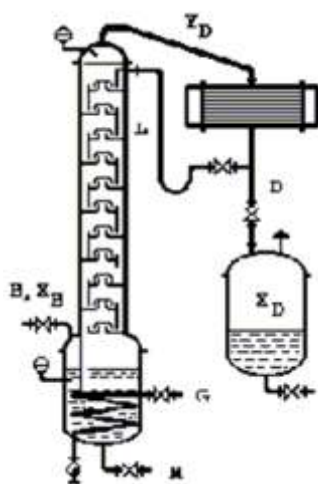


A probléma részben kezelhető, ha a keletkezett terméket többször ledesztilláljuk, de ez azzal jár, hogy a végtermék mennyisége folyamatosan kevesebb és kevesebb lesz, miközben az üstmaradék is tartalmaz szétválasztásra váró, illékonyabb komponens. Ennek ellenére az élelmiszeripari desztillációnál – pl. szeszfordzóban – alkalmazzák az ismételt lepárlást a koncentráció növelése érdekében.

A folyamatos üzemű, a szétválasztást az alapanyagtól függetlenné tevő eljárás elvi alapját a **deflegmáció** nevű eljárás teremtette meg. A forralóban keletkező párlatot kivezetik a forralótérből, de egy részét kondenzáltatva lassan visszacsepegtetik. A lefelé áramló, az alapanyagnál nagyobb koncentrációjú folyadék egy része a felfelé szálló gőztől újra elpárolog, de ez már egy új egyensúlyi állapot, magasabb gőzkoncentrációval.



Ezt az anyagot vezetjük ki a rendszerből termékként. A folyamat működési elvét a jobb oldali ábrán lévő diagram mutatja. A visszacsepegtetés és továbbhaladás mennyiségi arányát **refluxarány** (R), a visszacsepegtetést **reflux** (L) nevezzük



Ha a desztillálót elhagyó termék (m_D) [kg] mennyiségét D-vel, és a visszacsepegő folyadékot (m_L) L-el jelöljük, akkor a refluxarány: $R = \frac{L}{D}$

A deflegmáció többször ismételhető. Megfelelően kialakított desztilláló berendezésben a deflegmációs egységek biztosítják a folyamatos szétválasztást. Az egységeket (fokozatokat vagy **tányérok**) egymás fölé helyezve, toronyszerű készülékben helyezik el. A tányérok felfelé haladva az összetétel az illékonyabb komponensben dúsul, míg lefelé haladva szegényedik (a kevésbé illékonyból lesz több). A bal oldali ábra mutatja az ismétlődő deflegmációval működő desztilláló berendezést. A készüléket alul fűtik, itt kezdik forralni az alapanyagot. A gőz folyamatosan halad felfelé, de összetétele tányérról tányérra változik. A torony tetején kivezetett párlatot kondenzáció után osztják az R – refluxarány szerint L és D mennyiségekre. Az L folyadékot visszavezetik a desztillálóba, ezzel biztosítva a folyamatos, dúsító szembeáramlást. Az eljárást **rektifikálás** nevezzük.

A desztilláció anyagmérlege:

Az eddig tárgyalt anyagválasztó műveletekkel ellentétben a desztillációnál minden fázisban változik az összetétel, és nincs „0” koncentrációjú állapot. Ennek megfelelően a rektifikálás anyagmérlege:

$$\dot{m}_{\text{Betáplálás}} = \dot{m}_{\text{Desztillátum}} + \dot{m}_{\text{Maradék}} \text{ és}$$

$$\dot{m}_{\text{Betáplálás}} \cdot w_{\text{Betáplálás}} = \dot{m}_{\text{Desztillátum}} \cdot w_{\text{Desztillátum}} + \dot{m}_{\text{Maradék}} \cdot w_{\text{Maradék}}$$

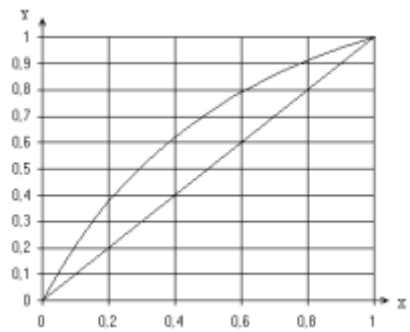
A gyakorlatban általában csak a mennyiségi indexeket használjuk, azaz:

$$\left. \begin{aligned} B &= D + M \text{ és} \\ \underline{B \cdot w_B} &= D \cdot w_D + M \cdot w_M \end{aligned} \right\}$$

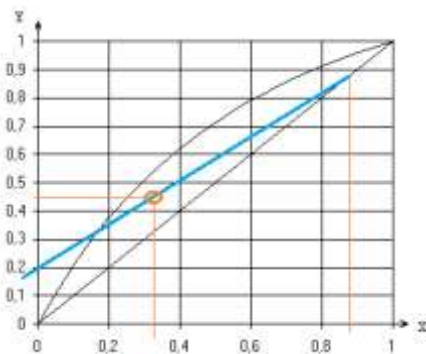
A fenti egyenlet egyenletrendszeret alkot, és akkor oldható meg, ha négy adatot ismerünk. Ezek általában a feldolgozandó, betáplálási adat (B), valamint az alapanyag koncentráció és a termékkel szemben elvárt koncentráció, illetve a maradék koncentrációja. Az anyagmérleg egyenletekből kiszámítható a **desztillátum** és a **maradék** mennyisége.

A kívánt koncentrációk elérése érdekében kiszámítják az $R = L/D$ refluxarányt, majd beállítják a desztilláló tényleges anyagforgalmát.

Ennek meghatározásához nem a forrásponti diagramot, hanem az abból előállítható (vagy szakirodalomból kikereshető) egyensúlyi diagramot használjuk. Figyeljük meg a jobb oldali ábrán, hogy a folyadék fázis összetétele (átlós vonal) fölött húzódik a tényleges egyensúlyi görbe az $y = \frac{p_B^0}{p_{\text{összes}}} \cdot x$ összefüggés szerint!



A refluxarány a diagramba rajzolható **munkavonal egyenletéből** határozható meg. A munkavonalnak ugyanaz a szerepe, mint az abszorpciónál vagy az extrakciónál volt. Kijelöli az egyensúlyi állapottól való eltérés nagyságát.



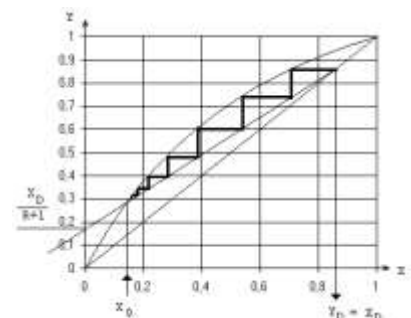
A bal oldalon a munkavonal általános képe látható. A vonal az x_D desztillátum móltört értékéről indul, ugyanis a torony tetején mind a párlat, mind a visszavezetett folyadék összetétele azonos. A munkavonal meredekségét az R refluxarány, vagyis végső soron a torony anyagforgalma határozza meg. A levezetés mellőzésével, a munkavonal bármely x - y pontpárosára:

$$y = \frac{R}{R + 1} \cdot x + \frac{x_D}{R + 1}$$

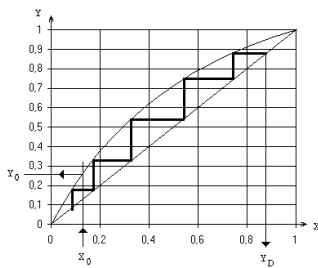
Figyeljük meg, hogy a munkavonal egyenlete formailag valóban egy $y = mx + b$ egyenesnek felel meg.

A felső munkavonal meghatározza a szükséges refluxarányt, illetve a munkavonal és az egyensúlyi görbe közé rajzolt „lépcsőkkel” a desztillációhoz szükséges fokozatok számát. A munkavonal három állapotot vehet fel az alkalmazott refluxarány szerint, és ettől függ az n_t tányérszám is.

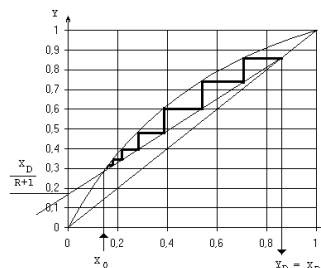
- végtelen refluxarányánál belesimul az átlóba, $n_t = n_{t, \text{minimális}}$
- minimális refluxarányánál átmegy a betáplálási ponton, a tányérok száma végtelen;
- üzemeltetési refluxarányánál a végtelen és a minimális között optimalizálja a desztilláló üzemmenetét.



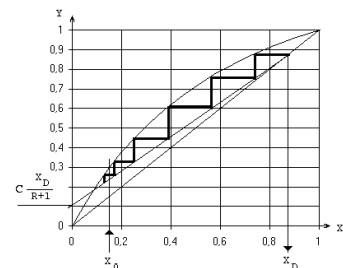
Az alábbi ábrák az alkalmazható refluxarányok hatását mutatják. Az alapanyag összetétele x_0 , a termék (desztillátum) összetétele $x_D = y_D$



A refluxarány végtelen, a tányérok száma a példa szerint 5, és ez az érték a minimálisan szükséges tányérszám. Ilyenkor viszont termék nincs, mert mindent visszavezetünk!



A refluxarány minimális, a munkavonal átmegy az x_0 - y_0 ponton. Ehhez végtelen sok tányér tartozna, tehát elvileg a legjobb a termékihozatal, de a gyakorlatban nem működik.



A refluxarány $R = C \cdot R_{min}$, ahol „C” a refluxfelesleg tényező. Értéke kézikönyvekből kereshető ki, vagy létező készüléknél a valóságos tányérszámból mérésel meghatározható.

A minimális refluxarány megállapításához a felső munkavonal egyenletébe behelyettesítjük a kiinduló állapot és a termék koncentráció adatait: $y_0 = \frac{R}{R+1} \cdot x_0 + \frac{x_D}{R+1}$ átrendezésével: $R_{min} = \frac{x_D - y_0}{y_0 - x_0}$

A számításoknál fontos szempont, hogy az egyensúlyi diagram adatai tömegszázalékos, vagy móltörtös alakban állnak rendelkezésünkre. Természetesen a két adat a fizikai-kémiában tanultak szerint egymásba átszámítható.

Feladat:

Óránként 2 t 23 w% metanol tartalmú vizes elegyet szeretnénk desztillációval megtisztítani úgy, hogy a desztillátum 90 w% metanolt tartalmazzon. A maradék metanol tartalma 2 w%-nál több nem lehet. Mennyi termék, és mennyi maradék víz keletkezik a folyamatos üzemi desztillációban?

Mekkora refluxarányt kell beállítani, ha a refluxfelesleg-tényező $C = 2,3$? Az egyensúlyi diagram alapján a 23 w% koncentrációjú elegy gőze 52,8 w%.

Megoldás:

A desztilláció anyagmérlege:

$$B = D + M$$

$$B \cdot w_B = D \cdot w_D + M \cdot w_M, \text{ ebből: } D = B \cdot \frac{w_B - w_M}{w_D - w_M} t/h$$

Behelyettesítés után:

$$D = 2 \cdot \frac{0,23 - 0,02}{0,9 - 0,02} = 0,48 t/h, \text{ és } M = \underline{1,52 t/h}$$

A minimális refluxarány:

$$R_{min} = \frac{w_D - w_0}{w_0 - w_0}, \text{ azaz } R_{min} = \frac{0,9 - 0,23}{0,528 - 0,23} = \underline{2,25}$$

Az üzemi refluxarány: $R_{üzemi} = C \cdot R_{min} = \underline{5,17}$

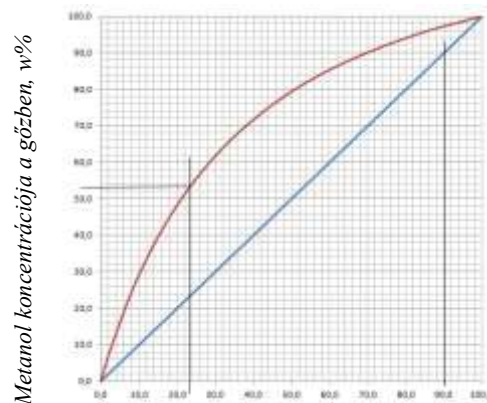
Szerkesszük meg a tányérszámot!

Számítsuk ki a felső munkavonal tengelymetszetét:

$$y = \frac{w_D}{R+1}, \text{ azaz } y = \frac{90}{5,17+1} = 14,58$$

Lépcsőzés után az üzemi tányérszám:

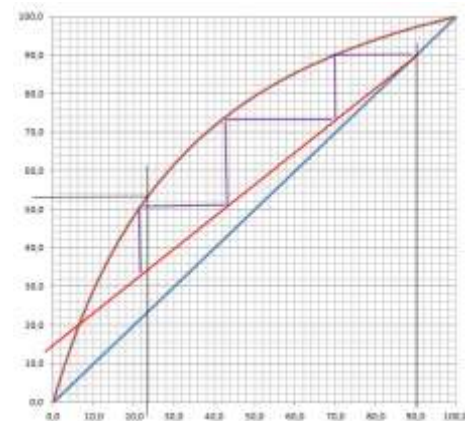
$$n_{üzemi} = \underline{3 \text{ db tányér}}$$



Metanol koncentrációja a gőzben, w%

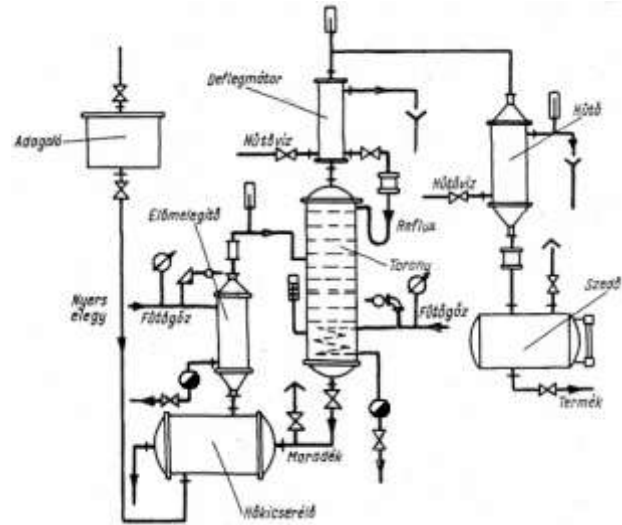
Metanol koncentrációja a vízben, w%

A felső munkavonal az $w_{yD} = w_{xD} = 90$ pontból indul és a függőleges tengelyt az $y = 14,58$ pontban metszi!

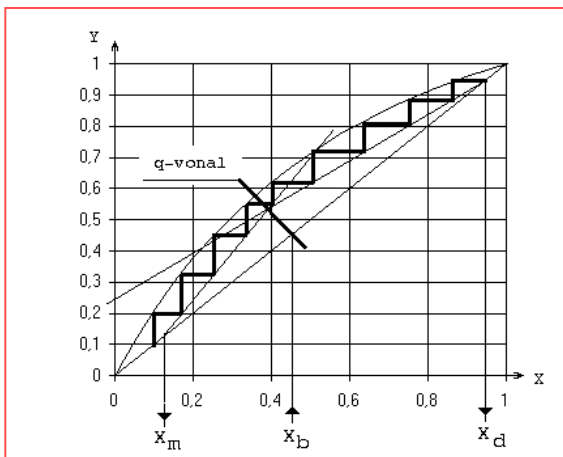


3.3.4. Desztilláló készülékek

A folyamatos üzemű desztillációt, néhány élelmiszeripari alkalmazástól eltekintve, tányéros vagy töltött toronyban valósítják meg. A tányérok egy-egy fokozatot képviselnek, a desztillátum összetételét és a maradék koncentrációját a refluxarány beállításával biztosítják. A jobb oldali ábrán egy folyamatos üzemű desztilláló **folyamatábráját** látjuk. Az alapanyagot az adagolóból először a maradék hőjét hasznosító hőcserélőben előmelegítik, majd a gőzfűtésű második előmelegítőben a betáplálási hőmérsékletet állítják be. A desztilláló oszlop felett külön deflegmátorral állítják be a refluxarányt. A desztillátum gőzét a vízhűtésű kondenzátorban hűtik szobahőmérsékletre.

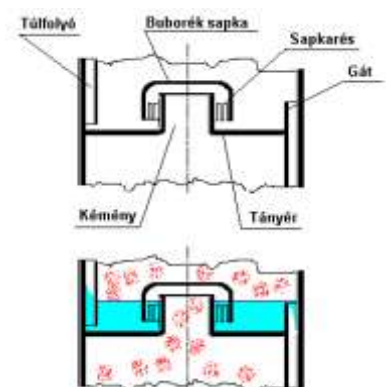


A forralást és elpárologtatást az oszlop alján lévő csőkiyós forraló biztosítja.



A folyamatos rektifikálás bonyolult művelet. A szétválasztást nem csak a **felső munkavonal** által kijelölt refluxarány és felső (dúsító) tányérszám, hanem a betáplálás hőmérséklete, és a maradékban megengedett illékonyabb komponens által meghatározott **alsó munkavonal**, és alsó (szegényítő) tányérszám együtt határozza meg. A betáplálás hőmérséklete, pontosabban a betáplált anyag felmelegítéséhez és elpárologtatásához szükséges hőenergia hányadosa egy újabb jellegzetes vonalat, a **q-vonalat** határozza meg. A három vonal együtt teszi lehetővé a desztilláció teljes tányérszámának, a betáplálás helyének és a tervezett anyagforgalmának meghatározását.

A desztilláló oszlopok tányérkialakításai közül a leggyakoribb a **buboréksapkás** tányér. A lemezből kialakított tányérokra furatokat készítenek, majd a furatokba rövid csődarabokat hegesztenek. Ez a „**kémény**”. A kémény fölé kerül a buboréksapka, amely furatokkal vagy résekkel ellátott harang alakú alkatrész. A tányéron lévő folyadék körül fogja a kéményt. A felesleg a **gáton** és a hozzá kapcsolódó **tűlfolyón** keresztül folyik egy fokozattal lejjebb. Az alsó tányérről érkező gőz csak a buboréksapka résein keresztül tud felfelé haladni, közben a tányéron lévő folyadékban **kondenzálódik**, de ugyanakkor a folyadék egy részét **elpárologtatja**. A desztilláló tányér tehát az alábbi feladatokat látja el:



- érintkeztetés az alulról érkező gőz és a fentről érkező folyadék között;
- a folyadékban való kondenzáció;
- a kondenzációs hővel a folyadék egy részének elpárologtatása;
- szétválasztás: az új összetételű folyadék továbbengedése lefelé, a gőz továbbhalad felfelé.

A buboréksapkák helyett gyakran alkalmaznak **szitatányéros** megoldást, ahol a folyadék felületi feszültsége tartja az anyagot a tányéron. Megvalósítható még speciális szelepes, **dinamikus tányérokkal** és **töltött oszlopokkal** is a rektifikálás.

4. VEGYIPARI MŰVELETEK SZABÁLYOZÁSA

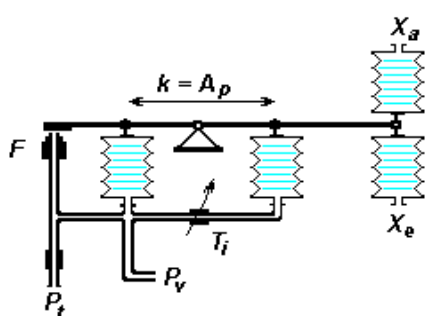
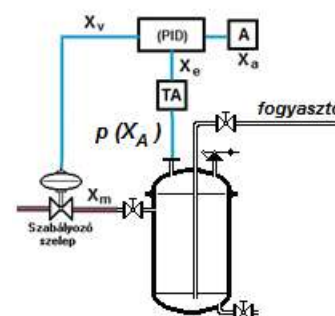
Az 1.6. fejezetben megismertük az irányítástechnika alapfogalmait, a vezérlés és szabályozás legfontosabb tulajdonságait, és a szabályozó típusokat. Ebben a fejezetben a vegyipari műveleti tételekhez kapcsolódóan tárgyalunk néhány jellegzetes szabályozást.

4.1. NYOMÁS- ÉS MENNYISÉG- ÉS HŐMÉRSÉKLETSZABÁLYOZÁS

A nyomás- és a mennyiség szabályozása legtöbbször az **értéktartó** szabályozások körébe tartozik. Valamilyen berendezés nyomását vagy a berendezésbe betáplált anyag mennyiségét állandó értéken akarjuk tartani. A problémát legtöbbször a mennyiség érzékelése jelenti. A nyomást viszonylag könnyű mérni, a nyomásból származó erő elmozdulást eredményez, ami szintén könnyen mérhető, vagy az elmozdulással arányos feszültség is egyszerűen feldolgozható. A mennyiség mérését viszont legtöbbször nyomásra, pontosabban nyomáskülönbség érzékelésére, mérésére vezetjük vissza. Ennek egyik fontos eszköze a mérőperem, és a mérőperemhez kapcsolódó érzékelő, jelátalakító műszerek.

4.1.1. Nyomásszabályozás

A nyomásszabályozás a nyomásérték közvetlen érzékelését, mérését és mechanikus összehasonlítását követő anyagáram változtatással oldható meg. Az anyagáram hozza létre a nyomást egy zárt térben, tehát, ha az anyagáramot csökkentjük, vagy megszüntetjük a nyomás is csökkenni fog. A szabályozási kör **alapértéke** (X_A) a nyomás, az ellenőrzőjel és a végrehajtójel pedig akár pneumatikus nyomás, akár elektromos áram lehet. A szabályozó általában csak P vagy PI típusú, a differenciáló hatásra ritkán van szükség.



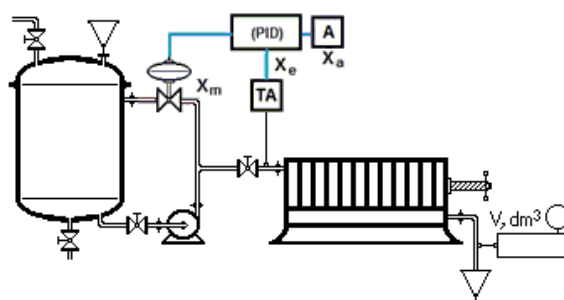
A pneumatikus szabályozó

műszerek egyik jellegzetes típusát figyelhetjük meg a bal oldali ábrán. Ezek az eszközök kifejezetten nyomásértékeket képesek érzékelni és szabályozni. A $p_t = 1,4$ bar nyomású táplevegő olyan csőbe áramlik, amelyen két **fojtás** található. Az első fojtás állandó ellenállású, míg a második (F jelű) egy kétkarú emelő által mozgatott lemezzel (**torlólemez**) változtatható. Az emelő másik végén két, egymással szembefordított **szilfonmembrán** van, amelyekbe az ellenőrző-jelet és az alapjelet vezetjük. A két jel különbsége meghatározott irányba mozdítja el az emelőt.

Ennek hatására az F ellenállás vagy növekszik, vagy csökken, és így az $x_e - x_a$ értékével arányos p_v **vezérlőjelet** továbbít, például egy beavatkozó (szabályozó) szelep felé. A rendszer stabilitását a kimenőjel visszacsatolása egy fűvóka-oldali szilfonmembránba biztosítja. Ez a **P-tag**, míg az integráló hatást az $x_e - x_a$ értékét fokozatosan (T_i **ismétlési idővel**) növekvő, változtatható fojtású, pozitív visszacsatolású szilfonmembrán biztosítja (**I-tag**). Az átviteli tényezőt a kétkarú emelő alátámasztási kararányával lehet beállítani. Ezeknek a rendszereknek a táplevegő nyomása 1,4 bar, a végrehajtó, vagy vezérlőjel nyomása pedig 0,2...1 bar között változik.

A nyomásszabályozás jellemző példája az állandó nyomású **szűrés szabályozása**.

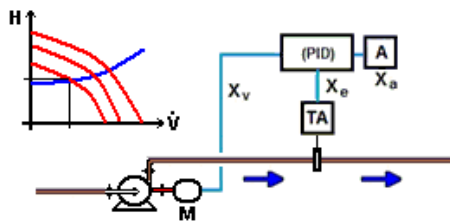
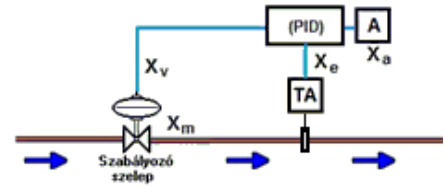
A tartályból érkező zagy nyomását a szűrő előtti nyomásérzékelővel mérik, az ellenőrzőjel a PID szabályozóba kerül. A nyomás növekedése hatására a keringető-ágba épített szabályozó szelep (beavatkozó) nyit, ezzel biztosítva a szűrő állandó nyomását. Ez a példa egyébként a **fordított**, vagy aktív **pozitív visszacsatolású** szabályozásra is példa, hiszen a nyomás növekedése mennyiségnövekedést eredményez.



4.1.2. Mennyiség szabályozás

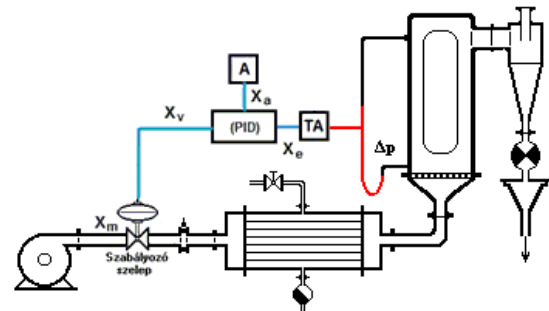
A vegyipari szabályozások legnagyobb részében a **szabályozott jellemző** – nyomás, hőmérséklet, folyadékszint stb. – állandó értéken tartása vagy követő szabályozása valamelyik anyagi mennyiség, mint **módosított jellemző** változtatásával jár. Ezért gyakran, és tévesen ezeket a szabályozásokat mennyiség szabályozásnak nevezzük.

A tényleges mennyiség szabályozásnál a szabályozott jellemző is valamilyen áramló anyagmennyiség, és legegyszerűbben ennek közvetlen változtatása maga a szabályozás. Amikor egy készülék betáplálását, vagy egy hűtőfolyadék adagolását beállítjuk egy szeleppel, akkor is ilyen szabályozást hajtunk végre. Az ábrán látható szabályozásnál a mennyiséget mérőperemmel mérik, és valójában „nyomáskülönbség szabályozást” valósítanak meg.



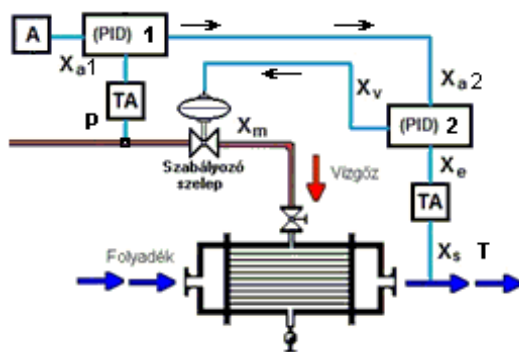
A mennyiség szabályozás másik módja, amikor a szállító berendezés, szivattyú vagy ventilátor motorjának fordulatszámát változtatják. Ha az ábrára rajzolt szivattyú jelleggörbét megfigyeljük, látható, hogy ez sokkal gazdaságosabb szabályozás, mint a fojtásos eljárás, mert kevesebb mennyiséghez kisebb energiaigény tartozik. Ugyanakkor a változó fordulatszámú motorok lényegesen drágábbak, ezért ez a szabályozási mód csak tartós és nagy mennyiség változtatásoknál gazdaságos, például: köolaj távvezetéken.

Szintén a mennyiség szabályozás tárgykörébe sorolható, bár valójában nyomáskülönbség szabályozást valósít meg a fluidizációs szárító levegő adagolásának szabályozása. A lebegtető állapothoz meghatározott nyomáskülönbségre van szükség a szárítóban, amit a bevezetett meleg levegő hoz létre. A levegő adagolásával a szükséges nyomáskülönbség beállítható, tehát az értéktartó szabályozás kör is ezt szabályozza.



4.1.3. Hőmérséklet szabályozás

A hőmérséklet szabályozást, mint szabályozási példafeladatot az 1.6 fejezetben már megismertük. Ez a szabályozástechnikai eljárás gyakran kiegészül egy különleges „önszabályozó” rendszerrel, amit hierarchikus kaszkádszabályozásnak, vagy egyszerűen csak **kaszkádszabályozásnak** nevezünk.



A bal oldali ábrán két, egymásba illesztett szabályozási kör látható. A belső (PID 2) kör a hőcserélő hőmérsékletét szabályozza a már ismert módon: méri a hőmérsékletet, és változtatja a fűtőgőz adagolását. A PID 1 jelű külső szabályozási kör viszont a gőz nyomását méri, és amennyiben a nyomás – és ezzel együtt a hőmérséklet, tehát a hőmérsékletkülönbség is – változik, változtatja a belső kör alapjelét. Ezek a szabályozási rendszerek figyelemmel kísérik azoknak a paramétereknek a változását, amelyek a művelet végrehajtását befolyásolhatják. Gőzfűtésű készüléknél ilyen a gőz nyomása.

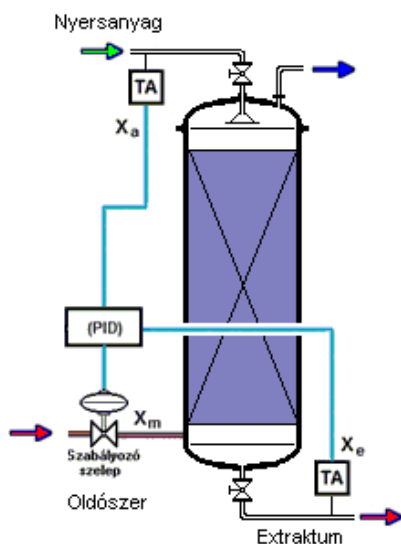
A kaszkádszabályozásnak stabilitást növelő hatása is van. A szabályozási kör tagjainak illesztését, egymáshoz való pontos kapcsolódását a tagok erősítései (átviteli tényezői) határozzák meg. Ha túl nagy az erősítés, a kör elveszti stabilitását, begerjedhet. Két szabályozó alkalmazásával az egyes PID-tagokra eső erősítések összeszoródnak, a teljes erősítés tehát két tag között oszlik meg.

4.2. ÖSSZETETT SZABÁLYOZÁSOK

A vegyipari műveletek szabályozása általában nem csak egy paraméter állandó értéken tartását jelenti. A művelet végrehajtásakor számos tényezőt figyelembe kell venni, ezek egymásra hatása is fontos.

4.2.1. Extrakciós és abszorpciós műveletek arányszabályozása

Az extrakció általános szabályozási köre **arányszabályozás**. Ez azt jelenti, hogy a szabályozási kör alapjelét az egyik anyagmennyiség változásához igazítjuk. A folyamatos extrakció terméke az extraktum, amelynek összetételét szabályozzuk az oldószer adagolásával. Ez egy egyszerű, értéktartó szabályozás.



A Nerst-törvény alapján az extrakció műveletét a megoszlási hányados, tehát egy mennyiségi arány befolyásolja. Ha az alapanyag (nyersanyag) mennyisége nő, akkor a hozzá adagolt oldószer mennyiségét ezzel arányosan szintén növelni kell. Kézenfekvő megoldás, hogy a szabályozási kör alapjelét a feldolgozandó nyersanyag mennyisége határozza meg. Az arányt a szabályozó A_p erősítésével lehet beállítani. Hasonló kapcsolást alkalmaznak abszorpciónál, sőt egyes vegyipari reakciók szabályozásánál is.

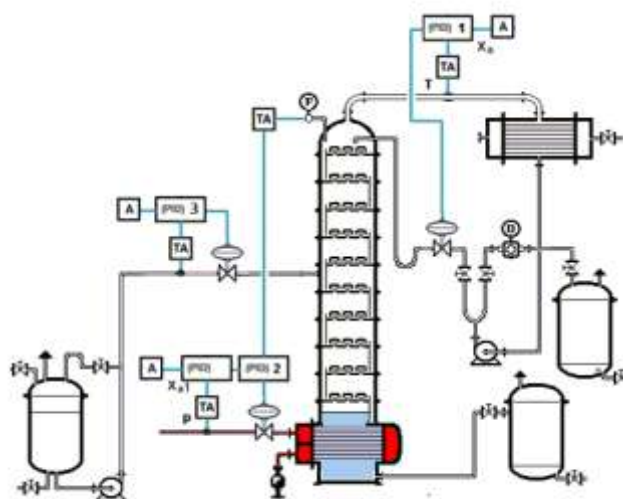
A megoldás hátránya az, hogy a rendszer stabilitása nagy mértékben attól az aránytól függ, amit a nyersanyag és az oldószer mennyisége a műveleti számítások alapján megkíván. Ezért az arányszabályozást gyakran kaszkádszabályozással egészítik ki, ahol a külső szabályozási kör gondoskodik a nyersanyag mennyiségének ellenőrzéséről, míg a belső szabályozási kör a termék (extraktum) összetételéhez igazítja a szükséges mennyiségű és arányú oldószert.

4.2.2. A desztilláció szabályozása

A desztilláció, különösen a szakaszos vagy folyamatos rektifikálás szabályozása több műszaki paraméter egyidejű, önálló, de egymástól nem független állandó értéken tartását jelenti. Az ilyen szabályozásokat **kapcsolt szabályozásnak** nevezik. A desztilláció fő szabályozási köre a **refluxszabályozás**, amelynek kapcsolódó feltétele a desztilláló **állandó nyomása**, és a felső deflegmátor után szétosztott gőz **mennyiségének** (tömegáramának) folyamatos biztosítása a forraló **fűtésszabályozásával**.

A jobb oldali ábrán a **folyamatos üzemű** rektifikáló kapcsolt szabályozásait látjuk. A refluxaránynak megfelelő refluxfolyadék mennyiségi szabályozása hőmérsékletmérésre és szabályozásra vezethető vissza, ugyanis a fejpárlat hőmérséklete a w_D koncentrációnak megfelelő forrásponthi hőmérséklet. Ez csak akkor igaz, ha a $p =$ állandó feltétel teljesül, amit a desztilláló oszlop alsó részére szerelt forralóban való elpárologtatással biztosítunk. A fűtésszabályozás egyúttal kaszkádszabályozás is. A desztilláló számított anyagforgalmához szükséges még a betáplálás állandó értékre való szabályozása, ami azért is indokolt, mert a betáplálási pont nyomásingadozása zavarhatja az anyagáramot.

Szakaszos üzemű rektifikálás jellemző szabályozása a refluxarány **követő-szabályozás**. Szakaszos üzennél az üstben az alapanyag állandóan szegényedik, ami miatt az állandó párlatkonzentráció eléréséhez a refluxarányt folyamatosan növelni kell. Ehhez egyrészt megfelelő számú tányér – azaz tányértartalék – szükséges, másrészt a refluxfolyadék a művelet végén eléri a végtelen értéket.

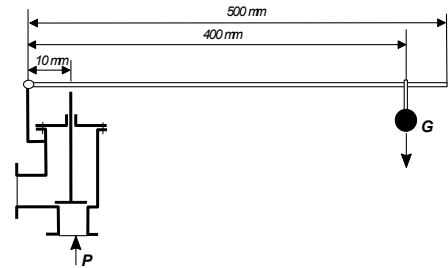


5. MINTA FELADATOK

1. Egy vegyipari készülék biztonsági szelepének a súlyterhelését kell meghatározni. A berendezésben 10 bar túlnyomás uralkodik. A biztonsági szelep ülésének az átmérője 14 mm. A teherkar teljes hossza 500 mm, a tömege pedig 0,20 kg.

A súly a teherkar csuklópontjától 400 mm-re van. A biztonsági szelep tolórúdjá a kar csuklópontjától 10 mm -re igyekszik megemelni a kart a teherrel együtt.

- Számolja ki a nyitóerő nagyságát
- Határozza meg a terhelő súly nagyságát határesetben, amikor még éppen nem nyit ki a biztonsági szelep!



2. Jelölje be az alábbi táblázat állításai közül, hogy melyik az igaz (I) és melyik a hamis (H)! Ez utóbbi esetben a megfelelő sor üres rovatába írva javítsa ki a mondatot!

Állítás	I/H	Javított mondat
A siklócsapágyban golyókon forog a tengely		
Az áttétel az átmérőkből és fordulatszámokból számítható ki		
A propellerkeverő közepes fordulatszámon működik		
A gőzfűtésű folyadékmelegítő hőcserélő mindig ellenáramú		
A dobszűrő látszólagosan folyamatos készülék		
A szemcsés halmazok eloszlása normális vagy anomális lehet.		
A folyadék áramlási sebessége a cső hosszától függ.		
Az ingacentrifugák jellemző fordulatszáma 10000 f/perc felett van.		
Az abszorpció egyensúlyra vezető művelet		
Az extrakció alapanyaga feloldódik az oldószerben		

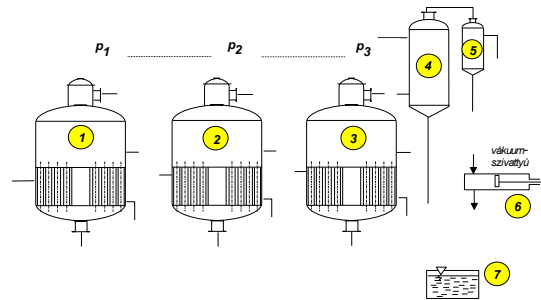
3. Az alábbi felsorolás készülékeket és műveleti jellemzőket tartalmaz. Állapítsa meg, hogy melyik készülékre melyik műveleti tulajdonság a jellemző! Írja be az üres oszlopba a művelet sorszámát!

1	Állóhengeres tartály	A	Munkavonal	
2	Barometrikus keverőkondenzátor	B	Kritikus fordulatszám	
3	Csőköteges hőcserélő	C	Szakaszos szétválasztás	
4	Dorr-féle berendezés	D	Vákuum bepárlás	
5	Rektifikálás	E	Karcsúsági tényező	
6	Keretes szűrőprés	F	Ülepedési sebesség	
7	Golyósmalam	G	Logaritmikus hőmérséklet különbség	

4. Egy vegyipari üzem kazánház épülete külső falzatának hőátadó felülete 120 m², a belső hőmérséklet 20 °C, a külső hőmérséklet -15 °C, a fal vastagsága 30 cm, hővezetési tényezője 1 W/(m °C). A melegebb oldali hőátadási tényező értéke 8 W/(m² °C), a hidegebb oldali hőátadási tényező értéke 20 W/(m² °C). Határozzuk meg a hőátbocsátási együtthatót [W/m²K] és az átlagos hő-vesztességet [W]
5. Ingacentrifugában ülepitési feladatot végzünk. A szemcse 5 µm átmérőjű és feltételezzük, hogy gömb alakú, sűrűsége 4000 kg/m³. A szuszpenzió sűrűsége 1200 kg/m³, dinamikai viszkozitása 1,2 · 10⁻³ Pas. A centrifuga fordulatszáma 3000 percenként és a dob átmérője 300 mm.
- Határozzuk meg az ülepedési sebességét!
 - Hányszor hatékonyabb így az ülepités, mint gravitációs erőter esetben!? Számolja ki a jelzőszámot!
 - Ellenőrizzük le az áramlás jellegét! Számolja ki a Re számot!

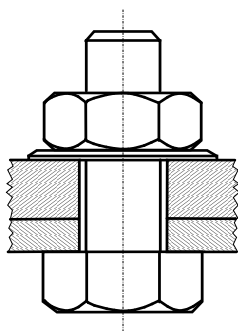
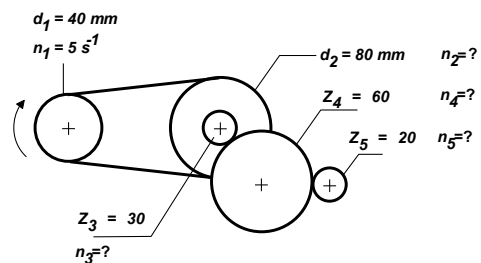
6. Rajzoljuk le a keretes szűrőprést, ismertessük működését. Hogyan határozzuk meg az optimális szűrletmennyiséget?
7. A bepárlóba betáplálunk 1500 kg/h mennyiségű 6 w% -os oldatot. Ezt 30 w% töménységűre pároljuk. Az átlagos fajhő 4,18 kJ/(kg °C). Az oldószer párolgáshője 3132 kJ/kg. Az alapanyag betáplálása 40 °C-hőmérsékleten történik. A bepárlóban a nyomás 0,5 bar, ezért a forrásponti hőmérséklet 80,9 °C. A forrponnt növekedésétől tekintünk el! A fűtőgőz hőmérséklete 140 °C.
- Határozzuk meg a bepárló anyagáramait, a párlat és a maradék mennyiségét!
 - Számítsuk ki a bepárló közepes hőmérsékletkülönbségét!

8. A jobb oldali ábrán egyenáramú, háromtestes bepárlótelep készülékei láthatók. Egészítse ki a kapcsolási rajzot a csővezetékkel. Jelölje be az egyes fokozatok nyomásértékeinek egymáshoz képesti relációját. (p₁ kisebb vagy nagyobb mint p₂, stb.)



9. Egy vízvezeték nyomócsöve 500 mm átmérőjű. Az ivóvizet 1,5km távolságra szállítják. A szállítandó térfogatmennyiség 250 m³/h.. A cső belsejét tekintve simának, a csősúrlódási tényező értéke 0,03!
- Határozza meg a Re számot!
 - Számítsa ki a csővezeték nyomásvesztését! (a víz sűrűsége 1000 kg/m³, viszkozitása 0,001 Pa.s)
10. Egy serleges elevátorral 2,1 m/s sebességgel 1,8 kg/dm³ sűrűségű anyagot szállítunk. A serlegék térfogata 3 dm³, a töltési tényező értéke 0,55.
- Határozza meg az elevátor óránkénti szállítóképességét kg/h-ban, ha a serlegék egymástól való távolsága 400 mm!
 - Rajzolja le a serleges elevátor vázlatát!

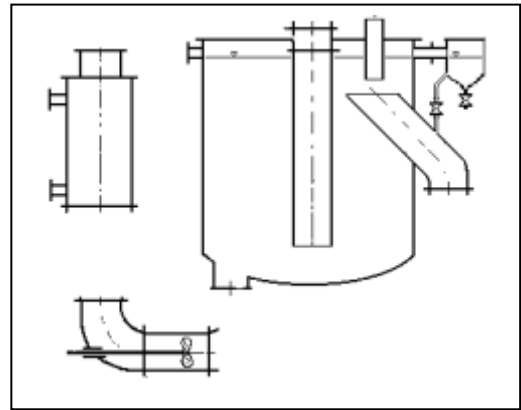
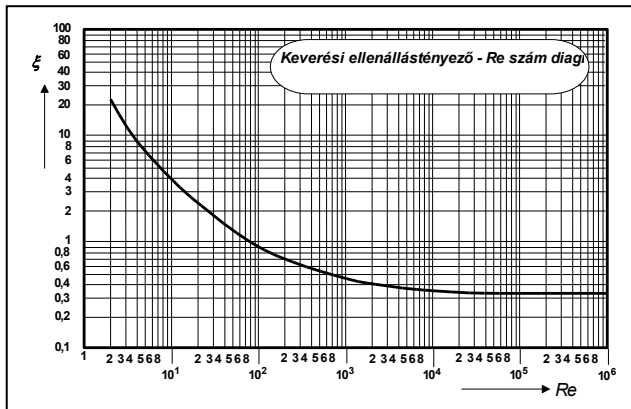
11. Az jobb oldali ábrán egy szíj- és fogaskerékhajtásokat tartalmazó közlőműrendszer látható:
- határozza meg a tengelyek fordulatszámát!
 - jelölje be a tengelyek forgásirányát!



12. Határozza meg a fenti ábra z₄ tengelyén fellépő nyomatékot, ha a hajtómotor teljesítménye P = 5 kW
13. Egészítse ki a bal oldalon látható ábrát a menet bejelölésével!

14. Egy desztilláló berendezésben óránként 600 kg, 70% metanol tartalmú vizes párlatot állítunk elő. A metanol fajhője 2,71 kJ/kg°C, forráspontja (70%-nál) 74,6 °C, párolgáshője 1097 kJ/kg. A desztillátum folyadék véghőmérséklete 50 °C! Határozzuk meg a párlat kondenzációjához szükséges hűtővíz mennyiségét, ha a víz, átlagosan, 15 °C hőmérsékletéről 45 °C hőmérsékletre melegszik.
15. Határozzuk meg az előző feladathoz szükséges hőcserélő hőátadó felületét [m²], ha a hőátbocsátási együttható: k = 1000 W/m²K!

16. Egészítse ki a jobb oldalon látható ábrát, nevezze meg a készüléket és alkatrészeit Írja le a berendezés működését!



17. Keverős berendezésben propeller keverővel végzünk anyagmozgatást a hő-, és koncentráció kiegyenlítés érdekében. A keverőelem átmérője $d = 300$ mm fordulatszáma $n = 180$ 1/min. A kevert folyadék sűrűsége 1000 kg/m^3 , a dinamikai viszkozitása 10^{-3} Pas.
- Határozza meg a keverési Re számot!
 - A fenti diagramból határozza meg a keverési ellenállás tényezőt!
 - Számolja ki a keverés teljesítmény szükségletét!

MEGOLDÁSOK

1. feladat: $F_{nyitó} = 154 \text{ N}$; $0,267 \text{ kg}$.
2. feladat: H – folyadékfilmen forog; I ; I ; H – általában keresztáramú; I ; I ; H – a cső átmérőjétől függ; H – 10000-nél kisebb, 500-1500 közötti; H – csak az egyik komponense oldódik.
3. feladat: 1-E; 2-D; 3-G; 4-F; 5-A; 6-C; 7-B
4. feladat: $K = 2,105 \text{ W/m}^2\text{K}$; $Q_v = 8841 \text{ W}$
5. feladat: $v = 0,048 \text{ m/s}$; $j = 1507$; $Re = 0,24$
6. feladat: a megoldást lásd 2.4.6 és 2.4.7 pontoknál
7. feladat: $S = 1200 \text{ kg/h}$; és $M = 300 \text{ kg/h}$; $\Delta T = 60,3 \text{ }^\circ\text{C}$
8. feladat: Az ábrát lásd a 3.1.6 fejezetben; $p_1 > p_2 > p_3$
9. feladat: $Re = 175\,000$; $\Delta p = 5600 \text{ Pa}$
10. feladat: $\dot{m} = 56\,130 \text{ kg/h}$; a készülék rajzát lásd az 2.5.3 pontban
11. feladat: $n_2 = 2,5 \text{ 1/s}$; $n_3 = 2,5 \text{ 1/s}$; $n_4 = 1,25 \text{ 1/s}$; $n_5 = 3,75 \text{ 1/s}$; A z4 fogaskerék az óramutató járásával ellentétes irányba forog, a többi az óramutatóval megegyező irányú
12. feladat: $636,6 \text{ Nm}$
13. feladat: a megoldást lásd 1.2.1 pontnál
14. feladat: 7360 kg/h
15. feladat: $6,14 \text{ m}^2$
16. feladat: a megoldást lásd 3.1.7. pontnál
17. feladat: $Re = 27\,000$; $\xi = 0,35$; $P = 23 \text{ W}$