



MAGYAR MÉRNÖK KAMARA
VEGYÉSZMÉRNÖK TAGOZAT

VEGYÉSZMÉRNÖKI TECHNOLÓGIAI TERVEZÉS
Felkészülő Vizsgaanyag Technológia Tervezői Jogosultság
Megszerzéséhez

Készítették:

Bábel Júlia
Németh Bence Gábor
Papp Anita
Petró Péter
Veigler Violetta
Zahari Béla

Ellenőrizte:

Sinte Károly

Budapest, 2022

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
1.1. Finomítói technológiák	3
1.2. Gyógyszeripari technológiák	4
1.3. Élelmiszeripari technológiák.....	5
2. Technológia tervezés alapjai	5
2.1. Technológia feladatköre	5
2.1.1. Folyamatok modellezése	6
2.1.2. Hidraulika	6
2.1.3. Készülékmeretezések.....	11
2.1.4. Nyomáshatárolás.....	12
2.1.5. Irányítástechnika	12
2.2. Tervezési alapok	13
3. Anyagszállítás gépei	14
3.1. Szivattyúk	16
3.1.1. Centrifugál szivattyúk	16
3.1.2. Centrifugál szivattyúk üzemi jellemzői	21
3.1.3. Térfogat kiszorítás elvén működő szivattyúk.....	29
3.2. Gázszállító berendezések	34
3.2.1. Ventilátorok.....	34
3.2.2. Fúvók.....	38
3.2.3. Kompresszorok.....	40
4. Hőcserélők.....	46
4.1. Bevezetés.....	46
4.2. Hőhordozók.....	47
4.3. Hőcserélők	47
4.3.1. Hőcserélők általános csoportosítása	47
4.3.2. Csőköteges hőcserélők.....	48
4.3.3. Kettős csöves hőcserélők	50
4.3.4. Lemezes hőcserélők.....	51
4.3.5. Spirállemezes hőcserélők	51
4.4. A csőköteges hőcserélők technológiai tervezésének irányelvei.....	52

4.4.1.	A tervezés kiindulási adatai, a hőcserélő típusának kiválasztása.....	53
4.4.2.	A csőköteges hőcserélők azonosítása	54
4.4.3.	A konstrukció kialakításának szempontjai.....	56
5.	Tartály jellegű készülékek.....	61
5.1.	Atmoszférikus tárolótartályok.....	61
5.2.	Nyomástartó tartályok.....	63
6.	Desztilláló kolonnák	67
6.1.	Desztillációs módszerek	67
6.2.	Elegyek szétválasztási sorrendjének meghatározása	68
6.3.	Rektifikáló kolonna tervezése, méretezése	69
6.4.	Paraméterek hatása a desztillációra	70
6.4.1.	Nyomás.....	70
6.4.2.	Refluxarány	71
6.4.3.	Betáplálás hőállapota	72
6.5.	Rektifikálás berendezései	72
6.5.1.	Kondenzátorok	73
6.5.2.	Visszaforralók	74
6.6.	Oszlopbelső típusai, osztályozása.....	77
6.6.1.	Tányéros oszlopok	78
6.6.2.	Töltetes oszlopok.....	81
7.	Nyomáshatárolás.....	85
7.1.	Túlnyomás kialakulásának lehetséges okai	87
7.2.	Egyedi lefúvatási esetek.....	87
7.3.	Biztonsági szerelvények.....	90
7.3.1.	Biztonsági tárcsák.....	90
7.3.2.	Biztonsági szelepek	94

1. BEVEZETÉS

A technológia különböző iparágakon átívelő terület, így ebben a fejezetben a teljesség igénye nélkül, röviden betekintést nyújtunk a különböző iparágak technológiáiba.

1.1. Finomítói technológiák

Atmoszférikus és vákuumdesztilláló üzem: A kőolaj finomító első üzeme, ahol a kőolajat különböző párlatokra választják szét. Ezek a párlatok: különböző benzin párlatok, jet, gázolajok, vákuumpárlat és maradék (gudron – vákuum kolonna maradéka). A kőolaj desztillálását az üzemben a sómentesítés előzi meg, mely eltávolítja vizes mosással a kőolajban lévő fémsókat (későbbi üzemekben pl. katalizátormérgek lehetnének).

Kénmentesítő: Célja a szerves vegyületekben megtalálható heteroatomok, elsősorban a kén eltávolítása, tehát egy minőségjavító technológia. Könnyű benzin esetében ez lúgoldattal történik, míg nehéz benzin és gázolaj esetében katalizátoron történő hidrogénezéssel. A melléktermékként keletkező kénhidrogént a Claus-üzemben dolgozzák fel.

Claus-üzem: finomítói segédüzem, melynek célja a kénhidrogénből elemi kén előállítás. Kétlépcsős az eljárás: 1. termikus, 2. katalitikus. A végtermék folyékony kén.

Izomerizálás: Benzinek minőségjavító technológiája, mely során egyenes láncú szénhidrogéneket alakítunk át elágazó láncú szénhidrogénekké. Utóbbiak oktánszáma jelentősen nagyobb, mint az egyenes láncú szénhidrogéneké. Az izomerizálás alapanyaga jellemzően könnyű benzin.

Reformálás: Benzinek minőségjavító technológiája, mely során közép-, illetve nehézbenzinekből magasabb oktánszámú keverőkomponenseket gyártunk. A reakciók során főként magas oktánszámú aromás vegyületek (pl. benzol, toluol, xilolok), illetve elágazó láncú szénhidrogének keletkeznek. Fontos megjegyezni, hogy a reformátum benzol tartalmát csökkenteni kell. Az aromás üzemben választják el extrakcióval a reformátumban található aromás vegyületeket.

Alkilezés: Addíciós technológia, amivel magas oktánszámú benzin keverőkomponenseket gyártanak. Izobután és telítetlen szénhidrogének reakciója eredményeként keletkeznek elágazó láncú szénhidrogének. Katalizátornak erős savakat, pl. hidrogén-fluoridot vagy kénsavat használnak.

Paraffinmentesítés: Gázolajok minőségjavító technológiája, mely során a hosszú, egyenes szénláncú, magas fagyáspontú paraffinokat távolítják el szelektív hidrokrakkolással vagy szelektív izomerizációval.

Fluid katalitikus krakkolás (FCC): konverziós technológia, melynek alapanyaga a vákuum-desztillálás során elvett vákuumgázolaj. Az alapanyagban lévő hosszú láncú szénhidrogénekből magas hőmérsékleten, alacsonyabb nyomáson, katalizátor segítségével rövidebb láncú szénhidrogének keletkeznek (krakkolás). A technológia

célja további értékes komponensek gyártása (benzin, gázolaj, PB, stb.). Az FCC fő terméke a benzin frakció.

Hidrokrakkoló: A technológia alapanyaga szintén a vákuum-gázolaj, de ebben az esetben a hosszú láncú szénhidrogének krakkolása magasabb nyomáson és hidrogén atmoszféra alatt történik katalizátor segítségével. A hidrokrakkoló fő terméke a gázolaj.

Viszkozitástörő: A vákuum-desztillálás maradékát (gudront) feldolgozó technológia. Az üzem terméke főleg gázolaj, mellette pedig kevés benzin keletkezik. Az üzem maradékából fűtőolaj vagy bitumen készül.

Késleltetett koksoló: A vákuum-desztillálás maradékát (gudront) feldolgozó technológia. Az üzemnek fő terméke nincsen. A művelet során magas hőmérsékleten, alacsonyabb nyomáson a gudronból koks és fehéráru (benzin, gázolaj, olefines PB) keletkezik. A kemence előtt vízgőzt adagolnak, hogy a koksológás ne rögtön a kemence csöveiben, hanem késleltetve következzen be a koksokamrában.

Hidrogéngyártás: A finomítóban több üzem is igényel hidrogén alapanyagot (kénmentesítők, reformáló, hidrokrakkoló), ezért a finomító egy segédüzeme a hidrogéngyár, ahol földgázból és vízből gyártanak hidrogént.

Benzin keverés: A motorbenzin a különböző üzemek benzinfrafrakcióinak és adalékok keveréséből áll össze. A keverés során állítják be a motorbenzin megfelelő minőségét. Keverőkomponensek: C4 frakció, izomerát, reformátum, alkilát, FCC benzin, ETBE (etil-terc-butil éter). Utóbbi oxigén tartalmú keverőkomponens, ami segíti az égést.

Gázolaj keverés: A dízel is különböző üzemek gázolaj frakcióiból és adalékokból keveréssel áll össze. A keverés során állítják be a dízel megfelelő minőségét. Keverőkomponensek: hidrokrakk gázolaj, koksoló gázolaja, biodízel (FAME – zsírsavak metil észterei).

Bázisolaj gyártás: Vákuum-desztilláló maradékából (gudronból) készítenek bázisolajat propános aszfaltenmentesítéssel. Ezzel eltávolítják az alapanyagból a könnyen kristályosodó, nagy tömegű paraffinokat, illetve a könnyen oxidálódó nafténeket és aromásokat. Az ezután visszamaradó, elsősorban elágazó láncú paraffinok a bázisolaj, ami a kenőanyagok alapanyaga.

Kenőolaj gyártás: Kenőolajat bázisolaj (~80%) és különböző adalékok (~20%) keverésével gyártanak.

Vízgőzös pirolízis: Szigorúan véve nem finomítói technológia. Jellemző alapanyaga a vegyipari benzin. Célja a hosszabb szénláncú szénhidrogének krakkolása (magas hőmérsékleten, rövid tartózkodási idővel (1-2 sec)). A kemence elé vízgőzt vezetnek, hogy a koksológást megakadályozzák a kemence csöveiben. Az üzem fő terméke az etilén és a propilén.

1.2. Gyógyszeripari technológiák

A gyógyszeripari technológiákra jellemző, hogy kisebb volumenűek az üzemek, mint a finomítóban. A technológiák általában szakaszosak, egy készülékben egymás után több feladatot is elvégeznek, sőt akár egy készülék többféle gyártásban is részt vehet, mert flexibilis csővezetékekkel módosítható a készülékpark kapcsolási sorrendje.

1.3. Élelmiszeripari technológiák

Liofilizálás: Az élelmiszeriparban fontos feladat a tartósítás, aminek célja, hogy az élelmiszerben található mikroorganizmusok koncentrációját határérték alá csökkentsük. Ennek egy lehetséges módja a liofilizálás, ami fagyasztva szárítást jelent. Ennek során eltávolítjuk az élelmiszer víztartalmát. A művelet lépései: hirtelen fagyasztás, majd vákuumban a jégkristályok szublimálása következik. A szublimációs hő tovább hűti az anyagot. Végül utólagos deszorpció következik, amely során az anyagban kötött vizet távolítják el. Liofilizálással tartósítják például az instant leveseket.

Rövidutas desztilláció: Vákuumban végzett desztillációs művelet. A kondenzátor a készüléken belülre van építve: a fűtő és hűtő felület csupán néhány cm-re van egymástól. Rövid tartózkodási idő jellemzi és kis filmvastagság. Élelmiszeriparban halolajok vagy zsírszármazékok tisztítására használják.

Pervaporáció: A pervaporáció hajtóereje a membrán két oldala közötti hőmérséklet- és gőznyomás gradiens. A művelet során fázisváltozás történik. A membrán egyik oldalán van a szennyezett folyadék, amelyből a szennyezők először beoldódnak a membránba, majd diffúzióval áthaladnak rajta, végül a membrán másik oldalára érve a szennyezők elpárolognak. Alkalmazása ipari területen például alkoholok kinyerése vizes elegyükből, illetve ritka esetekben növényekből aromaanyagok kinyerésére is használható.

Reverz ozmózis: Membrán művelet, mely az oldódás és diffúzió jelenségét használja ki a szétválasztáshoz. Olyan szelektív membránt használnak, ami csak a vizet engedi át, az ionokat pedig visszatartja. Jellemző alkalmazási területe: tengervíz sómentesítése.

Extrakció: Növényekből nyerhető ki extrakcióval különböző hatóanyagok, illetve illóolajok. A művelet során a szilárd növényi nyersanyagból (előkészítés után) extraktorban a kinyerendő anyagra szelektív oldószert áramoltatnak, majd az oldószert regenerálják, ezáltal kinyerve az értékes komponenst. Élelmiszeripari alkalmazási területe például a kávé koffeinmentesítése diklór-metán vagy etil-acetát oldószerral.

Sajtolás: Növényekből illóolajok nyerhető ki sajtolással. Az eljárás nem szelektív művelet, illetve közben hőeffektusok léphetnek fel, amik az anyag károsodásához vezethetnek. A sajtolás az extrakciót megelőző előkészítő művelet lehet.

2. TECHNOLÓGIA TERVEZÉS ALAPJAI

2.1. Technológia feladatköre

A technológia feladatai közé tartozik minden olyan tevékenység, ami az áramló közeggel kapcsolatos. Ide tartozik a készülékek szükségességének meghatározása, illetve azok technológiai méretezése. Ehhez jellemzően folyamat szimulációk készítésére van szükség. Továbbá fontos feladat, hogy az áramló közeg eljusson egyik pontból a másikba, tehát a technológia felelőssége a vezetérendszer méretezése.

Végül az egyik legfontosabb feladat a teljes technológiai rendszer túlnyomás védelme. Ezen kívül a folyamat szabályzásának kidolgozásában is részt kell venni.

A fentiekhez elengedhetetlen fontosságú a rendszerszemlélet, tehát a folyamatot viszonylag távolról, de egyben kell vizsgálnia a technológia tervezőnek, ezáltal támogatva a pontos részletekkel foglalkozó társszakági tervezők munkáját.

2.1.1. FOLYAMATOK MODELLEZÉSE

Technológia tervezés során a folyamatok modellezése olyan eszköz, mely segítségével betekintést nyerhetünk, várhatóan hogyan fog viselkedni egy újonnan tervezett vagy egy, a tervezés során módosított rendszer. A modellezés jellemzően folyamat szimulátorok segítségével történik, mint pl. ASPEN HYSYS, ChemCAD, Unisim, PROII. A folyamat szimulátorok eredményének értékelése a mérnöki feladat, mely során mérlegelni kell, hogy hihető-e a kapott eredmény.

A modellezés során az első és egyben legfontosabb feladat a megfelelő termodinamikai modell kiválasztása. Általában rendelkezésre állnak irányelvek, hogy milyen közegre mely modell alkalmazható. A teljesség igénye nélkül néhány példát felsorolunk:

- SRK modell: alacsonyabb nyomású szénhidrogén elegyekre
- Peng-Robinson: magas nyomású szénhidrogén elegyekre.
- NRTL: gőz-folyadék és folyadék-folyadék elegyek modellezésére. Erősen nem ideális elegyek modellezésére is alkalmas.
- UNIQUAC: Kevesebb paraméterrel dolgozik, mint az NRTL, de legalább ugyanolyan pontosságú. Bonyolultabb, nem ideális elegyek gőz-folyadék, illetve folyadék-folyadék egyensúlyának modellezésére alkalmas.
- ASME Steam: tiszta vízre.

A megfelelő modell kiválasztásához a legjobb, ha a modellezendő közegről rendelkezésre állnak mérési adatok (pl. gőz-folyadék egyensúlyi adatok, desztillációs görbék), amire a számított értékeket illeszteni lehet, ezzel finomítva az ökölszabály szerinti modellválasztást. A modellválasztás után a szimulátorban felépíthető a folyamat a beépített modulok (hőcserélő, tartály, kolonna, szivattyú, kompresszor, stb.) segítségével. A folyamat beépített optimalizáló algoritmusokkal optimalizálható egy célfüggvény szerint vagy akár külső, Excelben megírt algoritmus is használható. A modell alkalmas hidraulikai számítások végzésére is. Fontos szem előtt tartani azonban, hogy a kritikus mérnöki szemléletmódot nem helyettesíthetik a modellek, szimulátorok.

2.1.2. HIDRAULIKA

A technológia egyik fontos feladata, hogy olyan vezetékhálózatot tervezzen, hogy az áramló közeg eljusson egyik pontból a másikba a technológiának szükséges nyomásszinten. Ehhez hidraulikai számításokat kell végezni, melynek célja az áramlási veszteségek mellett a fluidum áramlási sebességének meghatározása is.

A hidraulikai számítások alapján lehetséges a szivattyúk és kompresszorok technológiai méretése, tehát annak meghatározása, hogy mekkora nyomással kell

megindítani az anyagot, hogy a technológiai rendszer utolsó készülékébe is olyan nyomáson érkezzon meg az anyag, amit a technológia igényel. Gravitációs rendszerekben pedig a számítások alapján meghatározható, hogy az induló tartálynak milyen magasan kell lennie a teljes rendszer megfelelő nyomásának biztosításához. E számítások alapján méretezhető a szabályozó szelepek is, mert a hidraulika alapján megkapjuk az egyes szelepekre eső nyomáseséseket.

Áramlástan alapfogalmak

Stacioner áramlás: vezeték tetszés szerinti keresztmetszetén az áthaladó fluidum mennyisége bármely időpillanatban állandó.

Térfogatáram [m^3/h]: egységnyi keresztmetszeten, egységnyi idő alatt átáramló fluidum térfogata.

Tömegáram [kg/h]: egységnyi keresztmetszeten, egységnyi idő alatt átáramló fluidum tömege.

Áramlási keresztmetszet [m^2]: áramlás irányára merőlegesen vett metszet.

Lamináris (réteges) áramlás: a fluidum részecskéi a csővezeték tengelyével párhuzamosan áramolnak

Turbulens (gomolygó) áramlás: a fluidum részecskéi a haladó mozgáson kívül keresztirányú rendezetlen örvénylő mozgást is végeznek.

Statikus nyomás: a folyadék részecske felületére ható nyomás, egyenlő a csőfalra ható nyomással.

Dinamikus nyomás: a sebességből eredő nyomás, más szóval torlónyomás.

Össznyomás: a statikus nyomás és dinamikus nyomás összege.

Az áramlástan alapegyenletei: Bernoulli-egyenlet (azt fejezi ki, hogy súrlódásmentes közeg áramlásában az össznyomás egy áramvonal mentén állandó) és a folytonosság tétele (azt a tapasztalatot fejezi ki, hogy tömeg nem keletkezhet, és nem tűnhet el, amiből az következik, hogy egy szűkületben az áramlási sebesség megnő).

Hidraulika fogalma

A hidraulika a csövekben áramló közeg áramlási jelenségeivel foglalkozik. Az áramlás nem írható le csak a Bernoulli egyenlettel, mert a valóságban veszteséges az áramlás a csővezeték két pontja között. A csővezetékek iránytöréseinél, elágazásainál, keresztmetszet változásainál további veszteségek lépnek fel. A veszteségek értékét súrlódási és alakveszteségnek nevezzük.

A következő veszteségtényezők adódhatnak egy csőben:

- Csősúrlódási veszteség: A cső falának érdességéből adódik.
- Beömlési veszteség: A cső elején kialakult csőáramlás létrejöttéhez a tapasztalat szerint nagyobb nyomásesésre van szükség, mint amennyi egyenes csőben kialakult áramlás esetén keletkezik. Ezt a többletveszteséget nevezzük beömlési veszteségnek.
- Átmeneti veszteség: A hirtelen keresztmetszet növekedésből adódó áramlási veszteség.

- Kilépési veszteség: Az átmeneti veszteség speciális esete, amikor egy csőből jóval nagyobb térbe áramlik a közeg.
- Szerelvényveszteség: Visszavezethető az átmeneti veszteségre (hirtelen keresztmetszet változás következik be).
- Diffuzor veszteség: Csőbővületeknél jelentkező súrlódási veszteség.
- Csőidom veszteség: Csőívekben és jelentkező jelentős csősúrlódási veszteség.

A nyomásveszteség jelentősen függ az áramlási sebességtől, de függ még az áramló közeg sűrűségétől és természetesen magától a súrlódási tényezőtől. A nyomásveszteség fordítottan arányos a csőátmérővel, tehát minél kisebb a cső, annál nagyobb a nyomáscsökkenés, illetve nagyobb átmérőjű cső kisebb nyomásveszteséget (csökkenést) okoz.

Vezetékrendszer ellenállásának számításával a 3.1.2 Centrifugál szivattyúk üzemi jellemzői fejezet is foglalkozik.

Vezetékhálózatok méretezésének alapelvei

- Az áramló közeg egyik pontból a másikba a technológiának (pl. reakciónak) megfelelő nyomáson érkezzon meg.
- Figyelembe kell venni a vezetékszakaszokon az adott iparági gyakorlat szerint megengedett maximális áramlási sebességeket. Néhány jellemző irányelv:
 - o szivattyú szívóban jelentősen kisebb áramlási sebesség a megengedett, mint a nyomóban.
 - o szivattyú nyomóban a megengedett áramlási sebesség függ a szállított mennyiségtől.
 - o kolonnák fejpára csövében megengedett sebesség a nyomás csökkenésével növekszik.
- Elsősorban a gáz/gőz vezetékeknel figyelembe kell venni a $\rho \cdot v^2$ értékét, ami a cső erodálását jellemző érték (max megengedett: 6000 Pa).
 - o Folyadékoknál: szivattyú szívóban 3000 Pa, nyomóban 15000 Pa a megengedett érték.
- Különös figyelmet kell fordítani a vegyes fázisú vezetékek méretezésére, melyek külön vizsgálandók a hidraulikai számítások során.

Vegyes fázisú vezetékek méretezése

Vegyes fázisú vezetékek méretezése áramlási kép térképek vizsgálata alapján történik. A csövekben, amelyekben egyensúlyi folyadék felfelé áramlik, a közeg jelentős része kigázosodhat a fellépő nyomásesés miatt, és a keletkező vegyes fázis megváltoztathatja az áramlási képet a közeg és a csővezeték tulajdonságaitól függően. Az áramlási képek meghatározása áramlási kép térkép segítségével történik, melyek vizsgálata kulcsfontosságú, hogy elkerüljük a pangó és a dugós áramlást, amely káros lehet a csövekre nézve, mivel rezgések és folyadékütések léphetnek fel, amelyek csökkentik a csővezeték élettartamát.

A csővezeték mentén több különböző ponton meg kell határozni a fázisok tulajdonságait, melyek alapján a Baker vagy a Taitel-Bornea-Dukler diagramok

koordinátái kiszámíthatók és ábrázolhatók. Amennyiben nem megfelelő tartományba kerül az áramlási kép, a számítást meg kell ismételni különböző csőátmérők mellett, amíg olyan eredményt nem kapunk, amely stabil áramlást jelez előre.

Áramlás vízszintes csövekben

A vízszintes csövek áramlási képeinek elemzése során a Baker diagram (2.1. ábra) használható.

Az áramlási kép térkép két koordinátáját az alábbi egyenlettel határozható meg:

$$B_X = \left(v_L \rho_L \sqrt{\rho'_G \rho'_L} \frac{1}{\sigma'} \left[\frac{\mu'_L}{(\rho'_L)^2} \right]^{1/3} \right) / v_G \rho_G$$

$$B_Y = \frac{v_G \rho_G}{\sqrt{\rho'_G \rho'_L}}$$

ahol:

v_L : folyadék sebessége [m/s]

v_G : gáz sebessége [m/s]

ρ_L : folyadék sűrűsége [kg/m³]

ρ_G : gáz sűrűsége [kg/m³]

ρ'_L : a folyadék sűrűségének és a víz sűrűségének a hányadosa

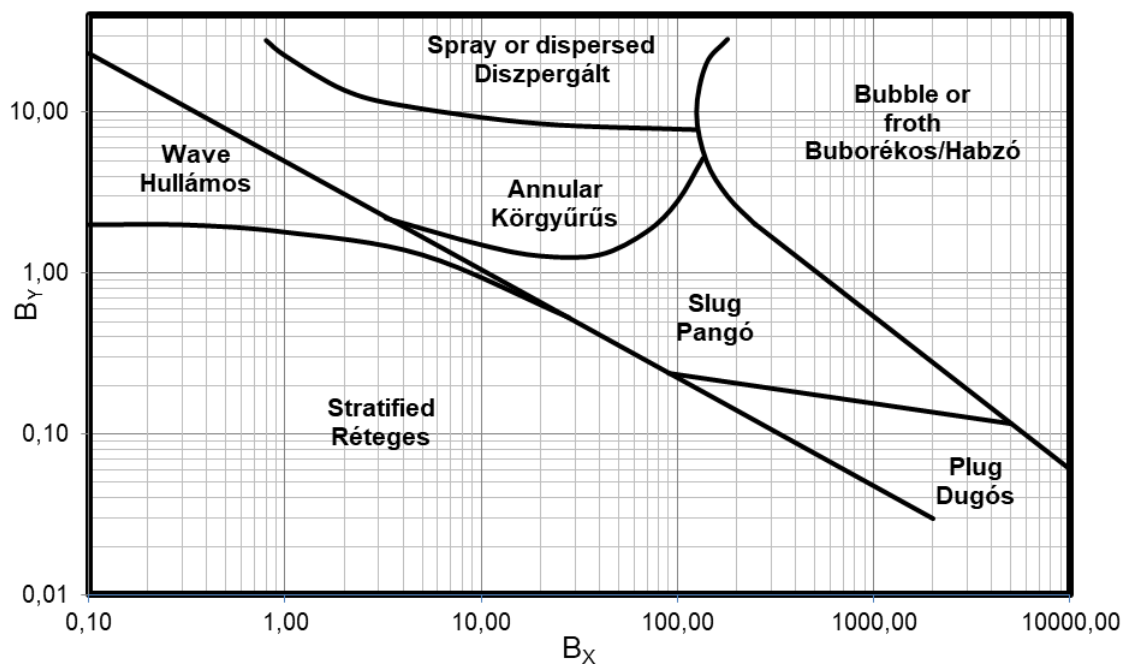
ρ'_G : a gáz sűrűségének és a levegő sűrűségének a hányadosa

σ' : a folyadék felületi feszültségének és a víz felületi feszültségének a hányadosa

μ'_L : a folyadék viszkozitásának és a víz viszkozitásának a hányadosa

A víz és a levegő referencia pontja 20°C-on és atmoszférikus nyomáson értendő.

Baker diagram



2.1. ábra: Baker-diagram

Elkerülendő áramlási képek: pangó (Slug) és dugós (Plug), hogy elkerüljük a rezgés és a folyadékütés keletkezése során fellépő mechanikai problémákat.

Áramlás függőleges csövekben

Az olyan függőleges csövekben, ahol a közeg felfelé áramlik egyensúlyi állapotban, a várható áramlási kép meghatározása Taitel, Bornea és Dukler munkáján alapul.

Az áramlási képek közötti határokat elméleti alapon vezették le az átmenetek alapját képező fizikai jelenségek egyenleteit felhasználva. Az egyenletek a szállított közeg számos fizikai tulajdonságát tartalmazzák, a valós áramlási kép ezeken a tulajdonságokon alapul. Emiatt ezzel a módszerrel jobb eredményeket kaphatunk, mint a kísérletileg meghatározott áramlási kép térképek alapján.

Az áramlási kép térképet a szállított közegre az alábbi egyenletekkel határozzuk meg:
A buborékos áramlás feltétele:

$$\left[\frac{\rho_L^2 g D^2}{(\rho_L - \rho_g) \sigma} \right] \leq 4,36$$

Buborékos - pangó áramlás átmeneti határa:

$$U_{LS} = 3U_{GS} - 1,15 \left[\frac{g(\rho_L - \rho_g) \sigma}{\rho_L^2} \right]^{1/4}$$

Buborékos - diszpergált buborékos áramlás átmeneti határa:

$$U_{LS} = 4 \left\{ \frac{D^{0,429} (\sigma / \rho_L)^{0,089} \left[\frac{g(\rho_L - \rho_g)}{\rho_L} \right]^{0,446}}{\nu_L^{0,072}} \right\} - U_{GS}$$

Diszpergált buborékos határ:

$$U_{LS} = U_{GS} / 0,52 - U_{GS}$$

Pangó - habzó áramlás átmeneti határa:

$$U_{LS} = \sqrt{gD} \times \left(\frac{l_E}{40,6D} - 0,22 \right) - U_{GS}$$

Gyűrűs áramlás határa:

$$\frac{U_{GS} \rho_G^{1/2}}{\left[\sigma g (\rho_L - \rho_g) \right]^{1/4}} = 3,1$$

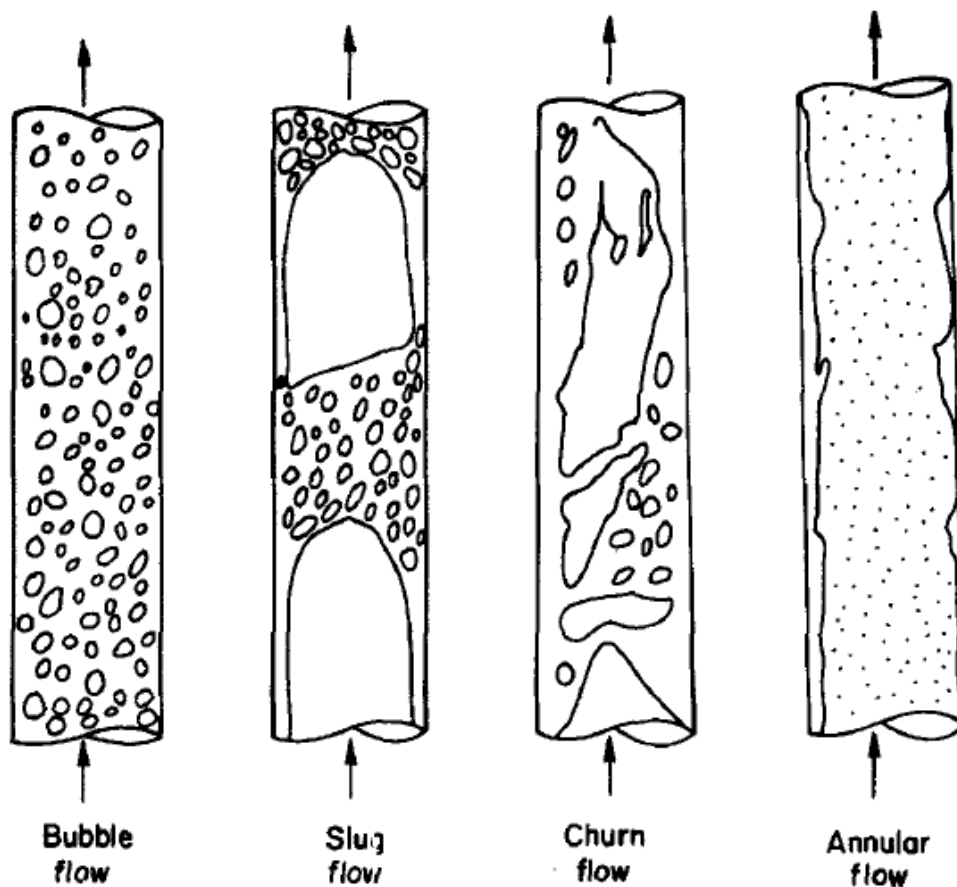
ahol:

U_{GS} :	felületi gőzsebesség,	m/s
U_{LS} :	felületi folyadéksebesség,	m/s
ρ_G :	gőz sűrűség,	kg/m ³
ρ_L :	folyadék sűrűség,	kg/m ³
D :	csőátmérő,	m
g :	gravitációs gyorsulás,	m/s ²
σ :	folyadék felületi feszültség,	N/m
ν_L :	folyadék kinematikai viszkozitás,	m ² /s

A valós üzemi körülményekre vonatkozó közegtulajdonságokkal a fenti képleteket alkalmazva egy áramlási kép térképet rajzolhatunk fel az alábbi feltételezésekkel élve:

- Buborékos áramlás csak akkor lehetséges, ha a buborékos áramlás feltétele teljesül
- A buborékos - diszpergált buborékos átmenet felett csak diszpergált buborékos áramlás lehetséges a buborékos-pangó átmeneti határig
- A diszpergált buborékos áramlási kép a diszpergált buborékos határnál ér véget
- A gyűrűs határ felett csak gyűrűs áramlás lehetséges

Taitel, Bornea és Dukler az alábbi áramlási képeket (2.2. ábra) különböztették meg:



2.2. ábra: Áramlási képek függőleges csőben

Elkerülendő áramlási képek: pangó és dugós, hogy elkerüljük a fluktuáló áramlási mennyiség és a gőzfázis miatt fellépő szabályozási problémákat, valamint a rezgés és a pangó áramlás okozta mechanikai problémákat. (A pangó/dugós áramlás során a folyadék felhalmozódik a függőleges csőszakasz aljában, amíg akkora gáznyomás nem épül fel, hogy a folyadékot felfelé tolja a csőben.)

2.1.3. KÉSZÜLÉKMÉRETEZÉSEK

A készülékek technológiai méretezése eredményeként a technológia szakág adatlapot ad ki, melyen rögzíti a készülék technológiai adatait, illetve megadja a fő méreteit (jellemzően vázlaton is ábrázolva). Ebből a dokumentumból indul ki a

készüléktervezés szakág (kiviteli tervezéskor), illetve ezekből készülhet ajánlatkérési dokumentáció Vendorok felé.

A készülékek méretezésének alapelveit a későbbi fejezetekben készüléktípusonként részletezzük (3-6. fejezetek).

2.1.4. NYOMÁSHATÁROLÁS

A technológia szakág egyik legfontosabb feladata a nyomáshatárolás, mely az utolsó védelmi vonal, ami megvédi a berendezéseket a katasztrofális meghibásodástól. A nyomáshatárolás tervezési szempontjait a 7. fejezetben részletezzük.

2.1.5. IRÁNYÍTÁSTECHNIKA

A szabályozás kidolgozásában a technológia feladata az egyes műszerelemek technológiai specifikálása, vagyis meg kell adni a mérendő jellemzőket, illetve a közeg adatait, amivel a műszer találkozik.

A műszerelemek közé tartozik:

- hőmérséklet mérés eszközei,
- nyomás mérés eszközei,
- szintmérés eszközei,
- áramlásmérés eszközei,
- on-off szerelvények,
- szabályozó szelepek,
- fojtótárcsák
- analizátorok.

Továbbá a szabályzási struktúra kialakítása is a technológia feladata, tehát annak meghatározása, hogy mit és mivel szabályozunk (pl. egy desztilláló kolonna fejnyomását szabályozzuk az elvett nem-kondenzálódó gázok mennyiségével). Ehhez elengedhetetlen a szabályozási formák ismerete, amit a következőkben röviden ismertetünk.

A szabályozás felosztható a szabályozás feladat szerint:

- Értéktartó szabályzás: a szabályozott jellemzőt egy adott értéken akarjuk tartani, kiszűrve a zavarokat. Az alapjelet nem változtatjuk.
- Követőszabályozás
 - o Értékkövető: egy másik szabályozó körből nyerjük az alapjelet (követőjelet), de előre nem ismerjük.
 - o Programozott: az alapjelet előre, program szerint meghatározzuk.

Összetett szabályozási formák:

- Kaszkádszabályzás: egy többhurkos szabályozással megvalósított összetett szabályozási forma, amelyet nagy zavarok esetén eredményesen alkalmazhatunk. A segéd szabályozási kör végzi a zavarhatás csökkentését, illetve megszüntetését, amely a főszabályozási körbe van ágyazva.
- Kisegítő ellenőrző jeles szabályozás: gyengébb minőségű szabályozást képes megvalósítani, mert egy szabályozó lévén, a szakaszhoz illesztett szabályozó struktúrával végzi a zavarjel megszüntetését is.

- Arányszabályozás: a követőszabályozások egyik speciális megvalósítási formája, amely megvalósítható állandó-, és változó arányértékkel egyaránt.
- Előrevezetett zavarjel kompenzációs szabályozás: összetett szabályozási forma, mely a szabályozást a vezérléssel együttesen alkalmazza. A nagy zavarhatások nagy részét vezérléssel szünteti meg, ezáltal jelentősen tehermentesíti a szabályozási kört.
- Split-range szabályozás: összetett szabályozási forma, amikor a módosított jellemző vagy a szabályozott jellemző széles tartományban változhat, ezért több beavatkozó szervre van szükség a teljes tartomány lefedéséhez.

2.2. Tervezési alapok

A tervezési folyamat során a következő alapelveket kell biztosítani:

- A tervezés egy többszakmás tevékenység, melyben részt vesz Technológia, EBK, Engedélyezés, Üzemtervezés, Készüléktervezés, Anyagtechnológia, Magas-, mélyépítés és vezetéktervezés, irányítástechnika és erősáram. Projekttől függően előfordulhat, hogy nem vesz részt benne az összes szakág.
- A tervezést ütemterv alapján kell lefolytatni, melyet a kulcsdokumentumok szintjén kell elkészíteni, figyelembe véve az adatszolgáltatások, megrendelői jóváhagyások időszükségletét.
- A tervezés, a megrendelő és a szakágak közötti oda-vissza irányuló, kölcsönös kommunikáción alapuló, iteratív folyamat.
- Fontos a kölcsönös bizalom, vagyis hogy a tervezésben közreműködő szaktervezők kölcsönösen elfogadják egymás adatait, terveit.
- Minden szakterület tervezési folyamata jellemzően két részből áll, egy koncepcionális és egy részletes tervezési részből.
- A fő tervezési fázisok az alábbiak (a tervezési fázisok költségbecslési pontossága rendre növekszik):
 - Tanulmánytervek készítése (pl. megvalósíthatósági, koncepcionális, telepítési, cost/scoping, stb.) – az üzleti/műszaki döntés-előkészítést támogató dokumentum. Elvárt költségbecslési pontosság: -50 ~ +100%.
 - BASIC (BED) – A technológiai alapkövetelményeket rögzítő dokumentumrendszer. Elvárt költségbecslési pontosság: -15 / -30 ~ +20 / +50%.
 - FEED tervezés – pontosabb költségbecslést lehetővé tevő, valós ajánlatokon alapuló, a kritikus elemeket részletesen definiáló dokumentumrendszer, amely alapján egy Vállalkozó, EPC-LSTK ajánlatot tud tenni. Elvárt költségbecslési pontosság: -10 / -20 ~ +10% / +30%.
 - Kiviteli tervezés, amely célja egy adott projektben:
 - Engedélyeztetési folyamathoz szükséges tervek előállítás
 - A beszerzési folyamat támogatása az ehhez szükséges dokumentációkkal
 - A kiviteli tervek előállítás.

- Üzemeltetés támogatása az ehhez szükséges dokumentumokkal.
 - Elvart költségbecslési pontosság: -3 ~ +15%.
- A kulcsdokumentumok tervfázisonként jellemzően az alábbiak:
 - Tanulmánytervek:
 - Technológiai leírás (technológia)
 - Blokkdiagram (technológia)
 - Előzetes elrendezési rajz (telepítés)
 - Költségbecslés (költségbecslők)
 - BASIC (kiegészül a következő dokumentumokkal):
 - Technológiai folyamatábra (technológia)
 - Hő- és anyagmérleg (technológia)
 - Készülék- és gépjegyzék (technológia)
 - Elrendezési rajz (telepítés)
 - HAZOP/SIL riport (irányítástechnika / technológia)
 - FEED (kiegészül a következő dokumentumokkal):
 - 3D modell (üzemtervezés)
 - Hosszú átfutási idejű berendezések specifikációi (technológia / üzemtervezés)
 - Költségvetési kiírás (üzemtervezés)
 - Kiviteli tervezés
 - FEED tervezés dokumentumainak véglegesítése (összes szakág)
- A tervezés alapját a szerződéses műszaki tartalom képi, amelyet a bejárások eredményének és nagyobb projektek esetén az Engineering Questionnaire-ben rögzítettek alapján lehet részletesebben rögzíteni.
- A tervezés folyamán keletkezett tervdokumentációkat egyértelmű jelölésrendszerrel, valamint a nyomon követhetőség érdekében revízióval kell ellátni.
- A tervek megőrzését mind digitálisan mind papír alapon biztosítani kell és visszakereshetőnek kell lenniük a hatályos jogszabályoknak megfelelően.

3. ANYAGSZÁLLÍTÁS GÉPEI

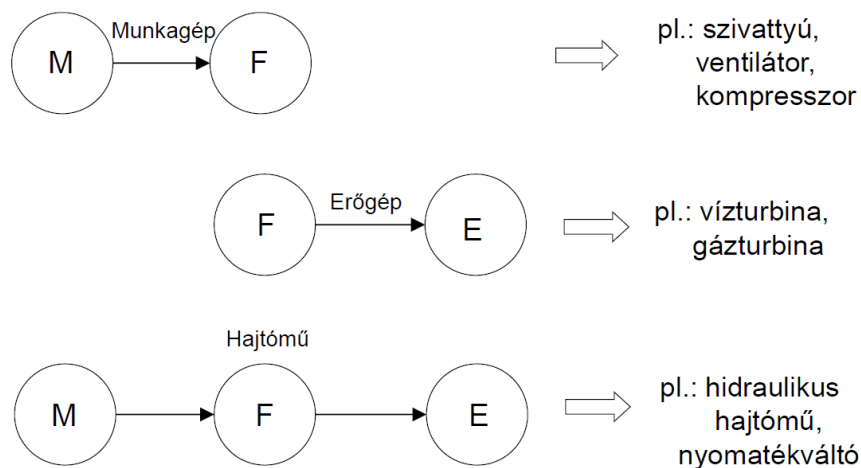
Az anyagszállítás mindennapi feladat a vegyipari technológiákban. A szállított közeg halmazállapota alapján az alábbi gépek fordulnak elő a leggyakrabban:

- Szilárd anyagok szállítása
 - serleges felhordók
 - szállító szalagok
 - pneumatikus szállítás vivőgáz segítségével
- Folyadékok szállítása
 - centrifugál szivattyúk
 - térfogatki-szorításos szivattyúk

- ejektorok (víz v. gőzsugár szivattyú)
- légnyomásos folyadékemelő (mamutszivattyú, montejus)
- Gázok szállítása
 - ventilátorok
 - fúvók
 - kompresszorok

Cseppfolyós vagy gáz halmazállapotú közegek szállítása esetén azok energiatartalmát változtatjuk meg. Az erre alkalmas gépeket **erő- és munkagépeknek** nevezzük (3.1. ábra).

- Erőgépen áramló folyadék energiája csökken, aminek révén a gép tengelyén mechanikai munkát ad le.
- Munkagépen áramló folyadék energiatartalma a gép tengelyén bevezetett mechanikai munka révén nő
- A hajtómű azonos szerkezeti egységbe együtt beépített munka- és erőgép, amely kettős energiaátalakítást végez.



3.1. ábra: Közegek szállítására alkalmas gépek csoportosítása

Az átalakított energia típusa szerint megkülönböztetünk hidraulikus és termikus (vagy kalorikus) áramlástechnikai gépeket (3.2. ábra).

- Hidraulikus áramlástechnikai gépek a közeg mechanikai energiatartalmát változtatják meg (pl.: szivattyú, ventilátor, vízturbina)
- Termikus vagy kalorikus áramlástechnikai gépek a közeg belső energia „hőenergia” tartalmát is megváltoztatják (pl.: gőzturbina, kompresszor, belső égésű motor)

Legismertebb kategorizálás a működési elv szerinti felosztás (3.2. ábra):

- Térfogat kiszorításos (volumetrikus) gépek, ahol a folyadékot tartalmazó tér térfogata változik a folyadék energiaváltozása során. A folyadék áramlása időben változik. (pl.: dugattyús kompresszor, membrán szivattyú)

- Turbó gépek, amelyek működése az impulzus nyomatéki tételen alapszik. A folyadék megszakítás nélkül áramlik át rajta. Lapátozott forgó járókerék jellemzi őket. (pl.: centrifugál szivattyú, turbókompresszor)

		Erőgép	Munkagép
Volumetrikus gép	Hidraulikus	hidraulikus motor	dugattyús szivattyú
	Kalorikus	gőzgép gázmotor	dugattyús kompresszor
Turbógép	Hidraulikus	vízikerék víturbina szélturbina	centrifugál szivattyú ventilátor
	Kalorikus	gőzturbina gázturbina	turbófúvó turbókompresszor

3.2. ábra: Közegek szállítására alkalmas gépek kategprizálása

A következő alfejezetekben a munkagépeket és azok technológia tervezői megközelítését ismertetjük részletesebben.

3.1. Szivattyúk

A szivattyú olyan áramlástechnikai munkagép, amely folyadékokat, folyadékok és szilárd anyagok, folyadékok és gázok vagy gőzök keverékét mint munkaközeget szállítja rendszerint kisebb nyomású helyről bizonyos távolságban lévő, magasabban fekvő vagy nagyobb nyomású térbe.

A működés feltétele: A folyadékszállítás energia felhasználásával valósítható meg. A folyadékkal közölt energia teszi képessé a folyadékot arra, hogy a csővezeték ellenállását legyőzve azon átfolyjon és magasabb szintre vagy nagyobb nyomású térbe kerüljön.

3.1.1. CENTRIFUGÁL SZIVATTYÚK

A legáltalánosabban használt folyadékszállító szivattyúk a centrifugál szivattyúk. A centrifugális szivattyúk járókereke folyadékban forog, így a hajtott vagy egyenes lapátok mentén a centrifugális erő a folyadékot érintőlegesen továbbítja a nyomócső felé a csigaházszerűen szélesedő házba és egyben szívóhatást kelt a járókerék tengely mentén át a szívócsőben.

Előnye:

- kicsi a helyszükségletük
- egyenletes a folyadékszállításuk
- alkalmasak lebegő szilárd anyagot tartalmazó folyadékok szállítására is

- egyszerű szerkezetűek

Hátránya:

- nem önfelszívók
- kicsi a nyomómagasságuk
- közepes a hatásfokuk

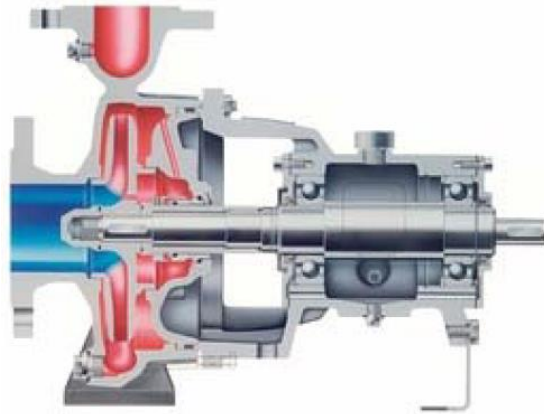
Centrifugál szivattyúk osztályozása

- A járókerék kialakítása szerint:
 - o radiális
 - o félaxiális
 - o axiális
- A járókerék száma szerint:
 - o egyfokozatú
 - o többfokozatú
- A tengely elhelyezése szerint:
 - o vízszintes tengelyű
 - o függőleges tengelyű
- Szerkezeti kialakítás szerint:
 - o egy oldalon csapágyazott (konzolos)
 - o két oldalon csapágyazott
 - o tokozott
 - o mágneskuplungos
- Fordulatszám szerint:
 - o alacsony ($n < 3000$ 1/min)
 - o magas ($n > 6000$ 1/min)

Vízszintes tengelyű egyoldalt csapágyazott (konzolos) egyfokozatú szivattyú:

Általános célú szivattyúk, közepes nyomáson, széles hőmérsékleti tartományokban használható. Járókerék cseréjéhez, csapágy, ill. tömítés javításokhoz nem kell megbontani a csővezeték csatlakozásokat. Az egyik legegyszerűbben szerelhető típus (3.3. ábra). Az egy járókerék által elérhető emelőmagasság, ill. a szállítható folyadékmennyiség csak bizonyos korlátokig növelhető. E határokon túl a szállítómagasság vagy a folyadékmennyiség már csak a kerekek számának növelésével, azok megfelelő összekapcsolásával, csoportosításával emelhető.

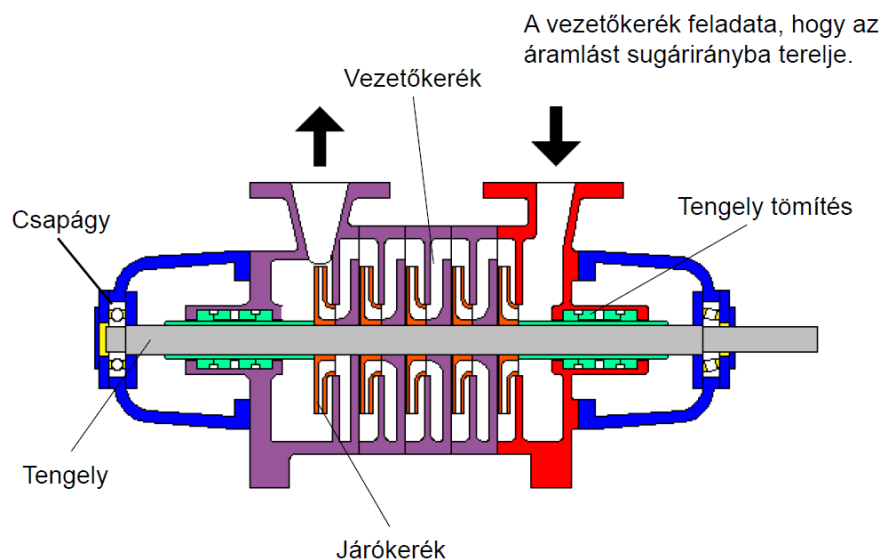
Jelenleg a Finomítás területén ez a legelterjedtebb szivattyútípus.



3.3. ábra: Vízszintes tengelyű egyoldalt csapágyazott egyfokozatú szivattyú

Vízszintes tengelyű kétoldalt csapágyazott többfokozatú szivattyú:

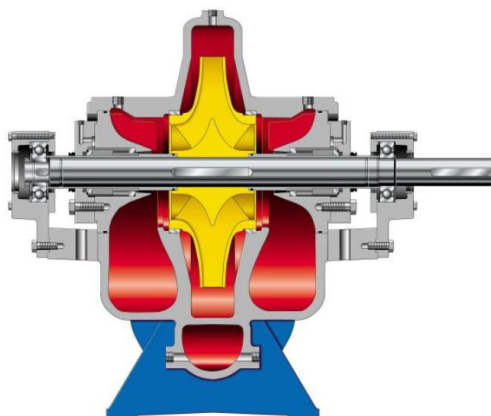
Több járókeres kivitel esetén, ha a szállítómagasság emelése a cél, akkor a kerekek egymás után, tehát sorba kapcsolásával a többlépcsős kivitel jelent megoldást. A kétoldali csapágyazás miatt jobban oszlik el a megterhelés, ezért egyenletesebben jár (3.4. ábra).



3.4. ábra: Vízszintes tengelyű kétoldalt csapágyazott többfokozatú szivattyú

Kettős beömlésű centrifugál szivattyú

Ha a szállított folyadékmennyiséget kell növelnünk, akkor a kerekeket párhuzamosan kell kapcsolnunk: két kerék párhuzamos kapcsolása esetén az ún. kettős beömlésű járókerékről beszélünk (3.5. ábra).



3.5. ábra: Kettősbeömlésű centrifugál szivattyú

Centrifugál szivattyú szabványok

A következő táblázat (3.1. táblázat) az Európában használatos szivattyú szabványokat tartalmazza. Iparáganként más szabványok használata elfogadott, melyet a tervezés során figyelembe kell venni.

Érvényességi terület	Szabvány száma	Szabvány címe	Szivattyú típus	Összefoglalás/Alkalmazási terület
Észak Amerika	API 610	Centrifugal pumps for petroleum, petrochemical and natural gas industries	Overhung (OH): 6types Between bearings (BB): 5types Vertically suspended (VS) 7 types	Az API610 az American Petroleum Institute (API) olaj-, gázipari centrifugál szivattyúkra vonatkozó követelmény rendszerét foglalja magába.
Európa	ISO 13709	Centrifugal pumps for petroleum, petrochemical and natural gas industries		API 610 szabvány ISO megfelelője
Észak Amerika	ANSI B 73.1	Specification for horizontal end suction centrifugal pumps for chemical process	Vízszintes tengelyű, egyfokozatú egyoldalt csapágyazott szivattyúk	A szabványos szivattyúk szivattyúméretei és hozzávetőleges teljesítménye (teljesítmény és emelőmagasság) megadva. (alakszabvány is egyben biztosítva a szivattyúk csereszabátosságát)
Európa	ISO 2858	End-suction centrifugal pumps (rating 16 bar) – Designation,	Vízszintes tengelyű, egyfokozatú egyoldalt	Maximális üzemi nyomás 16 bar. A szivattyú méretei és a névleges munkapontok vannak megadva.

Érvényességi terület	Szabvány száma	Szabvány címe	Szivattyú típus	Összefoglalás/Alkalmazási terület
		nominal duty point and dimensions	csapágyazott szivattyúk	
Európa	ISO 9905 (JIS B 8307)	Technical specifications for centrifugal pumps – Class I	Egy- és többfokozatú, vízszintes és függőleges tengelyű	A I. (legszigorúbb) centrifugál szivattyú-osztály követelményeihez, a szabványosításhoz, a gyártás és felhasználás racionalizálásához, valamint a minőség javításához hozták létre. Alkalmazható villamosenergia-termelő iparágban.
Európa	ISO 5199 (JIS B 8308)	Technical specifications for centrifugal pumps Class II	Egy- és többfokozatú, vízszintes és függőleges tengelyű	A II. centrifugál szivattyú-osztály követelményeihez, a szabványosításhoz, a gyártás és felhasználás racionalizálásához, valamint a minőség javításához hozták létre. Alkalmazható vegyiparban.
Európa	ISO 9908 (JIS B 8309)	Technical specifications for centrifugal pumps Class III	Egy- és többfokozatú, vízszintes és függőleges tengelyű	A III. centrifugál szivattyú-osztály követelményeihez, a szabványosításhoz, a gyártás és felhasználás racionalizálásához, valamint a minőség javításához hozták létre. Általánosan alkalmazható kereskedelmi forgalomba hozott szivattyúkhöz.

3.1. táblázat: Centrifugál szivattyú szabványok

A kőolajfinomítás területén az alábbi szabványok alkalmazása elfogadott:

- Magas igénybevétel: API 610
- Normál igénybevétel: EN ISO 5199
- Tengelytömítés nélküli: API 685

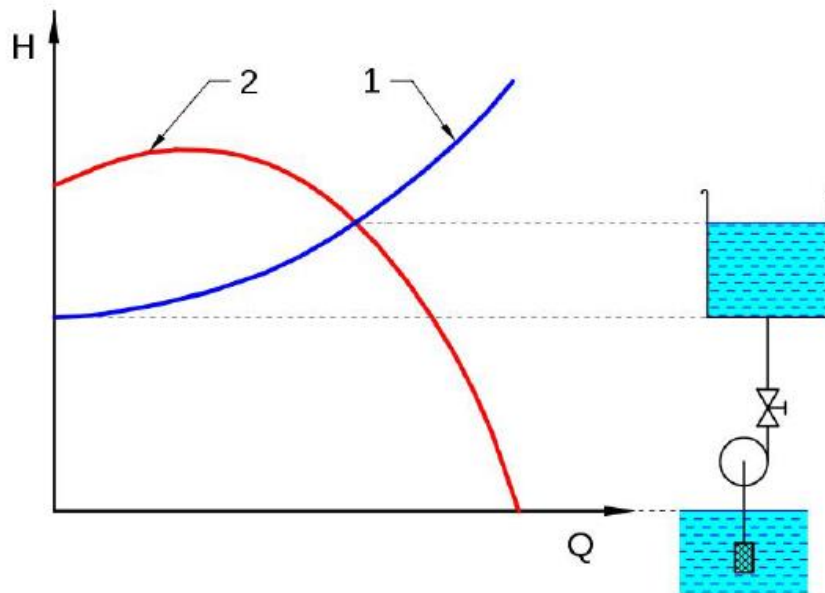
API 610: Centrifugal pumps for petroleum, petrochemical and natural gas industries

Az API 610 az American Petroleum Institute által írt és szabályozott szabványkészlet, amely biztosítja a berendezések megbízható és biztonságos működését potenciálisan veszélyes iparágakban vagy körülmények között. Ez a szabvány a vegyiparban, olaj- és gáziparban használt centrifugál szivattyúk biztonsági, karbantarthatósági és megbízhatósági minimumkövetelményeire összpontosít. A szabvány számos centrifugál szivattyú típusra vonatkozik, beleértve a vízszintes és függőleges tengelyű szivattyúkat, az egy- és többfokozatú, illetve egyoldalt vagy kétoldalt csapágyazott

szivattyúkat. Az API 610 szivattyúkat számos területen használják, például tengeri olajfúrótornyokon, szárazföldi olajtermelő létesítményekben, finomítóknak, vegyi és gázfeldolgozó üzemekben, valamint erőművekben.

3.1.2. CENTRIFUGÁL SZIVATTYÚK ÜZEMI JELLEMZŐI

Általánosságban elmondható, hogy a szivattyús szállítás akkor valósul meg, ha a szivattyú által a folyadéknak átadott energia nagyobb, mint a rendszer ellenállása (3.6. ábra). Szivattyú specifikálásakor tehát egyik legfontosabb a szükséges emelőmagasság meghatározása. Ehhez viszont ismerni szükséges a rendszer ellenállását.



3.6. ábra: Csővezeték (1) és szivattyú (2) jelleggörbéje

1: A csővezeték jelleggörbéje adja meg az összefüggést a csővezetékben átfolyó térfogatáram (Q) és a veszteségmagasság között. Ez tükrözi a csővezeték rendszer ellenállását

2: A centrifugál szivattyú szállítóképességét a $Q - H$ koordináta rendszerben jelleggörbével adjuk meg. A jelleggörbe a Q térfogatáram (pl. m^3/s) és a H emelőmagasság (m) közötti kapcsolatot adja meg. A jelleggörbe alakjából látszik, hogy ha a térfogatáram növekszik, akkor csökken az emelőmagasság, azaz az emelőmagasság és a térfogatáram kölcsönösen függenek egymástól. A görbe meredekségét a szivattyú szerkezete határozza meg.

A két jelleggörbe metszéspontja a munkapont, ahol a szivattyú emelőmagassága és a csővezeték veszteségmagassága egyensúlyt tart. A rendszer ellenállásának változtatásával (pl. szabályzó szelep nyitottságának, ezáltal nyomásesésének megváltoztatásával) a munkapont eltolható, így a szállított mennyiség megváltozik.

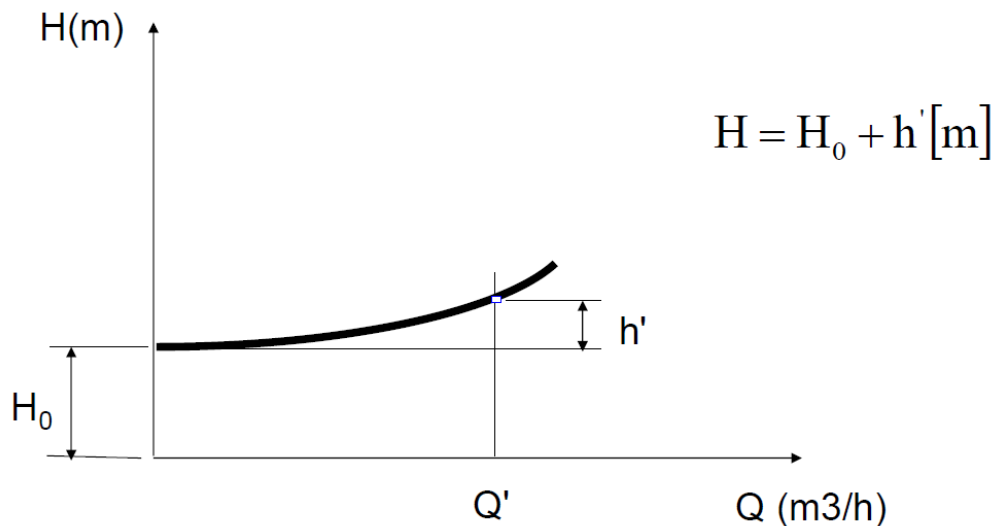
A vezetékrendszer ellenállása 3 tagból tevődik össze:

1. Csővezeték súrlódásából adódó veszteség
2. Csővezeteki elemek ellenállása (szerelvények, idomok, szűrők)
3. Szintkülönbség

A csővezeték jelleggörbéje

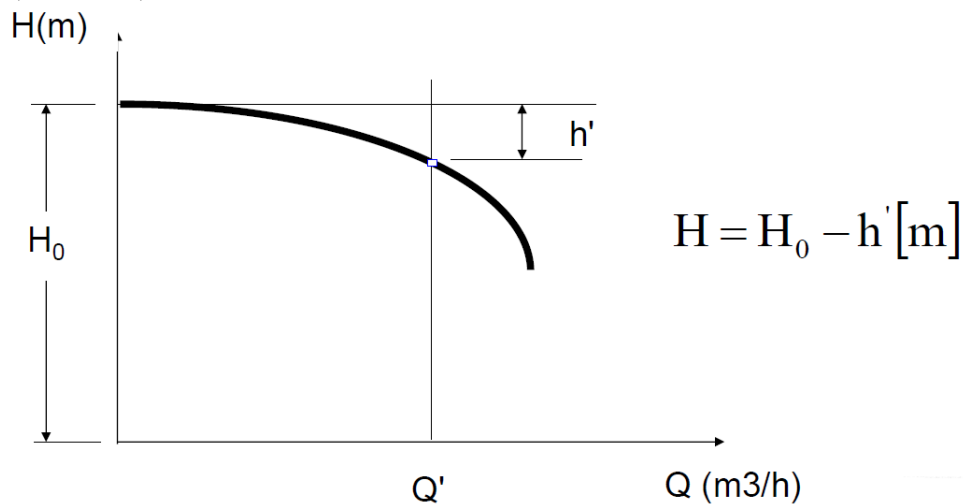
A csővezeték jelleggörbéje (ellenállása) értelmezhető mind a szivattyú nyomó, mind szívóvezetékére. A nyomóoldali ellenállásnak a szivattyú emelőmagasságának meghatározásában, míg a szívóoldalnak a szívóképesség (NPSH) meghatározásában van szerepe.

Szivattyúhoz kapcsolt csővezetéken a víz felszállítása egy alsó szintről, ahol a statikai (H_0) és a veszteség magasság (h') összege terheli (3.7. ábra) a szivattyút:



3.7. ábra: A csővezeték jelleggörbéje I.

Ha a csővezeték egy H_0 magasságú felső szintről vezeti le a vizet, akkor a cső végén rendelkezésre álló munkaképességet, vagyis a H_0 esést a veszteségmagasság (h') kisebbíti (3.8. ábra):



3.8. ábra: A csővezeték jelleggörbéje II.

A csővezetékeken felül a rendszer ellenállása tartalmazza a berendezések (pl. hőcserélők, szűrők, koaleszcerek) nyomásesését, melyet figyelembe kell venni a szivattyú specifikálásakor.

A csővezeték ellenállását lehet nyomás vagy hossz mértékegységben (m-ben) számolni, de a szivattyú emelőmagasságát hossz mértékegységben adják meg a gyártók. A nyomásvesztés és a szállítómagasság egy egyszerű szorzás vagy osztás művelettel átszámolható a másik mennyiségre:

$$p' = h' \cdot \rho \cdot g$$

ahol

p a nyomásvesztés vagy szállítómagasság [Pa]

ρ a szállított közeg sűrűsége [kg/m³]

g a gravitációs gyorsulás [m/s²]

Csősúrlódás által okozott veszteség magasság

A veszteségmagasság az alábbi módon írható fel egy egyenes csőszakaszra állandósult áramlás esetén:

$$H_{\text{cső}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} [\text{m}]$$

ahol:

l [m] a cső hossza

d [m] a cső átmérője

v [m/s] áramlási sebesség a csőben

g [m/s²] gravitációs gyorsulás

λ csősúrlódási tényező (0,02 – 0,03)

A csősúrlódási tényező (λ) alapvetően a Reynolds-számtól, a csőfal érdességtől (k), a csőátmérő és az érdesség relatív viszonyától függ. Az értékek meghatározása kétféle módon lehetséges:

- diagram segítségével
- csősúrlódási tényezőt leíró empirikus képletek alkalmazásával

Alaki ellenállás által okozott veszteség magasság (ívek, szűkítő, szelep)

A technológiai rendszerekben nem csak egyenes csővezeték szakaszok találhatóak. Különböző ívek (eltérő görbületes sugárral), könyökök, T-idomok, elágazások, diffúzorok, konfúzorok, stb. Ezen felül lehetnek még a rendszerben különböző szerelvények, szűrők. A leválasztók, hőcserélők és még egyéb elemek is. Ezek veszteségét is szükséges meghatározni.

A fentebb felsorolt különböző csővezeteki elemekhez az alábbi képlet veszteségtényezőt rendel, és a nyomásvesztést a tényező és az áramlási sebesség függvényében lehet kiszámolni elemenként

$$H_{\text{alaki}} = \sum_{i=1}^n \zeta_n \frac{v^2}{2g} [\text{m}]$$

ahol:

v [m/s] áramlási sebesség a csőben

g [m/s²] gravitációs gyorsulás

ζ_n n-edik elem alaki ellenállás tényezője

Tehát a veszteség az áramlási sebesség négyzetétől függ, ahogy az egyenes csőszakasz esetén is. Az egyenes csőszakasz veszteségénél tehát az $(\lambda \cdot L / d)$ tag felfogható az egyenes csővezeték ξ tényezőjének, ahol a λ állandónak tekinthető a legtöbb esetben. A veszteségtényező viszont egyes idomokra lehet állandó vagy térfogatáramtól függően változó, vagy szabályzó szerelvények esetén a szerelvény beállítási pozíciójától függő. Az utóbbi esetben legtöbbször rendelkezik az elem valamiféle karakterisztikával, térfogatáram (sebesség) szerinti nyomásesés görbével. Ezt a görbét a szerelvény vagy egyéb elem gyártója általában megadja.

Egy másik számítási módszer alapvetően hasonló, csak technikailag különbözik. A számítás formailag hasonló. A veszteségek számítása alapvetően azon az elven zajlik, hogy a valóságos rendszer helyett, egy virtuális, vele veszteséges szempontjából egyenértékű csővezeték rendszer veszteségével helyettesítjük az eredeti rendszer elemeit. Az alap egyenes csővezeték számítása viszonylag egyszerű módon zajlik és a többi elemvesztése úgy fejezhető ki, hogy azoknak ugyanakkora vesztesége van, mint egy azonos átmérőjű X hosszúságú vezetéknek. Az X hosszat nevezzük egyenértékű csőhossznak. (Ez esetben térfogatáramtól függetlennek tekintjük az idom veszteségét.) A rendszer összesített vezetékossza (valós + virtuális szakaszok) segítségével határozható meg a rendszer nyomásesése egy adott térfogatáram mellett.

Kavitáció, szívóképesség, NPSH

A szivattyú szívoldali kialakításától és a szállított térfogatáramtól függően előfordulhat olyan állapot, hogy a szivattyú nem képes a Q-H diagramon megadott paraméterek teljesítésére, nem képes felszívni a szállítandó közeget rendeltetésszerűen. Ennek egyik valószínű oka a kavitáció. A kavitációs jelenség a túlságosan lecsökkent szívóoldali nyomás miatt alakul ki, a nem megfelelő szívóoldali kialakítás és / vagy hidraulikai feltételek következménye.

A kavitáció az áramló folyadék azon részén lép fel, ahol a nyomás a legkisebb (szivattyúnál a lapát belépő éle közelében). Ha az abszolút nyomás az áramlás során az ott uralkodó hőmérsékletnek megfelelő telített gőz nyomására (P_g) csökken, akkor ott a folyadék homogenitása megszűnik, a folyadékban úr keletkezik, amit a folyadékból kivált gőzök és gázok töltenek ki. Ez gyakorlatilag egy kétfázisú folyadékteret jelent, víz-vízgőz keveréket. Ez az állapot csak rövid ideig áll fent. Ha áramláskor a gőzbuborékok a telített gőz nyomásánál nagyobb nyomású helyre érkeznek, a buborékok összeroppannak a folyadékban uralkodó hangsebességgel. Ez az ütésszerű folyamat egy kis felületre akár több száz bar intenzitású, szabálytalanul váltakozó nagy frekvenciájú ütest mér. Ez az a folyamat, ami a járókerék lapátózását károsítja, felületi erózióhoz vezet, de képes az egész lapátózást „megenni” idővel.

Víz esetén a telítési gőznyomás kb. 2500-3500 Pa 20 °C-on. A telítési gőznyomás függ a vízben levő szennyezőanyag tartalomtól, mert azok növelik a buborékképződésre való hajlamot. Buborékok normálállapotban is találhatóak a vízben. Más anyagoknál a hőmérséklet szintén igen erősen befolyásoló tényező. Szénhidrogén származékoknál (pl.: benzin) a nyári és téli üzemre vonatkoztatott telítési gőznyomás nagyon eltérő lehet. Benzinnél ez kb. 45 kPa és 60 kPa közötti érték.

A kavitációs jelenség további káros következménye, hogy csökkenti a szivattyú szállítási teljesítményét, szélső esetben a szivattyú elejti a folyadékot. Az áramlási csatornát (lapátok között) nem folyadék, hanem gőz-folyadék kétfázisú keverék alkotja, ami az eredetileg elvárt áramképet tönkreteszi, ezáltal a kavitációs zóna gyakorlatilag a lapátprofilat változtatja meg azzal, hogy blokkolja részben az áramlást.

A kavitáció okai összefoglalva:

- A nagy helyi áramlási sebesség.
- A szállított folyadék felmelegedése, ez befolyásolja a telítési gőznyomást.
- Nyomáscsökkenés a szívóoldali tartályban vagy a geodetikus szívómagasság növekedése, ill. a hozzáfolyási magasság csökkenése.

A kavitációs jelenség káros következményei az alábbiakban foglalhatók össze:

- A kezdeti kavitációt sustorgó hang, majd felerősödő zörejek jelzik. A kavitáció súlyosbodása során egyre hangosabb lesz. A kifejlődött kavitációt jellegzetes csattogó, pattogó hang kíséri. Szuper- kavitációs állapot elérésekor a zaj némileg csökken és a vibráció is, de a szivattyú szállítóképessége gyakorlatilag teljesen megszűnik.
- Kedvezőtlené válnak a szivattyú hidraulikai jellemzői, csökken a hatásfok és a folyadékszállítás.
- A gőzbuborékok összeroppanása szerkezetianyag-roncsolást idézhet elő, ami a felületen (főként a járókerék szívóoldalán) apró, majd nagyobb részecskék kiszakadásában, szivacshoz hasonló lyukacsosságban, átmaródásban, végül nagyobb darabok letöredezésében nyilvánul meg.

A kavitáció elkerülésének lehetőségei:

- jó szívóképességű (NPSH) szivattyú megválasztása
- a geodetikus szívómagasság helyes megválasztása
- szívóvezeték megfelelő kialakítása (hossz, átmérő)

A szívóképesség a szivattyú alkalmazhatóságának igen fontos mérőszáma, amely a gép szívó-oldali nyomás-viszonyairól a kívánatos kavitáció mentes üzem esetére ad tájékoztatást. A fenti kijelentések segítenek megérteni a jelenséget és beazonosítani, de számszerű leírást nem adnak. Erre szolgál az NPSH.

A szívóképességet, vagyis a belső nyomásesést NPSH rövidítéssel szokás (Net Positive Suction Head = tiszta pozitív szívómagasság) jelölni. Az NPSH értelmezhető mind a

szívóoldali rendszerre (rendelkezésre álló NPSH, NPSH_a) mind a szivattyúra (szükséges NPSH, NPSH_r).

A szivattyú akkor felel meg az adott szállításra (kavitációmentes üzem feltétele), ha a szivattyú NPSH_r (required) értéke kisebb, mint a rendelkezésre álló NPSH_a (available) a rendszer oldal felől.

A rendszer oldali NPSH az alábbi módon számolható (méterben):

$$NPSH_a(Q, T) = \frac{p_0 - p_g(T)}{\rho * g} - h'(Q) - H_s$$

ahol,

- p_0 – Szívótér nyomása, tartályból szívás esetén tartálynyomás [Pa]
- p_g – Folyadék telítési gőznyomása adott hőmérsékleten [Pa]
- h' – Szívóvezeték veszteségmagassága [m]
- H_s – Geodetikus szintkülönbség szivattyú szívócsonkjá és a folyadékszint magassága között [m]

A geodetikus szívómagasság megállapításánál a koordináta rendszer pozitív irányának definiálása lényeges és önkényes. Amennyiben a szivattyú szívócsonkját tekintem '0' szintnek akkor a földfelszín felé mutató irány a pozitív irány. Ebben az esetben, ha a folyadékfelszín X értékkel magasabban van a szivattyú szívócsonkjánál, akkor a $-H_s$ tag összességében pozitív lesz, ami növeli az NPSH_a értékét. Természetesen fordítottan is lehet kezelni. Tartályban levő folyadékszint a '0' szint és a pozitív irány felfele mutat.

Szivattyú NPSH igény:

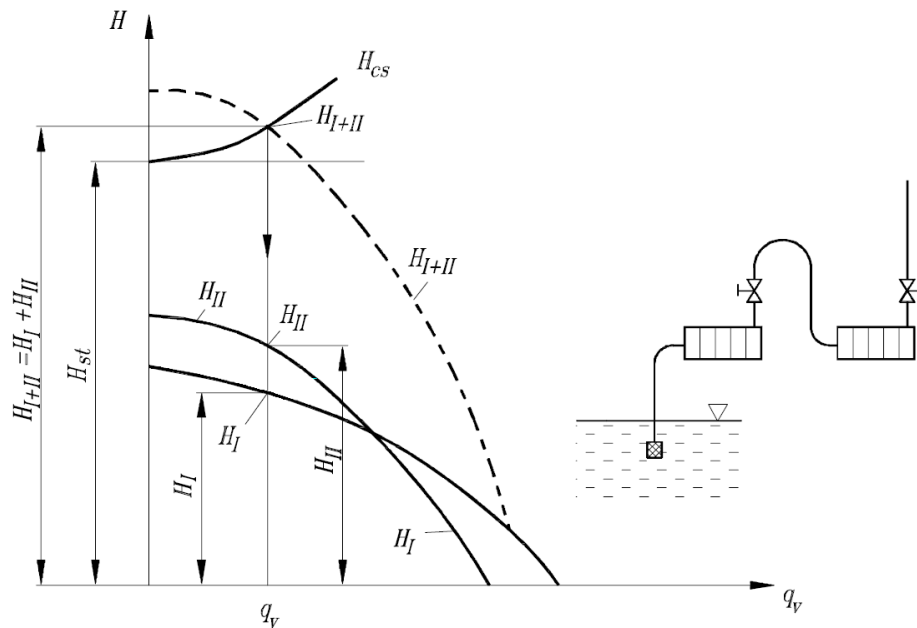
Jellemzésére a névleges munkaponthoz tartozó érték, ill. az térfogatáram (Q) és a fordulatszám (n) függvényeként ábrázolt jelleggörbe szolgál. Ezeket a gyári katalógusban lehet megtalálni.

Szivattyúk soros vagy párhuzamos kapcsolása

A műszaki gyakorlatban előfordulhat, hogy több szivattyú egy közös fejcső segítségével számtalan helyről képes szívni és közös fejcsövön egy vagy több végpont felé képes szállítani. A változatos kapcsolatok és aktuális szállítás függvényében a szivattyúk soros vagy párhuzamos kapcsolásával a szállítás paramétereit erősen módosulhatnak.

Soros kapcsolás

Előfordulhat olyan eset, hogy az emelőmagasság nagyobb, mint ami egyetlen szivattyú előállítani képes. Ez esetben megfelelő számú szivattyú sorba kapcsolásával (3.9. ábra) elérhető a kívánt emelőmagasság. Ajánlott azonos vagy hasonló teljesítményű szivattyúkat sorba kapcsolni, de szivattyúktól függően működik a sorba kapcsolás, amennyiben mindegyik szivattyú a megengedett működési tartományán belül üzemel.

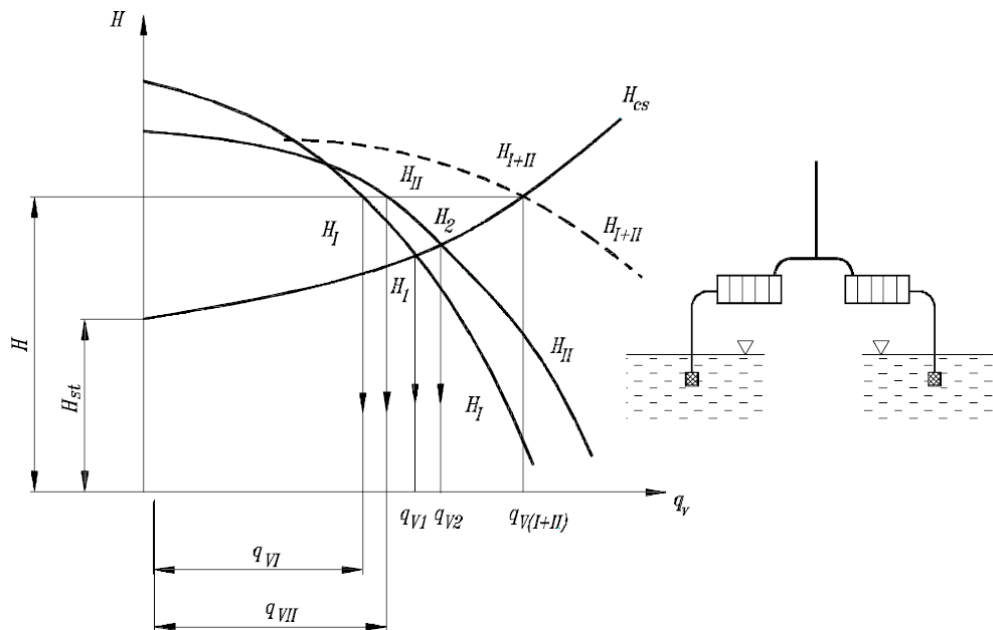


3.9. ábra: Szivattyúk soros üzeme

A szivattyúk sorba kapcsolása nem más, mint járókerekek sorba kapcsolása. Többfokozatú (többlépcsős) gép esetén a szállítómagasságok összegződnek (a térfogatáramnak állandónak kell lennie a két szivattyúra nézve). A két jelleggörbe helyettesíthető az eredő jelleggörbéjükkel. Az eredő jelleggörbe szállítómagassága az adott térfogatáramokon vett szállítómagasságok előjeles összege. H_{cs} terhelési görbe esetén egyik szivattyú sem elégséges a szállításhoz önmagában. H_I és H_{II} szivattyú jelleggörbék összegzése után látható, hogy van metszéspont az eredő jelleggörbe és a terhelési görbe között. A munkaponthoz tartozó térfogatáramot visszavetítve az eredeti jelleggörbékre megkapható, hogy az egyes szivattyúk mekkora emelőmagassággal részesednek az eredő szállítómagasságából.

Szivattyúk párhuzamos üzeme

A párhuzamos kapcsolásban (3.10. ábra) üzemelő szivattyúk rendelkezhetnek saját- vagy közös szívóvezetékkel is. Ez a veszteség számítás szempontjából légyeges, mert mint láttuk, hogy az NPSH ettől erősen függhet. Párhuzamos kapcsolás esetén fokozottabban igaz, ami a soros kapcsolás esetén, azonos vagy nagyon hasonló jelleggörbéjű szivattyúk párhuzamos kapcsolása kívánatos üzemvitel szempontjából.



3.10. ábra: Szivattyúk párhuzamos üzeme.

Párhuzamos kapcsolás esetén az azonos emelőmagassághoz tartozó térfogatáramok előjeles összegzésével lehet megkapni az eredő szivattyú jelleggörbét a két szivattyú jelleggörbéit felhasználva. Az eredő jelleggörbe és a terhelési görbe által meghatározott munkapont szállítómagasságát vetítjük vissza a függőleges tengely irányába és az egyes szivattyúk jelleggörbéinek a metszéspontjainál leolvasható térfogatáramot szállítják.

Az is látható, hogy önálló üzemben is képes lenne mindkét szivattyú szállítani, de együttes üzem esetén, a szállítómagasság és térfogatáram is nő (ez igaz a soros üzemre is).

Általánosan elmondható azonban, hogy párhuzamos kapcsolás esetén a két szivattyú együttesen többet szállít, mint bármelyik egyedül, de kevesebbet, mint a külön-külön való szállításkor adódó térfogatáramok összege.

Szivattyúk szabályozása

A szabályozás célja a szivattyú által szállított folyadék szükséges térfogatáramának valamint a rendszer ellenállásának megfelelő emelőmagasság (nyomónyomás) beállítása.

A szabályozás ennek megfelelően:

- csak a térfogatáram megváltoztatását célozza
- mind a térfogatáramot, mind a szállítómagasságot megváltoztatja.

A szivattyúknál alkalmazott szabályozások:

- Fojtásos
- Visszavezetéses
- Fordulatszám változtatás
- Járókerék átmérő-változtatás
- Lépcsős szabályzás

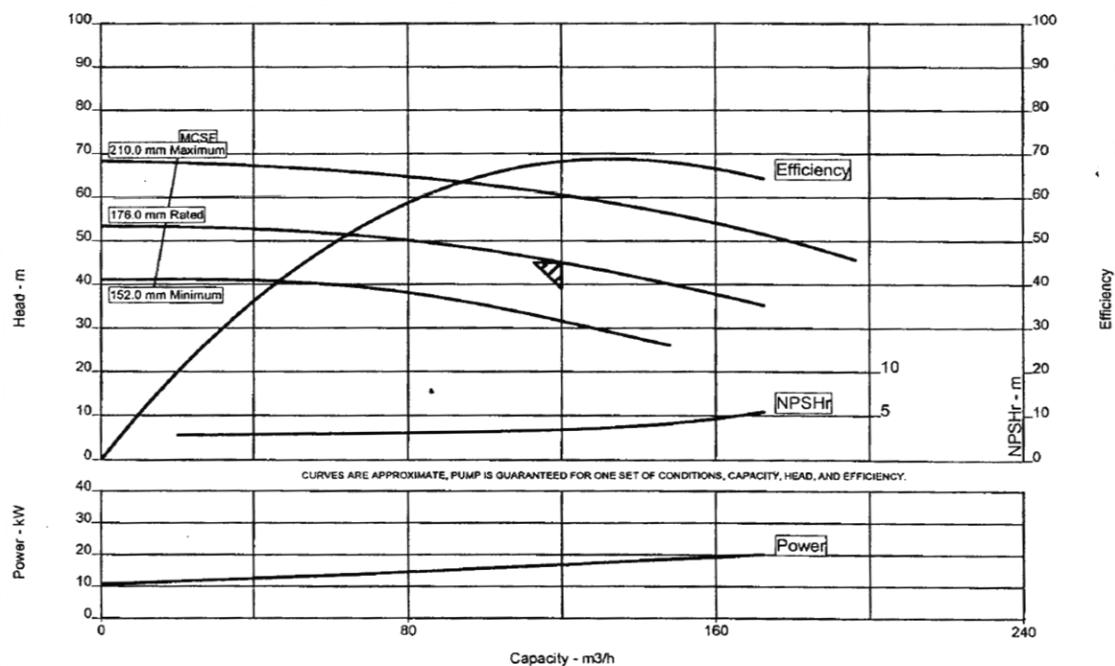
Szivattyúk specifikálása, kiválasztása

Amikor egy gépet specifikálunk, kiválasztunk és alkalmazunk azzal egy meghatározott feladatot akarunk végeztetni.

Kiválasztás szempontjai:

- technológiai elvárásoknak feleljen meg (H, Q, η , NPSH);
- a szivattyú alkatrészei a szállítandó közeggel szemben ellenállóak legyenek (korrózió, erózió, hőmérséklet);
- az energiaellátási rendszerhez illeszthető legyen;
- biztonságtechnikai előírásoknak feleljen meg (védőburkolat, zajterhelés, kezelhetőség);
- gazdaságosság

A gyártó által biztosított szivattyú adatlap tartalmazza a szivattyú jelleggörbét (3.11. ábra), mely a Q szállított mennyiség függvényében mutatja a H szállítómagasság, Pt energiafogyasztás, η hatásfok és NPSHr értékeket, valamint tartalmazza a névleges munkapontot.



3.11. ábra: Szivattyú jelleggörbéje

3.1.3. TÉRFOGAT KISZORÍTÁS ELVÉN MŰKÖDŐ SZIVATTYÚK

Térfogat kiszorítás elvén működő szivattyúk a munkatér térfogatának változó növelésével és csökkentésével a szállítandó közeget beszívja, majd kiszorítja továbbítja.

Ezek a szivattyúk a centrifugál szivattyúkhoz képest kisebb mennyiségű, de lényegesen nagyobb nyomású közeg szállítására alkalmasak.

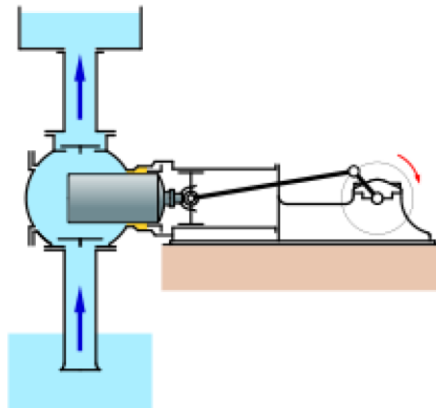
Kis belső veszteségeik következtében összehatásfokuk kedvező. Hátrányuk a folyadékszállítás egyenlőtlensége és a fordulatszám növekedésével járó fokozottabb kavitációs veszély.

Szabályozásuk fojtással tilos! A nyomásnövekedés rövid idő alatt teljesen tönkretelheti a szivattyút. Védelmükre általában biztonsági szelepet alkalmaznak, ami lehet a szivattyú részeként a testbe építve, vagy külön visszakeringető vezetékben. Ez utóbbi megoldás előnye, hogy a biztonsági szelep hibája esetén nem kell az egész szivattyút szétszedni.

Térfogat kiszorításos szivattyúk leggyakoribb osztályozása a kiszorító elem típusa szerinti:

- dugattyú
- membrán
- fogaskerék
- csavarorsó
- görgős

Dugattyús szivattyú (3.12. ábra): kiszorító elem egyenes vonalú lengő mozgást végző dugattyú.



3.12. ábra: Dugattyús szivattyú

Méret- és nyomástartománya igen magas, egészen apró adagolószivattyúktól a nagy bedolgozószivattyúkig mindenféle feladatra alkalmasak. Gyakorlatilag bármilyen folyadékot elszállít, ami képes keresztülmenni a szelepein. Szállíthat bitument, de akár folyékony propánt is, de jellemző alkalmazási területe a viszkózus folyadékok szállítása. Sajnos a folyadékszállítása erősen lengő. Ez ellen folyadékakkumulátorral, légüsttel vagy duplex kivittel lehet védekezni.

Előnyei:

- Egyszerű, pontos szabályozhatóság (lökethossz vagy löketség állításával)
- Robosztus felépítés
- Jó szívóképesség
- Nagy nyomások előállítására alkalmas

Hátrányai:

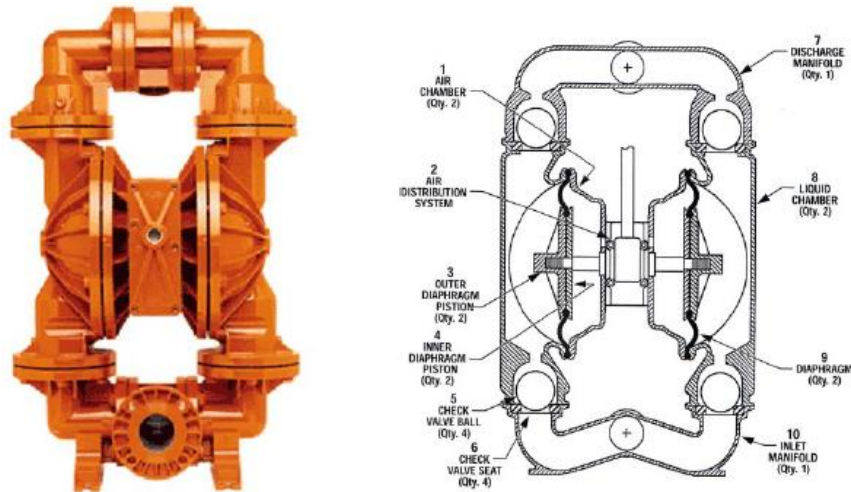
- Nem kívánt rezgések átadása a csővezeték hálózatra

- Energetikailag rossz hatásfok
- Szállítóteljesítménye kicsi vagy közepes
- A szelep kialakítása az érzékeny pontja

Alkalmazási terület:

- Főleg viszkózus folyadékok szállítására

Membrán szivattyú (3.13. ábra): a kiszorító elem egyenes vonalú lengő mozgást végző membrán.



3.13. ábra: Membrán szivattyú

Kis mennyiségek szállítására alkalmazzák, alacsony nyomáson és hőmérsékleten (az alkalmazás korlátja a membrán nyomás és hőmérséklet tűrő képessége). Maró hatású anyagoknak a legtöbb esetben kiválóan ellenáll, adagolásra és áttárolásra terjedt el a használata, de alkalmazzák mobil szivattyúként olyan helyeken, ahol a meghajtáshoz megfelelő energia könnyen elérhető. Van elektromos és sűrített levegős kivitelű is.

Előnyei:

- Csepegésmentes kivitel
- Könnyen korrózióállóvá tehető
- Egyenletesebb szállítás, mint a dugattyús szivattyúknál
- Jó szívóképeség
- Akár levegő/nitrogén meghajtású kivitel is elérhető, mely bármely robbanásveszélyes zónába behelyezhető

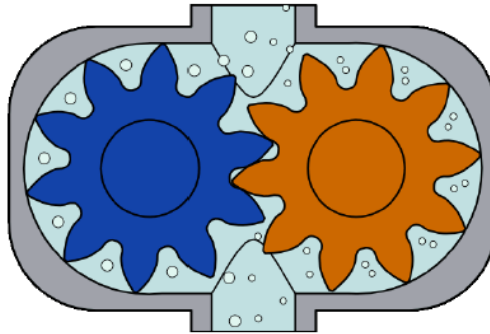
Hátrányai:

- Kis mennyiségek szállítására alkalmas
- A szelep konstrukción sok múlik

Alkalmazási terület:

- Agresszív közegeknél
- Kis mennyiségek, kis nyomás esetén

Fogaskerék szivattyú (3.14. ábra): a kiszorító elem koncentrikusan forgó fogaskerék.



3.14. ábra: Fogaskerék szivattyú elvi vázlata

Nagy viszkozitású anyagok szállítására célszerű alkalmazni, közepes nyomáson. Koptató anyagokra nagyon érzékeny, hatásukra gyorsan csökken a szállítóteljesítmény.

Előnyei:

- Egyenletes szállítás
- Egyszerű kivitel, könnyű szerelhetőség
- Könnyen kialakítható a fűthető kivitel
- Jó szívóképesség

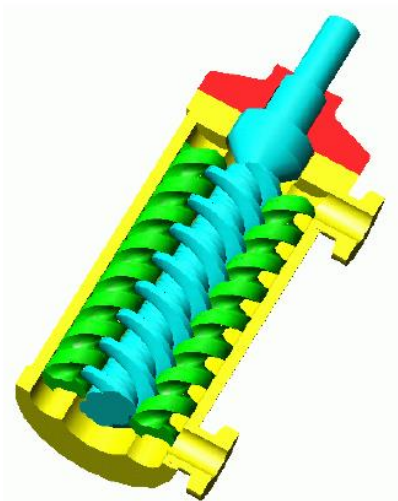
Hátrányai:

- A szállított közegnek kenőképesnek kell lennie
- Kis folyadék szállításokra alkalmas
- Alacsony hatásfok
- A nagy fordulátú, nagyobb méretű kivitelek zajosak

Alkalmazási terület:

- Régebben fűtőolaj szivattyúként használták

Csavarshivattyú (3.15. ábra): A kiszorító elem excentrikusan (egyorsós) vagy koncentrikusan (többorsós) forgó csavarorsó.



3.15. ábra: Csavarszivattyú elvi vázlata

Nagy viszkozitású anyagoknál és nagy nyomásoknál használják ezt a típust. A többorsós csavarszivattyú lehet 2 vagy 3 csavaros. A csavarokat általában fogaskerekek tartják egymással szinkronban. Hosszú ideig képesek stabilan üzemelni, de meghibásodásuk esetén javításuk igen költséges a különleges alkatrészek miatt. Szennyeződésekre igen érzékeny. Folyadékszállítása egyenletes. Üzemeltetése gondos előkészítést igényel.

Előnyei:

- Egyenletes szállítás
- Kialakítható abrazív közegek szállítására is (gumiházaz egyorsós kivitel)
- Könnyen kialakítható a fűthető kivitel

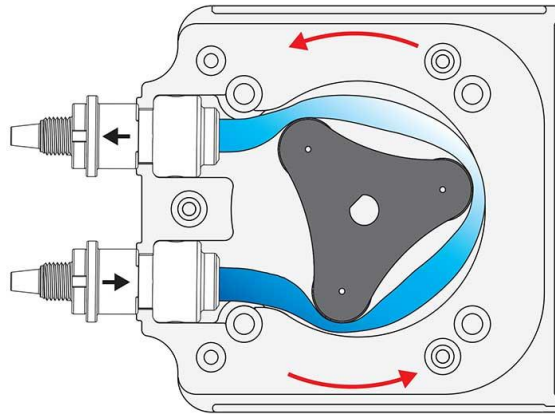
Hátrányai:

- A szállított közegnek kenőképesnek kell lennie
- Drága tartalék alkatrészek
- Érzékeny a szerelési pontosságra

Alkalmazási terület:

- Viszkózus folyadékok szállítására

Tömlő szivattyú (perisztaltikus szivattyú) (3.16. ábra): a kiszorító elem koncentrikusan forgó görgő.



3.16. ábra: Perisztaltikus szivattyú elvi vázlata

Előnyei:

- Egyszerű felépítés
- Könnyű karbantarthatóság
- Széles szállítási sebesség tartomány
- Jó szívóképesség

Hátrányai:

- Alacsony és közepes szállítási mennyiség
- A tömlő minőségén sok múlik (közegfüggően)

Alkalmazási terület:

- Főleg kopató erősen korrodáló nagy sűrűségű, viszkózus és nyírásra érzékeny folyadékokhoz

3.2. Gázszállító berendezések

Gázokat, légnemű közegeket ventilátorral, fúvóval vagy kompresszorokkal szállítanak a kisebb nyomású térből a nagyobb nyomású térbe, a gép hajtásához szükséges mechanikai munka segítségével. A befektetett munka révén a belépő gáz (szívóoldali) (P1) nyomásához képest a kilépő gáz (nyomóoldali) (P2) nyomása növekszik, ezt hívjuk kompresszióknak. A két nyomás hányadosát nyomásviszonynak nevezzük.

$$\varepsilon = \frac{p_2}{p_1}$$

A gázt szállító berendezések a nyomásviszony alapján csoportosíthatók a következőképpen:

- Ha $p_2 / p_1 = 1-1,1$ akkor ventilátorról,
- Ha $p_2 / p_1 = 1,1-3$ akkor fúvóról,
- Ha $p_2 / p_1 \geq 3$, akkor kompresszorról beszélünk.

3.2.1. VENTILÁTOROK

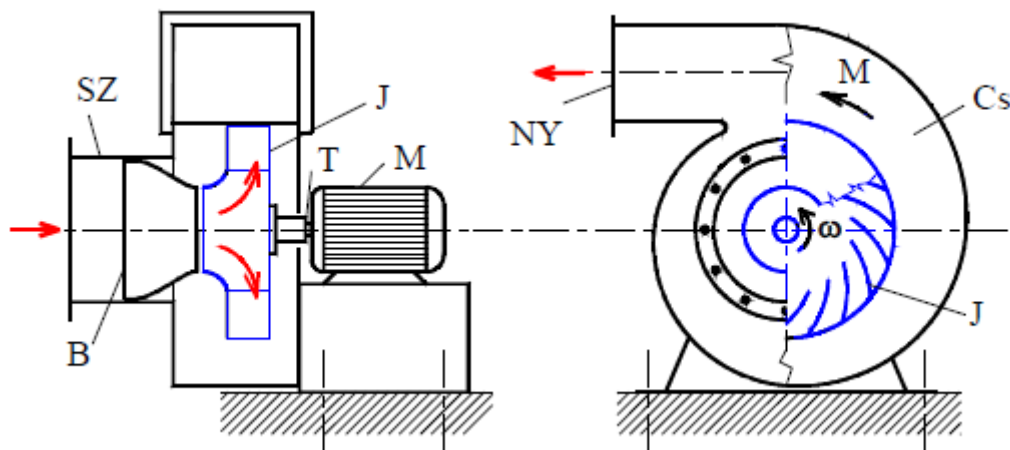
Áramlási és szerkezeti szempontból a ventilátorokat jellemzően a rajtuk átáramló közeg iránya szerint csoportosítjuk, melyek szerint lehetnek:

- Radiális átömlésűek
- Fél axiális átömlésűek

- Axiális átömlésűek
- Keresztirányú átömlésűek

Radiális ventilátorok

Ezek a ventilátorok a szállított közeget a tengelyükkel párhuzamosan szívják be és arra merőlegesen, radiális irányba továbbítják (3.17. ábra).



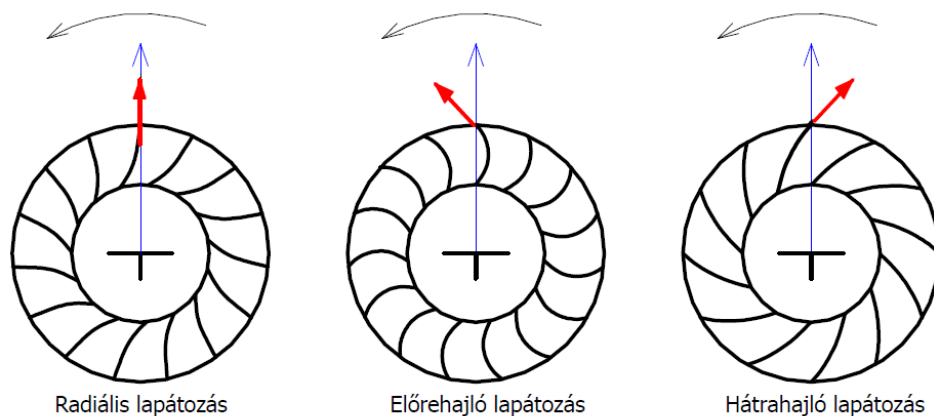
3.17. ábra: Radiális ventilátor

Radiális ventilátorok esetén a járókerék lapatozása szerint három altípusról lehet beszélni (3.18. ábra):

Hátrahajló lapatozású, amelynél a forgásirányhoz képest hátrafelé hajlanak a lapátok végei, azaz kilépő élei. Ezek a ventilátorok általában jó hatásfokúak és relatíve nagy nyomást és kisebb térfogatáramot képesek szállítani.

A **radiális lapatozású** járókerék lapátjainak kilépő éle pontosan sugárirányú. Általában olyan helyen alkalmazzák, ahol koptató hatású anyagot szállít a levegővel együtt a járókerék, pl. szénport, szemcsés anyagot stb.

Az **előrehajló lapatozású** radiális ventilátor a másik alcsoport, amelynél a lapátok kilépő éle a forgás irányába mutat. Ezek a ventilátorok a radiális ventilátorok között relatíve nagy nyomás és nagy szállított mennyiség előállítására képesek. A hatásfokuk azonban közepes.

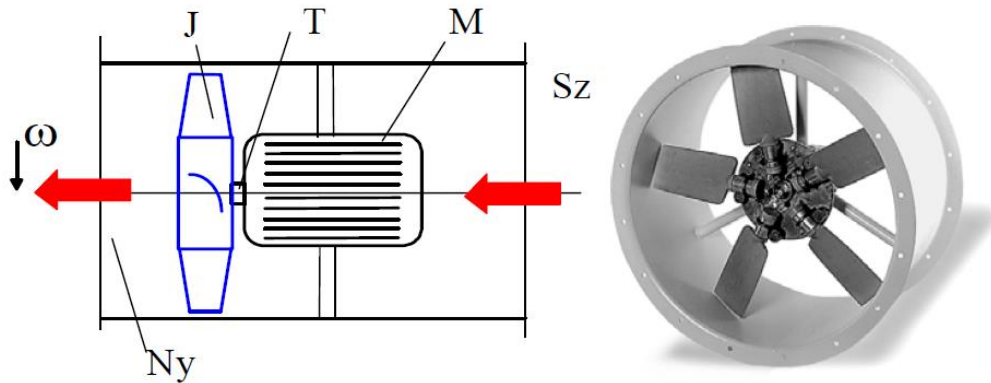


3.18. ábra: A különböző lapatozások típusai

Az azonos geometriai méretű hátrahajló lapátozású és előrehajló lapátozású ventilátor közül az előrehajló nagyobb mennyiség szállítására képes, kb. azonos nyomásnövekedés mellett.

Axiális ventilátorok

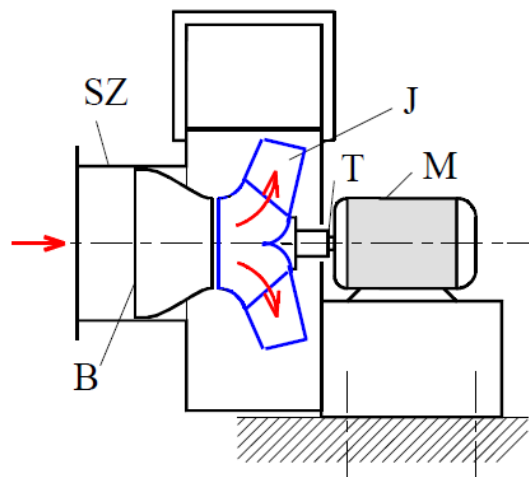
Axiális ventilátorok a levegőt tengely irányban szívják be, és tengely irányba továbbítják. Ezt a típust jellemzően nagy térfogatáramhoz és kis üzemi nyomáshoz használják. A 3.19. ábra egy axiális ventilátor vázlatát mutatja.



3.19. ábra: Axiális ventilátor

Félexiális ventilátor:

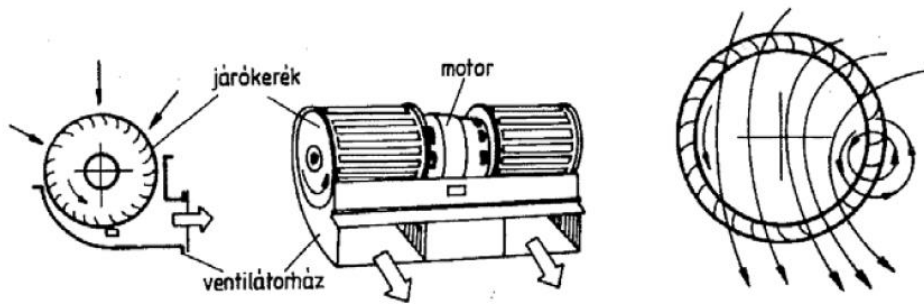
Félexiális ventilátornak nevezik azt a típust, amelynél a tengely irányából érkező szállított közeg félig axiális, félig sugár irányban távozik (3.20. ábra).



3.20. ábra: Fél axiális ventilátor

Keresztáramú ventilátor:

Az áramló közeg radiálisan lép be és radiálisan távozik. A közeg már nem tengelyirányból érkezik, hanem ténylegesen keresztáramlik a berendezésen, miközben az energiája megnő és tovább halad a nyomó oldalra. Szerkezeti kialakításának elvi vázlatát a 3.21 ábra szemlélteti.



3.21. ábra: Keresztáramú ventilátor

Ventilátorok kiválasztása:

A ventilátorok kiválasztásánál nagyon fontos szempont, hogy mekkora térfogatáramot illetve mekkora nyomást szeretnénk elérni egy adott, szállítandó közeg esetén. Amennyiben a technológia úgy kívánja, hogy nagyobb nyomást és kisebb térfogatáramot kell biztosítani, akkor radiális típust választunk. Abban az esetben viszont, ha nagyobb mennyiséget és kisebb nyomást kell előállítani, akkor axiális ventilátort választunk. A radiális ventilátorok esetében az előrehajló lapátosú kisebb méretben, de rosszabb hatásfokkal képes előállítani ugyanakkora nyomást, mint a hátrahajló lapátosú. A nem megfelelő forgásirány esetében az axiális ventilátoroknál a légszállítás nagysága csökken, sőt még az iránya is fordított lesz, így könnyű felismerni a hibát. A radiális ventilátorok helytelen forgásirány esetén is ugyanabba az irányba szállítják a levegőt, mint rendszeren, a mennyiség azonban csupán töredéke, kb. 1/3-1/4-e lesz a normál mennyiségnek. A hibás forgásirány felismerése után, a forgásirány megváltoztatását a villamos szakemberek a pólusok felcserélésével végzik.

Ventilátorok kiválasztásánál fontos szempont a térfogatáram, a nyomásnövekedés, a hőmérséklet, a közeg sűrűsége és a megengedett zajszint is, de ezek nem az egyedüli szempontok. Fontos figyelembe venni még az alábbi körülményeket is:

- Jó hatásfokú és lapos jelleggörbével rendelkező berendezés hosszú távon kifizetődőbb.
- Az adott üzemi jellemzőkhöz való ventilátort kell kiválasztani. Akkor, ha kis térfogatáram változással lehet számolni, akkor meredek jelleggörbével rendelkező hátrahajló lapátosú, vagy sorba kapcsolt ventilátort alkalmaznak. Abban az esetben viszont, ha kis nyomásesés mellett nagy térfogatáram változással kell megbirkózni, akkor előrehajló lapátosú, vagy párhuzamosan kapcsolt ventilátorokat alkalmaznak.
- Amennyiben a nyomásnövekedéshez viszonylag nagy térfogatáram párosul, az axiális ventilátor lehet a megoldás.
- Minden esetben figyelembe kell venni a szállítandó közeg sajátosságait. (hőmérséklet, sűrűség, szilárdanyag tartalom - koptató és tapadó anyagok, robbanásra hajlamos anyagok tulajdonságai)

- Nem utolsó sorban, meg kell vizsgálni a ventilátor beszerzési, üzemeltetési és karbantartási költségeit is.

Ventilátorok szabályzása:

- Fojtásos szabályzás: A legegyszerűbb, azonban a legkevésbé gazdaságos szabályzási forma. Ebben az esetben a nyomóvezetékbe épített szabályozószerkezettel változtatjuk a szállított mennyiséget
- Fordulatszám-szabályzás: A fordulatszám megváltoztatásával a ventilátor jelleggörbéje változik meg. Az ideális mennyiség-szabályzás ezzel a rendszerrel érhető el. Viszonylag kicsi veszteségekkel történik az üzemeltetés, a fordulatszám megváltoztatásával ugyan csökken a hatásfok, azonban annak mértéke jóval kisebb a fojtásos szabályzáshoz viszonyítva.
- Perdületszabályzás: Egy adott járókerékhez egy olyan mennyiségérték adódik, aminél a szállított közeg belépése iránytörés nélkül, tehát a legkisebb veszteséggel valósul meg. (Ez általában a ventilátor legjobb hatásfokú pontja.) Amikor a járókerék előtt megváltoztatjuk a levegőáramlási irányát, perdületet, akkor megváltoznak a veszteségek is, amivel szabályozni lehet a szállított mennyiséget. Ennél az alkalmazásnál a ventilátor elé egy állítható lapátsor van elhelyezve, melyek mozgatásával történik a szabályzás.
- Lapátszög állítás: Axialis ventilátorok nagyon jól szabályozhatóak a járókerék lapátjainak forgatásával. Az állítások mértéke általában maximum $\pm 10^\circ$. A változó lapátszögekhez tartozó jelleggörbék, közel párhuzamosan tolnak egymás mellett.

3.2.2. FÚVÓK

Fúvók fajtái, kialakításuk

A fúvók lehetnek radiális (centrifugális) és térfogat kiszorítás elven működők. Ezeket, a gépeket olyan területen használják, ahol nagyobb gázszállításra és 1,1-3 közötti nyomásviszonyra van szükség.

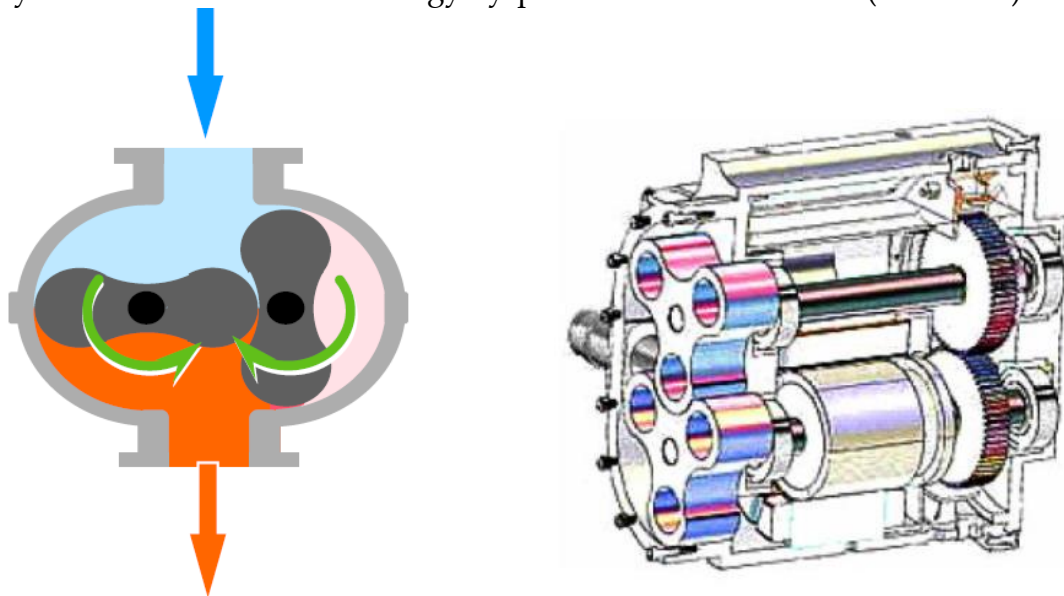
Radiális fúvók

A radiális elven működő fúvók kialakítása megegyezik a ventilátorok kialakításával, de a nagyobb nyomás biztosítása érdekében vagy a fordulatszámuk lényegesen magasabb a ventilátorok fordulatszámához képest, vagy több járókerék kerül beépítésre egymásután. A magasabb fordulatszámot frekvenciaváltó, vagy gyorsító hajtómű alkalmazásával biztosítják. Ha a fordulatszám növelése nem lehetséges, akkor több fokozatú (több járókerék egymásután építve) fúvót is használhatunk, melyben a gáz nyomását, az egymást követő járókerekek és a közöttük elhelyezett állólapátok biztosítják. A nagy fordulatu gépekre jellemző a kilépő gáz lengéseiből eredő magas zajszint, melyet a gép köré épített zajsökkentő fülkével csökkenthető.

Térfogat kiszorítás elvén működő fúvók

Roots fúvók

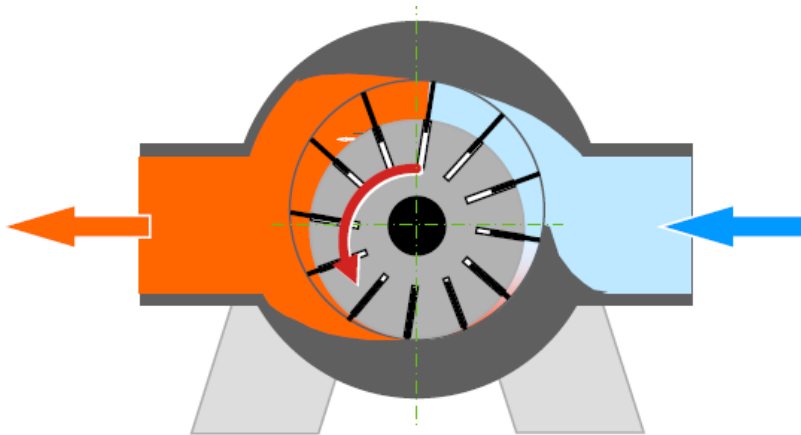
Működésükre jellemző, hogy általában két darab azonos fordulatszámú piskóta vagy más profilú egymáson legördíthető forgódugattyú biztosítja a gáz szállítását. Az állóház és a forgórészek közé beszívott gáz térfogatát a forgórészek kompresszió nélkül szállítják a szívócsonktól a nyomócsonk felé. A nyomóvezetékbe lévő nagyobb nyomás miatt visszaáramlás indul meg a géptestbe. Ez a visszaáramló gáz sűríti a szállított gázt a nyomóvezetékbe uralkodó nyomásra. Előnyük az egyszerű szerkezet, kis helyigény, olajmentes közeg. Mivel a forgódugattyúk egymáshoz és a házhoz is réssel illeszkedik a kopás kismértékű. Hátrányuk a magas zajszint, melyet szintén zajvédő fülkével csökkentenek. Fordulatszámuk 900 – 2800 rpm között változik. Szabályzásuk frekvenciaváltóval vagy by-pass vezetékkel történik (3.22. ábra).



3.22. ábra: Roots fúvó

Forgólapátos fúvók

Működésükre jellemző, hogy a hengeres házban excentrikusan elhelyezett forgórész radiális hornyaiba lamellákat illesztnek, melyeket vagy rugók, vagy a forgásból adódó centrifugális erő a henger falához szorít. A forgórész körbeforgatásakor a lamellákkal határolt táskák térfogata előbb nő, majd csökken, így megfelelően választott be- és kiömlőnyílások segítségével közeg szállítását végzi. Előnyük a szívó- és nyomószelep hiánya, kisebb nyomásvesztés és a nagy fordulatszám következtében a kis gépméret. Hátrányuk a nagyobb mechanikai és résvesztés a csúszó lapátok kopása, a szállított gáz nem olajmentes. Szabályzásuk a fordulatszám szabályozásával csak korlátozott tartományban lehetséges, mert a lapátok kerületi sebessége a 7 m/s alá a megfelelő működés miatt nem csökkenhet (3.23. ábra).



3.23. ábra: Forgólapátos fúvó

3.2.3. KOMPRESSZOROK

A működési elv szerint a kompresszorokat a következők szerint lehet osztályozni:

- Áramlástan (centrifugál) elven működő kompresszorok
 - Radiális kompresszor
 - Axiális kompresszor
- Térfogatkiszorításos elven működő kompresszorok
 - Alternáló mozgást végző
 - Dugattyús kompresszor
 - Membrán kompresszor
 - Forgó mozgást végző
 - Csavarkompresszor

Áramlástan (centrifugál) elven működő kompresszorok

Radiális kompresszor

A radiális kompresszorok, hasonlóan működnek a radiális ventilátorokhoz, de azoknál lényegesen nagyobb végoldali nyomást tudnak létrehozni. A nagyobb nyomást a turbókompresszorok a járókerekek számának és a fordulatszám növelésével biztosítják. A gáz a csigaház elején lévő szívócsonkon keresztül lép be tengelyirányba, a járókerékbe, melyben a terelőlapátok vezetik megfelelő irányba a gázt. A járókerékben a gázáram felgyorsul, mozgási (kinetikus) energiája megnő. A gáz sugárirányban hagyja el a járókereket, majd az állólapátokba kerül, mely egy diffúzor (bővülő keresztmetszet), ebben a gázáram lelassul, mozgási energiája részben átalakul potenciális energiává: nyomása megnő. Ez a nyomásnövekedett gáz ismét tengelyirányba lép a következő járókerékbe, melyben ismét felgyorsul, kinetikus energiája megnő, és ez ismétlődik, amíg a szükséges nyomást a kilépő gáz el nem éri. A fokozatok közötti visszaáramlást labirintstömítések alkalmazásával oldják meg. Annak érdekében, hogy az egymás után épített járókerekek, átmérője ne legyen túl nagy, de a szükséges mozgási (kinetikus) energia biztosítva legyen a kompresszor fordulatszámát egy gyorsító hajtómű alkalmazásával, megnövelik. Általában a turbókompresszorok fordulatszáma (8. 000 - 15. 000 rpm) közötti érték, de ennél

magasabb értékek is előfordulnak. A nagy áramlási sebességek, és a gyakori irányváltozások következtében működésükre az erős zaj a jellemző.

Axiális turbókompresszorok

Az axiális turbókompresszorban a gáz a lapátokon tengelyirányban halad át. Egy-egy lapátsor a nyomást kisebb mértékben növeli, mint a radiális átömlésű járókerék. Az axiális gépekre jellemző a viszonylag kisebb nyomásviszony mellett a nagy szállítóképesség.

Az axiális turbókompresszorok előnye az egyenletes nagy gázszállítási képesség, megbízható hosszú üzemelés, ezért jól illeszthetők folyamatos technológiákhoz. Hátrányuk, hogy kis szállítóképesség esetén rossz a hatásfokuk és zajosan üzemelnek.

Centrifugál kompresszorok szabályozása

A turbókompresszorok által szállított gáz mennyiségét szabályozhatjuk:

- Fordulatszám szabályzással lehet veszteségmentesen a mennyiséget szabályozni.
- Fojtásos szabályzás lényege, hogy a szívóoldali szerelvényt beszűkítjük. Ez a legkevésbé gazdaságos megoldása a szabályzásnak.
- A perdület szabályzás jól alkalmazható egy fokozatú turbókompresszoroknál, mert a szabályzás lényege, hogy a járókerék elé radiális tengely körül elfordítható lapátokat helyeznek el. A lapátok elfordításával változtatják az átömlési keresztmetszetet és ezzel a szállítandó mennyiséget.

Surge jelenség

A pumpálás (surge) jelensége akkor lép fel, amikor a nyomóoldalon valamilyen ok következtében a szállított gáz nem tud távozni. Az egyre növekvő nyomóoldali nyomás miatt, mivel a kompresszor már nem képes ekkora nyomás előállítására megindul a nagyobb nyomású gáz visszaáramlása a kompresszorba (3.24. ábra). Ez a visszaáramlás erős pulzáló hanggal kísért lengéseket és magas rezgéseket okoz a gépben és a vezetékek rendszerében. Ezek a rezgések, lengések a gép mechanikai károsodását is okozhatják. Ennek megakadályozását biztosítja az Anti-surge védelem azzal, hogy a pumpálást okozó nyomás elérése előtt a gáz egy részét automatikusan a szívóvezetékbe vezeti vissza.

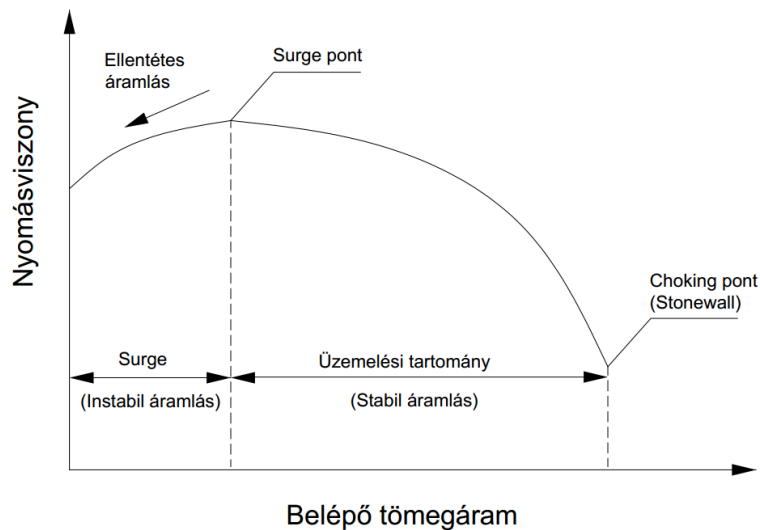
A surge jelenség radiális kompresszoroknál hirtelen, axiális kompresszoroknál fokozatosan következik be.

Choke jelenség

Choke jelenség akkor lép fel, amikor a kompresszor nyomóoldali ellenállása jelentősen lecsökken. A lecsökkent ellennyomás következtében a kompresszor nyomó oldalán a sebesség megnő. A gáz sebessége addig nő, amíg el nem éri a hangsebességet (MACH1). Ezt az értéket nevezzük Choke pontnak vagy „Stonewall”-nak. Choke pont tehát az a maximális mennyiség, amelyen a kompresszor még tud üzemelni adott nyomáson.

Choke üzemállapotban történő tartós üzemeltetés a kompresszor rotorjának, lapátozásának károsodásához vezethet.

Choke jelenség elkerülése érdekében bizonyos szintű áramlási ellenállás fenntartása szükséges a kompresszor kilépő oldalán. Áramlási ellenállás fenntartása céljából anti choke szelepet alkalmaznak. Amikor az áramlási ellenállás lecsökken, a térfogatáram megnő, az anti choke szelep zárni kezd.

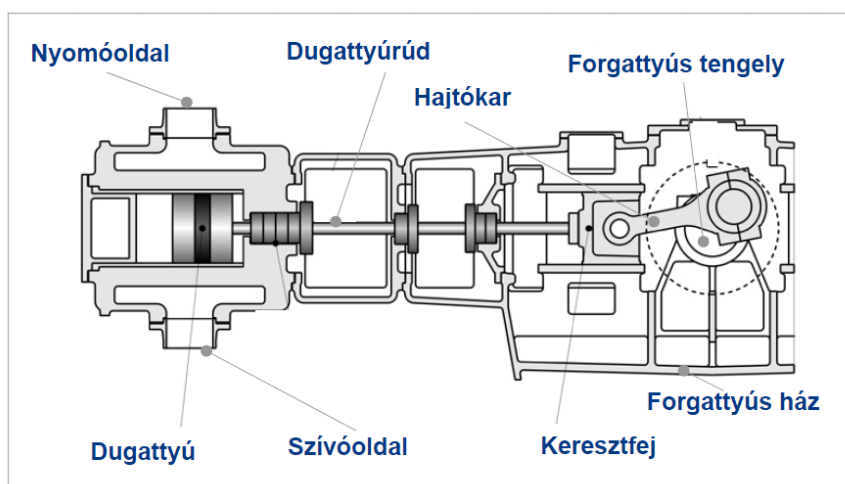


3.24. ábra: Centrifugál kompresszor jelleggörbe

Térfogatkiszorításos elven működő kompresszorok

Dugattyús kompresszorok

A dugattyús kompresszorok (3.25. ábra) térfogat kiszorítás elvén működő gépek. Főbb részei, a közlőmű (forgattyúház), a keresztfej a tartóval és a henger (vagy hengerek) attól függően, hány hengeres a kompresszor. A közlőműben található a forgattyús tengely. A forgattyús tengely forgó mozgását a hajtókar segítségével a keresztfej alakítja át egyenes vonalú alternáló mozgássá. A keresztfejhez van rögzítve a dugattyúrúd, melynek a másik végén a dugattyú található. A dugattyú a hengerben alternáló mozgást végez a henger két holtpontja között, mozgása közben beszívja a gázt, majd magasabb nyomáson kitolja.



3.25. ábra: Dugattyús kompresszor felépítése

Dugattyús kompresszorok csoportosítása:

A kompresszorok lehetnek működési szám szerint:

- Egyszeres működésűek
- Kétszeres működésűek

Egyszeres működéskor a szívás és a sűrítés (komprimálás) csak a dugattyú feletti térben történik.

Kétszeres működéskor a dugattyú alatti tér is úgy működik, mint a felette lévő tér, csak azzal ellentétesen. Amikor a dugattyú feletti térben szívási ütem van, akkor az alatta lévő térben a gáz sűrítése (komprimálása) történik, és fordítva. Így adott henger térfogat esetén a szállított mennyiség kétszeres, egyenletesebb gazdaságosabb a gáz szállítása.

A sűrítés (kompresszió) mértéke szerint:

- Egy fokozatú kompresszorok
- Több fokozatú kompresszorok

A gázok hőmérséklete sűrítéskor növekszik, mert a gázmolekulák az egyre kisebb térfogatú térben egyre gyakrabban ütköznek egymáshoz a henger, dugattyú falához és az ütközéskor fellépő súrlódás hővé alakul. Minél nagyobb a gáz végnyomása a szívóoldali nyomáshoz képest a gáz hőmérséklete annál nagyobb. Ez a hőmérsékletnövekedés nagymértékben befolyásolja a gázok gazdaságos szállíthatóságát. Ezért, ha a nyomásviszony kisebb, mint három egy fokozatú kompresszort alkalmazunk, ha nagyobb, mint három, akkor több fokozatú kompresszort alkalmazunk.

Kialakítás szerint:

- Egy hengeres
- Több hengeres

Egy hengert alkalmazunk, ha kicsi nyomást és szállítómennyiséget kell biztosítani. Több hengert alkalmazunk, ha egy fokozatban nagy mennyiséget, vagy több

fokozatban nagy nyomást kell biztosítani. A hengerek számát befolyásolja a gazdaságosan legyártható mérete is.

Elrendezés szerint:

- Álló hengeres
- Fekvő hengeres
- V elrendezésű
- Boxer elrendezésű

A hengerek, elrendezése függ a hengerek számától, méretétől. Általában a nagyméretű hengerek fekvő elrendezésűek.

Hűtés szerint:

- Léghűtéses
- Vízhűtéses

A kis teljesítményű, alacsony szállító teljesítményű és nyomású kompresszoroknál alkalmaznak léghűtést a sűrítésből keletkező hő elvonására. Közepes és nagy teljesítményű kompresszorok hengereinek hűtése a nagyobb hő elvonása érdekében víz cirkulációval történik. A gázok alapvető tulajdonsága, hogy nyomás (sűrítés) hatására melegednek. Ezért a kompresszorokat úgy tervezik, hogy a nyomásviszonyuk egy lépcsőben ne haladja meg a hármát (a nyomó nyomás maximum háromszorosa lehet a szívó nyomásnak), mert a melegedés következtében a gáz szállítása gazdaságtalanná válik. A dugattyús kompresszorok több fokozatban igen nagy nyomás előállítására képesek (200 - 300 barg). A többfokozatú kompresszorok hengerei a nyomás növekedésével egyre kisebb átmérőjűek. A dugattyús kompresszorok általában hatékonyabbak más kompresszoroknál, de méreteik nagyobbak.

Szabályzás

A dugattyús kompresszorok szabályzása:

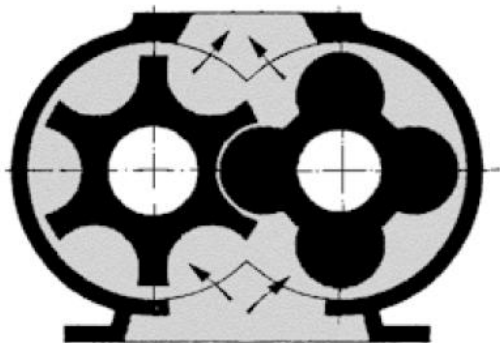
- Legegyszerűbb szabályzás a villanymotor fordulatszámának frekvenciaváltóval történő szabályzása. Nem elterjedt megoldás a frekvenciaváltó nagy költsége miatt.
- Káros térrel történő szabályzáskor a hengerhez plusz térfogatú teret kapcsolnak, melybe a sűrítés után is benne marad a gáz. Szívási ütem kezdetekor először ebből a térből történik a gáz kiáramlása, és csak akkor nyit a szívószelep, amikor a hengerben a nyomás a szívási nyomás alá esik. Ez a megoldás gazdaságtalan, mert felesleges energiát pazarol a káros térbe sűrített gázba.
- Szívó – nyomóvezeték átkötése (bypass) esetén a vezetékben lévő szerelvény megnyitásának mértékével lehet a szállított közeg mennyiségét szabályozni. Ez a szabályzási mód nem gazdaságos, mert a felesleges gázt sűrítés után engedjük a szívóvezetékbe (energia veszteség), illetve a visszakerült gáz hőfoka a kompresszió miatt magasabb rontva a gép hatásfokát.

- Szívószelep kitámasztásos kompresszorok esetében a szállított gáz mennyiségét a kitámasztott szívószelepek számával (0 - 25 – 50 – 75 – 100) lehet szabályozni. Ennek a megoldásnak hátránya, hogy huzamosabb ideig történő kitámasztás esetén a szívóvezetékbe visszaáramló gáz hőmérsékletének emelkedése miatt a henger működő oldalán túlságosan megnő a hőmérséklet, romlik a gép hatásfoka. Ennek elkerülése érdekében a kitámasztott szelepeket bizonyos idő eltelte után váltani kell.
- A kompresszorok szabályzásában új eljárás a HidroCom néven szabadalmaztatott megoldás. Ezzel a megoldással a szállított gáz fokozatmentes szabályzását lehet biztosítani a technológiai igényeknek megfelelően. A megoldás lényege, hogy a szívószelep addig kitámasztva marad, amíg a hengerben lévő gáz mennyisége el nem éri a szállítandó gáz mennyiségét. A felesleges gáz mennyiség a szívószelepen sűrítés nélkül visszaáramlik, megtakarítva a sűrítéshez szükséges energiát.

Csavarkompresszor

A csavarkompresszorok térfogat kiszorítás elvén működő gépek, ahol a gáz szállítását két együttfutó csavarfelületű forgódugattyú biztosítja. A fő forgórész domború csavarfelületű, a mellék forgórész homorú csavarfelületű. A szívóoldalról bekerülő gázt a forgó csavarfelületek egymásba illeszkedve maguk előtt tolják a nyomóoldal felé.

A forgórészek gördülő felületei, és a ház között keskeny rés van, ezért a kompresszor szárazon is dolgozhat. A nyomásviszony függvényében a szállított gáz hőmérséklete növekszik, csökkentve a szállítás gazdaságosságát. A kompressziós térbe folyamatosan olajat fecskendezve a hőmérséklet jelentősen csökkenthető, és ezzel jelentősen növelhető a nyomásviszony és a gazdaságosság. A befecskendezett olajat folyadékleválasztó betétek segítségével a szállított gázból leválasztják, lehűtik, és szűrőkön keresztül ismét visszanyomják a kompresszorba (3.26. ábra).



3.26. ábra: Csavarkompresszor

4. HŐCSERÉLŐK

4.1. Bevezetés

A vegyipari és élelmiszeripari folyamatok számos területén előfordulnak hőközléssel kapcsolatos műveletek. E műveletek kapcsán közegek hűtése, fűtése jöhet létre a másik közeg hőmérsékletének megváltozása vagy fázisváltozása következtében. A hőközlés sok esetben nem tisztán termikus folyamatoknál is fellelhető, pl. szárításnál, bepárlásnál, ahol a hőátadással egyidejűleg anyagátvitel is megvalósul. A különböző energiatartalmú közegek hőcseréjét arra alkalmas készülékben, un. hőcserélőben valósítják meg.

Egymástól eltérő hőmérsékletű közegek illetve egy közeg különböző hőmérsékletű részei között – ha a rendszert külső hatások nem érik – hőmérséklet kiegyenlítődés jön létre. A hő terjedésének, a hőenergia egy adott helyről valamely más helyre történő eljutásának három alapvető módját különböztetjük meg:

- hővezetés,
- konvekció,
- hősugárzás.

A **hővezetés** általában a szilárd testeket jellemzi, melyek molekulái makroszkopikus nyugalomban vannak. De előfordul laminárisan áramló folyadékokban, ahol az áramló közeg részecskéi a hőáramlás irányában nem mozdulnak el. A hő a molekulák ütközése révén molekuláról molekulára terjed.

Konvekció vagy hőáramlás, hőszállítás folyadékokban és gázokban léphet fel. A hő terjedésének ez a módja a közegen belüli áramlással van kapcsolatban. A hőhordozó közeg molekulái az áramlás irányában makroszkopikus méretekben is megváltoztatják a helyüket.

A hő terjedésének harmadik módja a **hősugárzás**. A sugárzó közeg hőenergiájának egy részét sugárzási energia formájában bocsátja ki, mely sugárzás valamely más testre érve ott részben vagy egészében hővé alakul.

Hőátadásnak nevezzük a hő terjedésének azt az esetét, amikor áramló gáz vagy folyadék és az azt határoló felület között jön létre hőáram. A hőátadást az jellemzi, hogy a hő két különböző halmazállapotú közeg határfelületén halad át, tehát a hő terjedési módok (vezetés, konvekció, sugárzás) kombinációjából álló folyamat.

Felületi hőcserélőknél a hőt leadó és a hőt felvevő közegeket fal választja el egymástól. A falon keresztül a hő vezetéssel terjed, a közegeknél hőátadás játszódik le. Ezt az összetett folyamatot a hőátbocsátási tényezővel jellemezhetjük, amely a két közeg oldali hőátadási tényezőtől és a fal hővezetésétől függ.

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{s_{fal}}{\lambda_{fal}} + \frac{1}{\alpha_2}$$

A hőcserélő teljes felületén az átszármaztatott hőáram a hőátbocsátási tényező, a hőcserélő felülete és a hőmérsékletkülönbség hajtóerő segítségével határozható meg:

$$\dot{Q} = kA\Delta T_{köz}$$

4.2. Hőhordozók

A rendszerbe bevitt, illetve az onnan elvont hő sokszor jelentős energiamennyiséget képvisel, amelynek bevitele, illetve elvonása csak gondosan megválasztott készülék-konstrukcióval, és amennyiben szükséges, ún. közvetítőközeggel lehetséges. Hőhordozókra azért van szükség, mert a hőenergiának az elvonása vagy rendszerbe történő bevitele csak így oldható meg. Ennek több oka is lehet: technológiai, kémiai, gazdaságossági stb. A hőközvetítő közegekkel szemben támasztott követelmények az alábbiak szerint foglalhatók össze: kis gőznyomás, jó hőátadási együttható (kis viszkozitás, jó hővezetőképesség, nagy fajlagos hőkapacitás), kedvező alsó és felső hőmérséklet határ, azaz széles használhatósági hőmérséklet-tartomány, szivattyúzhatóság, csekély korróziós veszély, hőmérséklet-stabilitás, nagy lobbanás- és gyulladáspont, tárolhatóság, regenerálhatóság.

Az iparban legjobban elterjedt hőhordozó közegnek, a vízgőznek számos előnye van más hőhordozókkal szemben. Ezek részben a víz fizikai és kémiai tulajdonságaiból, részben pedig a természetben való előfordulási gyakoriságából eredeztethetőek. A víznek és a vízgőznek, mint hőhordozó közegnek az egyik legfőbb előnye, hogy igen nagy a fajhője és a kondenzációs hője, ezért nagy mennyiségű energia tárolására, közvetítésére és szállítására alkalmas. A kondenzálódó gőznek kedvezően nagy a hőátadási tényezője, a fűtőfelület mentén közel egyenletes a kívánt hőmérséklete, a nagy párolgás-, ill. kondenzációs hője miatt ($r=2260$ kJ/kg 1 bar gőznyomáson), belőle viszonylag kis mennyiségű kondenzátum keletkezik, a korróziós károsodási veszély igen csekély és végül, de nem utolsó sorban igen olcsó. Magasabb hőmérsékleteken viszont már nem előnyös a gőz használata, mert akkor a nagyobb nyomás miatt szilárdságilag kedvezőbb tulajdonságokkal rendelkező csövet kell alkalmazni.

4.3. Hőcserélők

4.3.1. HŐCSERÉLŐK ÁLTALÁNOS CSOPORTOSÍTÁSA

A hőközléssel kapcsolatos feladatok időben állandósult (stacioner) és nem állandósult (instacioner) körülmények között mennek végbe. A hő átszármaztatása rendszerint egyik közegből a másikba történik. Ha a közegeket fal választja el egymástól, akkor a készüléket felületi (indirekt) hőcserélőnek nevezzük. Ha a közegek keveredhetnek egymással, akkor keverő (direkt) hőcserélőről beszélünk.

Működésüket tekintve általában a hőcserélők két fő típusát különböztethetjük meg:

- rekuperatív hőcserélők: a különböző hőmérsékletű közegek egyidejűleg vannak jelen. Jellemzősége a két közeget elválasztó fal, melynek kettős feladata van; egyrészt az áramló közegek megfelelő elválasztása egymástól és a környezettől, másrészt az energia egyik közegből a másikba való terjedéséhez megfelelő körülmények (pl. elegendő hőátadó felület) megteremtése.
- regeneratív hőcserélők: a különböző hőmérsékletű közegek időben váltakozva érintkeznek a hőátadó felülettel. A közegek (anyagáramok) felmelegítését és lehűtését váltott ciklusokban valósítják meg. Un. regenerátort tartalmaznak, amely anyaga általában porózus szerkezetű és igen nagy mennyiségű

hőtárolására alkalmas. A porozitásnak a nagy hőátadó felület megvalósítása szempontjából van jelentősége. A töltet hődiffuzivitása az instacioner hővezetés következtében jelentős.

Mind a rekuperatív, mind a regeneratív készülékekben a hőcserélőközegek áramlása történhet:

- Egyenáramban: amikor mind a két közeg megegyező irányban halad keresztül a készülékeken. Ebben az esetben a két közeg kezdeti (belépő) hőmérsékletét megváltoztatva, megközelítőleg egy kiegyenlítődesi hőmérsékletet ér el, miközben az átszármaztatási hőmérséklet-különbség a hőcserélő felülete mentén változik.
- Ellenáramban: a közegek a hőcserélőben egymással ellentétes irányban haladnak. Az ellenáramú hőcserével könnyen elérhető, hogy a hideg közeg kilépő hőmérséklete nagyobb legyen, mint a meleg közeg kilépő hőmérséklete. Ez az egyik magyarázata annak, hogy miért gazdaságosabb az ellenáramú hőcserélő.
- Keresztáramban: a két közeg áramlási iránya egymásra merőleges. Általánosságban megállapítható, hogy a tiszta keresztáramban működő hőcserélő ugyanolyan feltételek mellett az egyenáramú és az ellenáramú között van.

A gyakorlatban kivitelezett hőcserélők között az ilyen tisztán meghatározható áramlási irány ritka, legtöbbször vegyes áramú hőcserélőket alkalmaznak. Az F-faktor a hőcserélő hőmérséklet-profiljai alapján ad viszonyszámot arra, hogy az áramlások mennyire közelítik az ellenáramot. Hőátadás szempontjából a tisztán ellenáramú hőcserélő a legjobb. Ez jelenti az $F = 1$ -et. Egyszerűen megfogalmazva a hőcserélő konstrukció „jósági fokát” határozza meg. Ha az $F < 0,8$, akkor a konstrukció nem megfelelő. Ennek ellenőrzése minden kevertáramú hőcserélőnél elengedhetetlen.

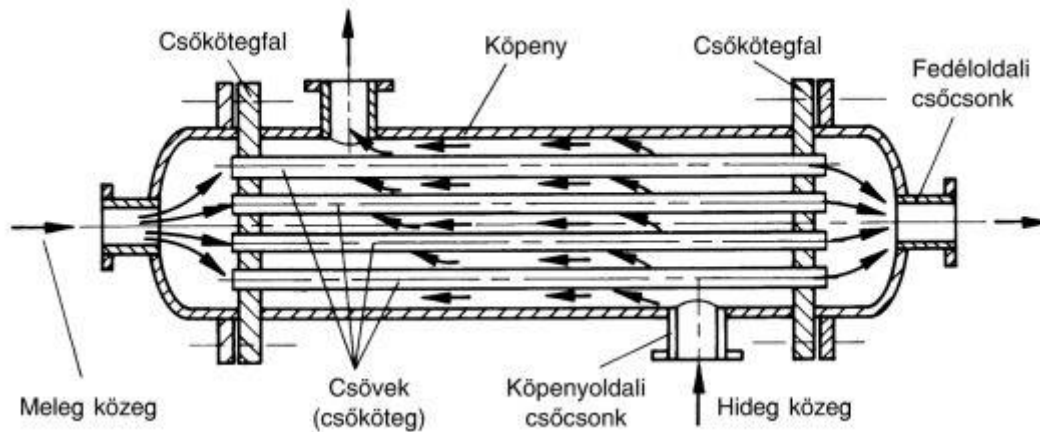
4.3.2. CSŐKÖTEGES HŐCSERÉLŐK

A rekuperatív hőcserélőkön belül a csöves hőcserélők azok, melyek a legnagyobb mértékben elterjedtek és melyeket a vegyiparban leginkább alkalmaznak. Elterjedésükhöz nagyban hozzájárult az, hogy a folyamatos technológiákba leginkább ez a típus integrálható. A csöves hőcserélőkben egyik közeg a párhuzamosan kapcsolt csövekben, a másik pedig a csövek között a készülék határolta köpenytérben áramlik. A készülék köpeny általában egy nagy átmérőjű csőhéj.

Merev csőköteges hőcserélők

A hőcserélők kialakítási módja és építési rendszere a hőleadó és hőfelvevő közegek közötti hőmérséklet-különbségtől is függ. A merev csőköteges hőcserélőknél (4.1. ábra) a két csőköteggel a köpenyhez mereven kapcsolódik. Emiatt nem képesek nagyobb hőtágulási különbséget elviselni, mert ha a két térben az áramló közegek hőmérsékletkülönbsége nagy, a köpeny és a csőköteg hőtágulás-különbségéből keletkező hőfeszültség hatására a csövek a csőköteggelből kilazulnak. Ugyanez a káros

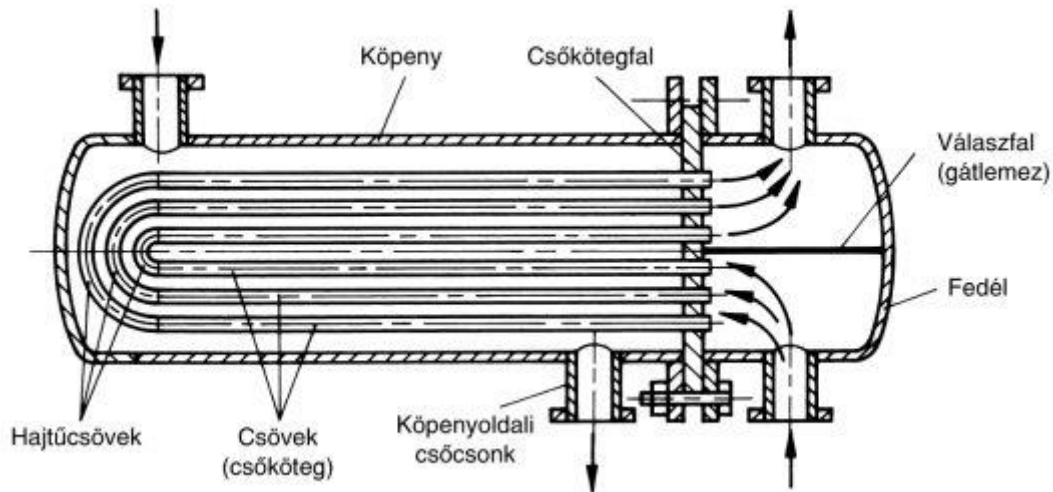
jelenség lép fel, ha a csőkötegfal és a csövek eltérő anyagminősége miatt nagy a hőtágulási együtthatók különbsége. A nemkívánatos hőfeszültségek kialakulásának elkerülésére olyan kialakítást kell alkalmazni, amely a hőtágulási különbségek áthidalására alkalmas.



4.1. ábra: Merev csőköteges hőcserélő

U-csöves hőcserélők

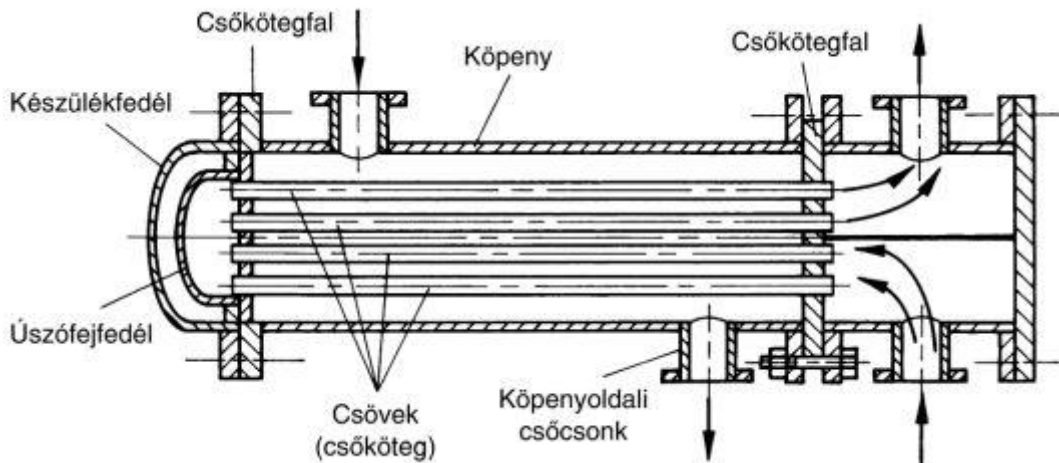
A köpenytér és csőtér közötti nagy hőmérsékletkülönbségnél, általában 10 bar feletti nyomásnál használják az U-csöves (hajtúcsöves) szerkezeti kialakításokat (4.2. ábra). Káros hőfeszültségek nem keletkezhetnek, mert az U alakban hajlított csövek hőtágulás esetén a köpenytérben szabadon mozoghatnak. Abban az esetben, ha az U-íveket az általános gyakorlatnak megfelelően úgy készítik, hogy az ív külső sugaránál a csőfal elvékonyodik. Az U-ívek hidegalakításakor elridegedés és feszültségkorrózióra való hajlam jöhet létre, amely hőkezeléssel megszüntethető. Általában stabilizálatlan ausztenites acélból készített U-ívek hőkezelése nem ajánlatos. A csövek mindkét vége egyazon csőkötegfalba van erősítve, így a hőcserélő könnyen szerelhető. A csőköteg tisztítása - különösen belül - a 180°-os kanyarok miatt nehézkes, ezért csak tiszta közegekre lehet használni. A hajtúcsöves hőcserélők általában a csőtérben kétjáratúak, a köpenytérük egyjáratú. Középen hosszterelő alkalmazásával megvalósítható az ellenáramú hőcsere. Gyakran alkalmazzuk nyomástartó edénybe építve vagy gőzfűtésű forralóként. Tüzelőolaj- és egyéb nagyobb viszkozitású folyadéktárolókhoz alkalmazható.



4.2. ábra: U csöves hőcserélő

Úszófejes hőcserélők

Az úszófejes hőcserélőknél (4.3. ábra) a fordulókamra olyan megoldású, hogy a csövek hőtágulása esetén a mozgó csőkötegfal és a fordulókamra együttesen, szabadon elmozdulhat a külső álló fejen, így oldva meg a hőkompenzációt. A külsőfej leszerelése után az úszófej fordulókamrája is leszerelhető, az egész hőcserélő szerkezet szétszedhető, így a csövek mind kívülről, mind belülről tisztíthatók.



4.3. ábra: Úszófejes hőcserélő

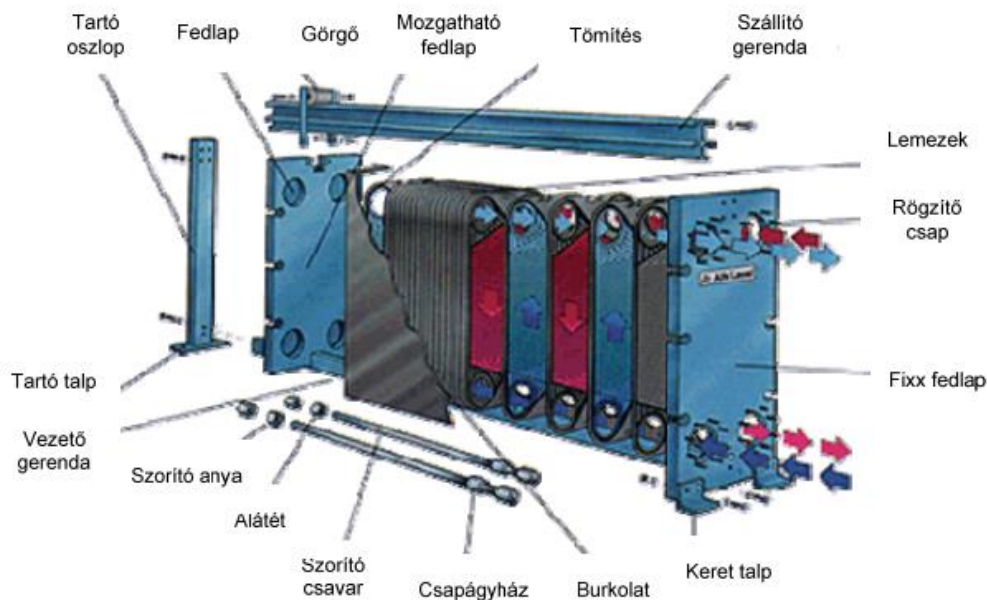
4.3.3. KETTŐS CSÖVES HŐCSERÉLŐK

Gyakran használnak a vegyiparban kettőscsöves („cső a csőben”) hőcserélőt, amely a csőköteges hőcserélők határeseteként, ugyanis a csőköteget egyetlen cső alkotja. Előnye, hogy szabványos elemekből könnyen összeállítható, valamint, hogy tetszés szerinti számban sorba kapcsolva az elemeket, a felület növelése egyszerű. Ezzel a hőcserélővel a tökéletes ellenáram elvét valósíthatjuk meg, így intenzív hőátadás érhető el. Használatuk csak így gazdaságos, ugyanis az adott felületre vonatkoztatott

saját tömegük több mint kétszerese az egyéb csőköteges hőcserélőkének. A hőcserélő többnyire szétszerelhető, így mind a köpenytér, mind a csőtér tisztítható. Az alkalmazott csőbordák a hőátadást javítják.

4.3.4. LEMEZES HŐCSERÉLŐK

A lemezes hőcserélők (4.4. ábra) sajátossága, hogy a hőátadó felületét olyan lemezek (hullámosított vagy recézett) alkotják, amelyeket keretszerkezet tart össze. A lemezek anyaga legtöbbször rozsdamentes acél-, réz-, nikkel-, néha titánötvözetek, vastagságuk 1-3 mm. A lemezeken a hullámosítás szerepe kettős; egyrészt a lemezeket merevíti, másrészt az áramló közeg nagyfokú turbulenciáját eredményezi. A lemezek négy sarkán helyezik el az átömlő nyílásokat. Az átömlő nyílásokból alakulnak ki a csatornák, amelyeken átvezetik a közeget lemeztől lemezre. A lemezes hőcserélőknél előnyösen alkalmazhatóak olajipari célokra, mivel alkalmazásukkal nagy viszkozitású folyadékban is nagy hőátadási tényezőt érhetünk el. A hőátadásban résztvevő két közeg általában az egymást követő lemezekon váltakozva ellentétesen elhelyezkedő beömlőnyílásokon áramlik a lemezek közt kialakuló barázdáltfalú kamrákban, párhuzamosan a lemezek síkjával. A lemezes hőcserélők előnye, hogy könnyen szétszedhetők és tisztíthatók, hátrányuk viszont az, hogy csak viszonylag kis nyomás és hőmérséklet esetében használhatók gazdaságosan. A maximális nyomás 15-20 bar, a maximális hőmérséklet pedig 150-200°C, mely azonban a lemezek közvetlen összehegesztésével 40-45 bar nyomásra és 300-400°C hőmérsékletre növelhető. Az ilyen hőcserélő azonban nem bontható és nem tisztítható.

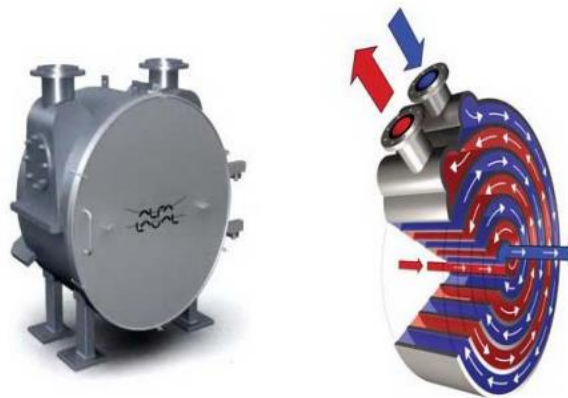


4.4. ábra: Lemezes hőcserélő felépítése

4.3.5. SPIRÁLLEMEZES HŐCSERÉLŐK

A spirállemezes hőcserélőt (4.5. ábra) főleg folyadék-folyadék hőcserélőként használják, ez esetben a hőcserélők kapcsolása szinte kivétel nélkül mindig ellenáramú. Előnyösen alkalmazható iszapos folyadékok hűtésére vagy fűtésére, mert

pl. csöves hőcserélőkel összehasonlítva ugyanolyan körülmények között jelentősen kisebb a beruházási költsége. A spirállemeztes hőcserélők fő szerkezeti eleme két, csigavonalban meghajlított fémlemez, amely két párhuzamos négyszög keresztmetszetű spirális csatornát képez. A meleg közeget a spirál középpontján vezetik be és azután csigavonalban körbehaladva a spirálköteg szélén, tangenciális irányban lép ki. A hideg folyadék áramlása pedig a másik spirális csatorna mentén épp ellentétes irányú. Kimutatták, hogy a spirállemeztes hőcserélőkben a hőátadási tényező lényegesen jobb, mint pl. ugyanolyan áramlási sebesség esetén a csőköteges készülékekben. Ez a görbe alakú pályának az áramlás turbulenciáját fokozó hatásával magyarázható. A fedélrészek a spirális tekercshez rendszerint karimás kötéssel csatlakoznak, és azok eltávolításával a hőcserélők mindkét tere könnyen tisztítható. A spirállemeztes hőcserélő szerkezeti anyaga bármilyen hegeszthető és hidegen megmunkálható fém lehet, így szénacél, saválló acél, ezen kívül különböző réz-, nikkel- és alumínium ötvözet. A hőcserélők kényes része a csonkok végén lévő tömítések, mert nem megfelelő tömítések esetén keveredések vagy átszivárgások léphetnek fel.



4.5. ábra: Spirállemeztes hőcserélő

4.4. A csőköteges hőcserélők technológiai tervezésének irányelvei

A vegyipari technológiákban a hőcserélő berendezések az energia hatékony felhasználásának célját kell, hogy szolgálják, ezért ezeket a berendezéseket az egyik legfontosabb technológiai egységeknek tekinthetjük. A hőcserélők méretezése során az a célunk, hogy olyan készüléktípust tervezzünk, amely az adott feladatot meghatározott időtartamon keresztül és lehetőleg költségkímélő módon lássa el. A méretezés során a hőcserélőt úgy kell megtervezni, hogy az teljesítse a hőtechnikai követelményeket, vagyis, hogy adott bemenő anyagáramok és anyagáram-hőmérsékletek esetén biztosítva legyenek a kimenő (előírt) hőmérsékletek. A hőcserélő tervezésnél a nyomásesést is figyelembe kell venni, amely nem lehet nagyobb, mint egy megengedett határérték. A csőköteges hőcserélők számos előnyös tulajdonságaik mellett bizonyos hátrányokkal is rendelkeznek.

Előnyei:

- fejlett technológiát képviselnek, könnyen beszerezhetőek

- tervezésükre, méretezésükre számítógépes szoftverek állnak rendelkezésre a technológiai folyamat modellezésének lehetőségével együtt
- mivel széles körben alkalmazzák ezen típust, így számos tervezői és üzemeltetői tapasztalat áll rendelkezésre
- szabványosított tervezési előírások léteznek
- széles terheléshatárok között alkalmazhatóak
- alkalmasak magas hőmérsékletű és nagy nyomású feladatokra
- fejlett gyártástechnológia jött létre, sok gyártó van jelen a piacon

Hátrányai:

- egy már legyártott konstrukciót nehéz módosítani, szemben pl. a lemezes hőcserélőkkel, amelyeknél új tagok beépítésével a hőátadó felület könnyen megnövelhető
- kisebb teljesítményű, mint az egyéb típusok, azaz kisebb az egységnyi tömegre vagy felületre vonatkoztatott teljesítmény
- érzékeny a vibrációra
- érzékeny az elpiszkolódásból származó lerakódásokra

4.4.1. A TERVEZÉS KIINDULÁSI ADATAI, A HŐCSERÉLŐ TÍPUSÁNAK KIVÁLASZTÁSA

Egy csőköteges hőcserélő tényleges technológiai tervezésére a technológiai feladat ismeretében, általában a folyamat technológiai folyamatmodellezése után kerülhet sor. Így ismertnek tekinthetők a hőcserélő technológiai méretezéséhez szükséges és nélkülözhetetlen adatok, mint:

- a hőcserében részt vevő közegek:
 - o mennyiségi, adatai (ill. azok várható időbeni változása)
 - o hőmérsékleti viszonyai
 - o nyomásai
 - o fizikai-kémiai tulajdonságai (sűrűség, fajhő, viszkozitás, hővezetési tényező, stb.) a megfelelő hőmérsékleten és nyomáson
 - o megengedhető nyomásesés a készüléken
 - o elpiszkolódási tényezők (Fouling factor)

Csőköteges hőcserélő készülék tervezésének megkezdése előtt tisztázni kell annak pontos technológiai rendeltetését (hűtő, előmelegítő, kondenzátor, forraló, stb.). Vegyipar területén gyakori, hogy egy üzemet, üzemrészt több működési esetre kell megtervezni. Ez általában minden készülék méretezését befolyásolja. Sok esetben más-más készülékekre, más-más működési eset lesz a tervezésileg meghatározó. Tervezési esetnek hívjuk azt az üzemállapotot, amelyben az adott készülék a legnagyobb terhelést kapja. Hőcserélők esetében a legnagyobb terhelést, az üzemileg előforduló egységnyi hajtóerőre jutó legnagyobb átszármaztatni kívánt hőmennyiség jelenti. A termikusan megméretezett hőcserélőt hidraulikailag mindig ellenőrizni kell arra az esetre, amely a legnagyobb áramlást adja, ez akár két külön eset is lehet, csőoldalra és köpenyoldalra. A megadott maximális nyomásesés értékét nem haladhatjuk meg a tervezési tartalékkal együtt sem.

A hőcserélő tervezés egyik legfontosabb pontja eldönteni két különböző mennyiségű és tulajdonságú áram közül, hogy melyik kerüljön a csőoldalra és melyik a köpenytérbe.

- Ha az egyik közeg vegyes fázisú, akkor azt vezessük mindig a csőtérbe, ugyanis a vegyes fázisú áramlás a köpenytérben kellemetlen légszakokat okozhat, amely a hőcserélő teljesítményét a töredékére csökkentheti.
- Homogén fázisok esetében mindig azt a közeget vezetjük a csőoldalra, amely várhatóan nagyobb lerakodást okoz, nagyobb az elpiszkolódási tényezője (fouling factor). Ennek oka, hogy a csőoldal könnyebben tisztítható, mint a köpenyoldal.
- Gőzkondenzáció esetén a kondenzálódó gőzt lehetőleg a köpenyoldalra vezessük, ez alól gyakori kivétel a gőzfűtéses „kettle” típusú visszaforráló.
- Forralni – kivéve a „kettle” típusú forralókat – lehetőleg a csőtérben kell. A fázisváltással járó hőcserélő-konstrukciók kialakításánál mindig tartsuk szem előtt a fázisok mozgásának irányát. Például a köpenyoldalon keletkező kondenzátum lehetőleg minél előbb el tudjon folyni és ne tudjon összegyűlni a készülékben. A forralás során keletkező gőzökre ugyanez vonatkozik, a hosszú tartózkodási idő túlhevülést okoz.
- Ha a két közeg közül az egyik nagynyomású, akkor a nagynyomású közeget a csövekben áramoltatjuk, hogy elkerüljük a nagynyomású köpeny többletköltségét.
- Ha a fent felsorolt szempontok alapján mindegy, hogy melyik közeget melyik térben áramoltatjuk, akkor a korrozívabb közeget vezessük a csőtérbe, csupán gazdasági okból.

Ha a felsorolt körülmények alapján több szempontot is figyelembe kell venni egyidejűleg, akkor elsősorban az üzembiztonság körülményeire kell tekintettel lenni és csak másodrendű kérdés az olcsóbb kivitel keresése. Soha nem az olcsóbb, hanem mindig az üzembiztosabb készülék a gazdaságosabb.

A hőcserélő típusát mindig az adott technológiai feladat, valamint a résztvevő közegek technológiai paramétereinek ismeretében, gondos mérlegelés alapján kell kiválasztani.

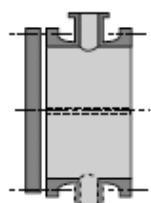
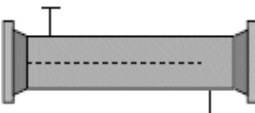
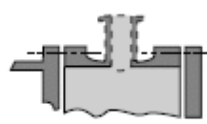
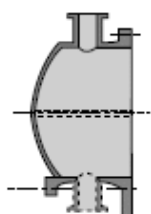
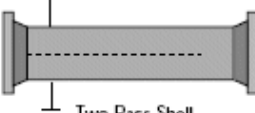
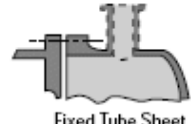
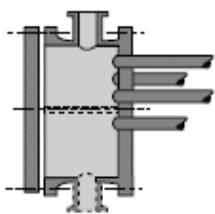
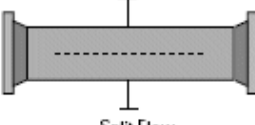
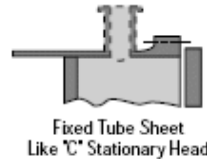
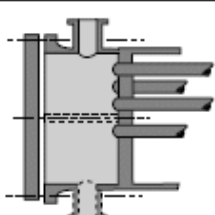
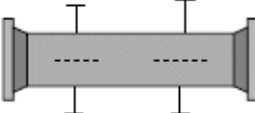
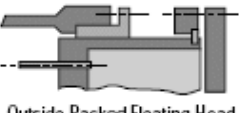
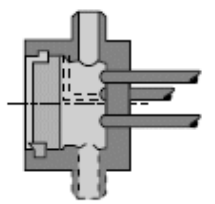
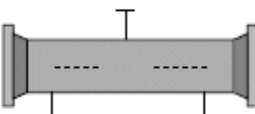
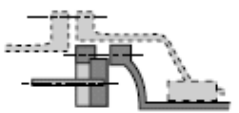
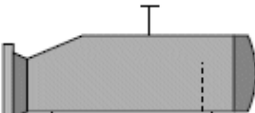
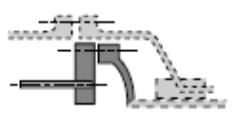
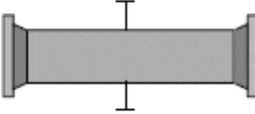
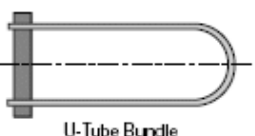
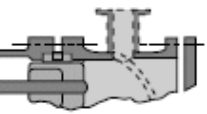
4.4.2. A CSŐKÖTEGES HŐCSERÉLŐK AZONOSÍTÁSA

A csőköteges hőcserélők azonosítására szolgáló TEMA kód (4.6. ábra) alapjául a főbb szerkezeti elemek, ill. a hőcserélő fő méretei szolgálnak. A kód a főbb szerkezeti elemek közül a fej (Stationary Head), a köpeny (Shell) és a fordulókamra (Rear Head) típusát veszi figyelembe. Ezen szerkezeti elemek típusát az ABC betűivel azonosították. A jelölérendszernek megfelelően 3 betűből álló betűkombinációval a hőcserélő típusa egyértelműen azonosítható. A fő méretek közül csak a köpeny átmérőjét illetve a hőcserélő hosszát (ami alatt leggyakrabban a két csőköteggel távolságát értik) veszi figyelembe.

Egy csőköteges hőcserélő TEMA szerinti azonosítása, pl.: BFS-450-6000, ami egy B típusú fejjel, F típusú köpennyel, és egy S típusú fordulókamrával rendelkező

hőcserélőt jelent, amelynek köpenyátmérője 450 mm, csőkötegében lévő csöveinek hossza 6000 mm hosszú.

Hiányossága ennek a jelölésrendszernek, hogy több fontos paramétert nem vesz figyelembe, így pl. a jelölésrendszer nem adja meg, hogy milyenek a beépített csövek jellemzői, hány darab és milyen típusú a terelőlemez, stb. Ennek ellenére azonban az egész világon elfogadott ezen jelölésrendszernek használata, emiatt alkalmazása és ismerete feltétlenül indokolt.

Stationary Head Types		Shell Types		Rear Head Types	
A	 Removable Channel and Cover	E	 One-Pass Shell	L	 Fixed Tube Sheet Like "A" Stationary Head
B	 Bonnet (Integral Cover)	F	 Two-Pass Shell with Longitudinal Baffle	M	 Fixed Tube Sheet Like "B" Stationary Head
C	 Integral With Tubesheet Removable Cover	G	 Split Flow	N	 Fixed Tube Sheet Like "C" Stationary Head
N	 Channel Integral With Tubesheet and Removable Cover	H	 Double Split Flow	P	 Outside Packed Floating Head
D	 Special High-Pressure Closures	J	 Divided Flow	S	 Floating Head with Backing Device
		K	 Kettle-Type Reboiler	T	 Pull-Through Floating Head
		X	 Cross Flow	U	 U-Tube Bundle
				W	 Externally Sealed Floating Tubesheet

4.6. ábra TEMA kódok

4.4.3. A KONSTRUKCIÓ KIALAKÍTÁSÁNAK SZEMPONTJAI

A hőcserélőnek a hőtechnikai követelményeken túlmenően biztosítani kell, hogy a tervezett berendezés ne legyen hajlamos vibrációra, lerakódásra és korrózióra. A hőcserélő berendezések a folyamatos igénybevétel során egy idő után elpiszkolódnak, lerakódások jelennek meg a belső felületükön. Ezek lerontják a hőátbocsátás (hőátzármaztatás) mértékét, tehát megjelenésükkel már a tervezési folyamat elején számolni kell. A tervezésnél meg kell határoznunk a csőköteges hőcserélő szerkezeti elemeinek (köpeny típusa, köpeny átmérője, csőhossz, csőméret, csövek száma, csőkiosztás, terelőlemezek típusa, osztása) olyan együttesét, amely alkalmas az adott feladat ellátására.

Hőcserélő fej, köpeny és fordulókamra típusok

A csőköteges hőcserélők esetén a fej és a fordulókamra a legfontosabb szerkezeti elemek közé tartozik. Kialakításuk kétféle lehet: sík geometriájú, ill. mélydomború fenékkal ellátott. A fej és a fordulókamra belső kialakítása nagymértékben függ attól, hogy csőoldalon hány járatú a hőcserélő. A köpeny kialakítása is többféle lehet.

Merev csőköteges hőcserélőkhöz a TEMA A, B és N típusú fej használatos. Ilyen típusú csőköteges készülék alkalmazását az üzemi paramétereken (üzemi hőmérséklet $<150\text{ C}^\circ$, a köpeny és csövek falhőmérséklete közti különbség $<25\text{ C}^\circ$) kívül a köpeny oldal mechanikai tisztíthatatlansága is korlátozza. A belső csövek helyszíni tisztítását lehetővé tevő TEMA A típusú fej, környezetre veszélyes anyagok esetén - környezetvédelmi okokból nem megengedett. A helyszínen is tisztítható, pl. hűtővizet, vízgőzt csőoldalon tartalmazó hőcserélőknél a TEMA A típusú fej alkalmazható.

A köpeny kialakítás lehet TEMA E, F, G, H, J, K és X típusú. Ezek közül a TEMA F hosszanti terelővel rendelkező, köpeny oldalon kétjáratú típus. Igazi ellenáramú hőcsere akkor valósítható meg, ha az F típusú köpenyhez csőoldalon is kétjáratú csőköteg társul. Nem igazán preferált az F típusú terelőlemez kialakítás, ha a közegek általában lerakódásra hajlamosak. Helyette két "E" köpenyes konstrukciót választhatunk, akár egymásra építve.

A TEMA G típusú köpeny kialakítást általában vízszintes termoszifon reboilerekhöz alkalmazzák. A köpenyben csak egy központi tartólemez van csőbehajlás ellen, de terelő lemezek nincsenek. Ez a típus 3 m-nél rövidebb csőhossz esetén használható, amennyiben ettől hosszabb cső szükséges a TEMA H kialakítást kell alkalmazni. Mindkét típusnál igen kicsi a nyomásesés a keresztirányú terelők hiánya miatt.

Tiszta keresztáramú köpeny a TEMA X típus, melynek a nyomásesése rendkívül alacsony. Ezt a köpeny kialakítást alacsony nyomás, főként vákuum esetén, gőzök hűtésére vagy kondenzálására alkalmazzák.

Úszófejes hőcserélőkhöz leggyakrabban a TEMA S típusú fordulókamra kialakítás használatos, ami lehetővé teszi a csőköteg eltávolítását az úszófej felől, a köpenyoldali fedél (Shell Cover) megbontásával.

Lerakódásra hajlamos közegek csőoldali vezetéséhez U csöves hőcserélő, azaz a TEMA U típusú fordulókamra a tisztítási nehézségek miatt nem javasolt. Ilyen típust csak

tiszta vagy kis lerakodási ellenállású ($fr \leq 0,0002 \text{ m}^2\text{C}^\circ/\text{W}$) anyagok, pl. kondenzvíz, vízgőz esetén célszerű használni.

A TEMA T típusú úszófejet főleg az üst típusú reboilereknel alkalmazzák, amikor lerakódásra hajlamos közeg miatt az U csöves csőköteg nem használható. Ezen típus előnye, hogy a csőköteg, a köpeny- vagy az úszófej fedő eltávolítása nélkül kihúzható a nem mozgó fej felől.

Belső csövek

A csőköteg a hőcserélő legfontosabb alkotórésze. A csövek képezik általában a hőcserélők legdrágább elemét, és ezek korrodálódnak leginkább. A csőköteges hőcserélőkben alkalmazott belső csövek leggyakrabban sima hengerelt csövek (varrat nélküli - seamless). A csőköteghez általában 20 mm és 25 mm külső átmérőjű csövek használatosak. (Angolszász alapú szabványok esetében 1 inch és $\frac{3}{4}$ inch a preferált, ami 25,4 illetve 19,05 mm-nek felel meg.) A sima csövek mellett egyéb speciális kialakítású csöveket is alkalmaznak. Ennek többféle célja lehet. Amennyiben a hőátadó felület növelése a cél, abban az esetben ún. bordázott csöveket alkalmaznak. A bordázat kialakítása lehet kereszt- vagy hosszirányú. Lerakódásra hajlamos közegek esetén ez nem alkalmazható.

A csövek anyagukat tekintve sokrétűek lehetnek. A leggyakrabban sima szénacélból készült csöveket alkalmaznak, de a korrózióállóság biztosítása miatt, az ötvözött acélokon át, egészen extra szerkezeti anyagokból (pl. titán, üveg, teflon, stb.) is készülhetnek.

Általános szempont, hogy a nagyobb korrozivitással rendelkező közeget célszerű csőoldalon vezetni. Abban az esetben ha a közeg korrozivitása nagyon drága szerkezeti anyag beépítését igényli és a két közeg korróziós tulajdonságaiban jelentős különbség van, abban az esetben ún. duplex csöveket alkalmaznak, ahol a belső réteg a korrózióállóbb. Ha a hőcserélő két közegének nyomása nagymértékben eltérő, akkor célszerű a nagyobbik nyomású közeget szilárdsági megfontolásokból a csőoldalon vezetni.

Figyelembe kell venni azt is, hogy egy adott átmérőjű köpenybe beépíthető csövek számát a csövek külső átmérője, a csőosztás valamint a csőoldali járatszám is befolyásolja. Mivel nem lehet egyértelmű összefüggést megállapítani a fenti paraméterek és a csőszám között, ezért a tervezés céljára táblázatos formában adnak javaslatokat a csőszámra vonatkozóan.

Tetszőleges hosszúságú hőcserélőt építeni a tetszőleges hosszúságú csövek magas gyártási költsége miatt nagyon költséges lenne. A csöveket szabványosított hosszban hozzák forgalomba, így azokat a hőcserélőbe vagy az eredeti vagy annak egészszámú törtrésze hosszban célszerű beépíteni. A csövek szabványosított hossza a metrikus mértékrendszert alkalmazó országok esetében általában 6 m.

A csőosztás (Tube pitch) a két szomszédos cső tengelyvonalai közötti legrövidebb távolság. Háromszöges elrendezés esetén a TEMA szerinti minimális csőosztás megközelítőleg $1,25 \times$ külső csőátmérő. A tervezési gyakorlatban a minimális

csőosztást szokás tartani, mert így lehet a legkisebb köpenyátmérőben elhelyezni a szükséges csőszámot.

Csőelrendezés

A csöveknek a csőkötegben való elrendezése, illetve az osztás, ahogyan a csöveket a csőkötegfalba helyezik különböző lehet. Természetesen a csöveket a csőkötegen belül igyekeznek valamilyen szabályos osztás vagy geometria szerint elhelyezni. Leggyakrabban háromszög elosztást (4.7 ábra a) és b)) alkalmaznak, mert ebben az esetben fér el a legtöbb cső a csőkötegfalban, ezáltal nagyobb hőátadó felület érhető el egy adott méretű készülékben. Háromszög kialakítás esetén a legkisebb az esélye az áramlási csatornák kialakulásának. Ennek az osztásnak azonban az a hátránya, hogy a köpenyoldal mechanikus módon nehezen tisztítható. Amennyiben lerakódásra hajlamos a közeg, abban az esetben a soros négyzetes osztást (4.7 ábra c) és d)) részesítik előnyben.

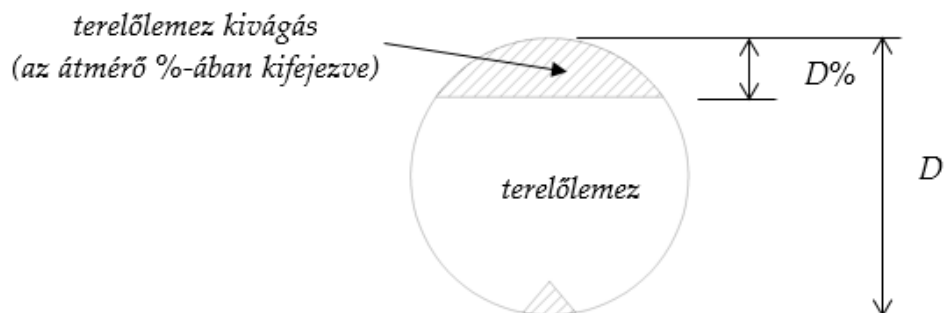


a) 30°-os elrendezés b) 60°-os elrendezés c) 90°-os elrendezés d) 45°-os elrendezés

4.7 ábra: Csőköteges hőcserélők lehetséges csőelrendezései

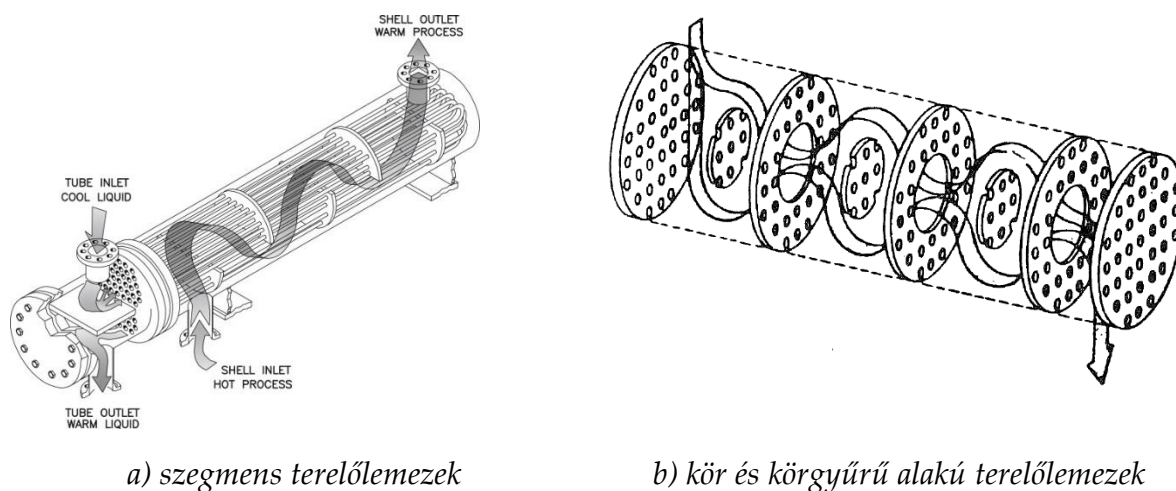
Terelőlemezek

A hőcserélőkben a köpenyoldalon áramló fluidum áramlási viszonyait az abban elhelyezett terelőlemezek szabályozzák. A terelőlemezek kétféleképpen növelik a hőátadási tényezőt, az áramlási sebesség növelésével, ill. azzal hogy a csövekkel párhuzamos áramlási irány helyett keresztirányú áramlást valósítanak meg. Megkülönböztethetünk keresztirányú és hosszirányú terelőlemezeket. Leggyakrabban az ún. szegmens terelőlemezeket (4.9 a) ábra) alkalmazzák. Ezeknél fontos fogalom a kivágás mértéke, amely a kivágás sugárirányú méretének és a terelőlemez átmérőjének a hányadosa. A köpenyoldali közeg a terelő lemezekon lévő kivágásokon áramlik át. A kivágás nagyságának változtatásával kismértékben módosítható a köpeny oldali hőátadási tényező.



4.8. ábra: Terelőlemez kivágás

A terelőlemezek másik típusát képezik a kör és körgyűrű (4.9 b) ábra) alakú lemezek. A terelőlemezek nagyban befolyásolják az áramlási viszonyokat és ezáltal a köpenyoldali nyomásesést is. Ha az alacsony köpenyoldali nyomásesés a cél, akkor rúd vagy pálcza alakú terelőket alkalmaznak. A köpenyben hosszirányban is elhelyezhető terelő lemez. Ennek függvényében beszélhetünk kétjáratú (TEMA F), illetve osztott áramlású (TEMA G, H) köpenyről.



a) szegmens terelőlemezek

b) kör és körgyűrű alakú terelőlemezek

4.9 ábra Főbb terelőlemez típusok

Nyomásesés

A csőköteges hőcserélők méretezésénél fontos paraméter a nyomásesés. Az áramló közegek áramlási sebességének növelésével nő a hőátadási tényező, de ez által négyzetesen nő a nyomásvesztés. Ez különösen a kis üzemi nyomáson üzemelő berendezések esetén jelenthet gondot, mivel egy kismértékű nyomásesés is nagymértékben ronthatja a technológiai paramétereket. A nagyon nagy áramlási sebességek erózióhoz vezethetnek, így jó megoldást a nyomásesés és a sebesség optimális megválasztása jelenti. A javasolt folyadéksebesség a csőtérben és a köpenytérben egyaránt minimálisan 0,5÷2 m/s között legyen. Általában folyadékok esetén 0,5-0,7 bar nyomásesés engedhető meg hőcserélőnként. Ennél nagyobb

nyomásesés többnyire csak viszkozus folyadékok esetén indokolt, elsősorban csőoldalon. Gázok esetében a megengedett nyomásesés általában 0,05-0,2 bar, a jellemző érték a 0,1 bar.

A fluidumok sebessége

A hőcserélők egyik legfontosabb paramétere a rajtuk átáramló fluidumok megfelelő sebessége. Nagyobb áramlási sebességhez nagyobb Reynolds-szám és nagyobb hőátadási tényező tartozik. A nagyobb hőátadási tényező kisebb felületű és jobb hatásfokú konstrukciót eredményez.

A csőoldali sebesség növelhető a csövek hosszával, ugyanis a hosszabb cső mindig nagyobb sebességet eredményez. A nagyobb járatszám, nagyobb sebességet eredményez, viszont nagymértékben növeli a nyomásesést is. A járatszám növelésénél legyünk figyelemmel arra, hogy kis átmérőjű készülékbe ne tegyünk túl sok járatot, mert az gépészetileg nehezen megvalósítható. A csőoldali sebesség növelhető a csövek átmérőjének csökkentésével.

A terelő lemezek távolsága széles tartományban változtatható, emiatt jó beavatkozási pont a köpenyoldali sebesség korrigálására. A csőkiosztás és a csőtávolság változtatásával is befolyásolhatjuk a köpenyoldali sebességet. A köpeny átmérőjét közvetetten a csőköteg méretei határozzák meg. Amennyiben kellően nagy sebességet tudunk elérni a csőoldalon, akkor az maga után vonja azt, hogy kisebb hőátadó felület szükséges. Ez kevesebb csövet jelent, ami meg kisebb köpenyátmérőt. A kisebb köpenyátmérő pedig nagyobb köpenyoldali sebességet hoz magával. Egyszerűen fogalmazva a jó csőoldali sebesség magával hozza a jó köpenyoldali sebességet is. Ezt tovább fokozhatjuk a terelőlemezek távolságának csökkentésével. A javasolt folyadéksebesség a csőtérben és a köpenytérben egyaránt minimálisan 0,5÷2 m/s között legyen. A 2 m/s feletti áramlási sebességet ne lépjük túl, mert az vibrációs problémákat okoz a hőcserélőben, amelyet mindenképpen el kell kerülni.

A nagy sebesség okozta koptató hatás további problémákat jelent a készülék bizonyos részeinél, különösen a belépő csonkoknál. Ezt a hatást a $q \cdot v^2$ szorzattal fejezzük ki, melynek értékére különböző szabványok (pl. TEMA) adnak iránymutatást.

Lerakódások okozta ellenállás

A legtöbb közeg, melyet a hőcserélőbe bevezetnek, az alkalmazás során a hőcserélőben lerakódásokat okoz. Tipikus példája ennek a vízkőlerakódása a kazánoknál, vagy az olajipari kemencék csöveinek elkorszolódása. A jelenséget magyarul elpiszkosodásnak vagy elpiszkolódásnak, angolul fouling-nak nevezzük.

A lerakódások jellegét leginkább a közeg anyagi minősége és a hőmérsékletviszonyok határozzák meg, melyek függvényében a lerakódások jellege nagyon eltérő lehet: gumyszerű, törékeny, rideg stb. Minden lerakódás azonban a hőátáramlást szemponjtjából ellenállásként viselkedik, azaz csökkenti a teljes hőátáramlást tényező értékét. A hőcserélők üzembe állításakor, vagy közvetlenül a hőcserélők tisztítása után a csövek felületén nincs lerakódás, hanem az fokozatosan alakul ki az üzemelés során. De a hőcserélők tervezésekor ezt a hatást is figyelembe kell venni,

hogyan a kialakított konstrukció egy üzemelési ciklus során mindvégig megfeleljen a vele szemben támasztott követelményeknek. A lerakódások hatását egy faktorról, az ún. Fouling faktorról veszik figyelembe, mely azonban tapasztalati adatokon alapul, ezért sok esetben csak nagyon nagy hibával becsülhető meg.

A csöves hőcserélők elhelyezése

A hőcserélők elhelyezését (vízszintes vagy függőleges) részben a hőcserélő konstrukció, részben pedig a technológiai paraméterek határozzák meg. A kondenzátoroknál a leggyakoribb a fekvőelrendezés, mert az álló elrendezésnél a kondenzátum a csöveken folyik végig és az egyre vastagodó folyadékhártya rontja a hőátvitelt. Vízszintes elrendezésű kondenzátoroknál a csőelosztással lehet a csöveken keletkező folyadékréteg vastagságát és folytonosságát befolyásolni. Nagynyomású technikában szinte döntő többséggel az álló elrendezés a domináló. Ennek az az oka, hogy a csőköteget nagyon kis átmérőjű és hosszú csövek alkotják. Ellenkező esetben a csöveknek nagy lenne a behajlása és emiatt sok alátámasztásra lenne szükség, ami pedig jelentősen növelné az áramlási ellenállást. Szintén álló elrendezést kell alkalmazni abban az esetben, ha a közeghőmérséklet 500°C feletti, mert a nagy hőmérséklet miatt a csövek anyaga meggyengül, és ezáltal azok könnyen behajlanak. A termoszfion elven működő hőcserélők (bepárlókészülékek forralói és a lepárló tornyok visszaforralói) gyakrabban álló elrendezésűek. Abban az esetben, ha a hőcserélőben résztvevő mindkét közeg folyadék, mind az álló, mind pedig a fekvő hőcserélők egyaránt használhatóak, bár megjegyzendő, hogy az álló elrendezésű konstrukció tisztítása általában nehézkes.

5. TARTÁLY JELLEGŰ KÉSZÜLÉKEK

A tartály jellegű készülékeket nyomás alapján 2 kategóriába soroljuk:

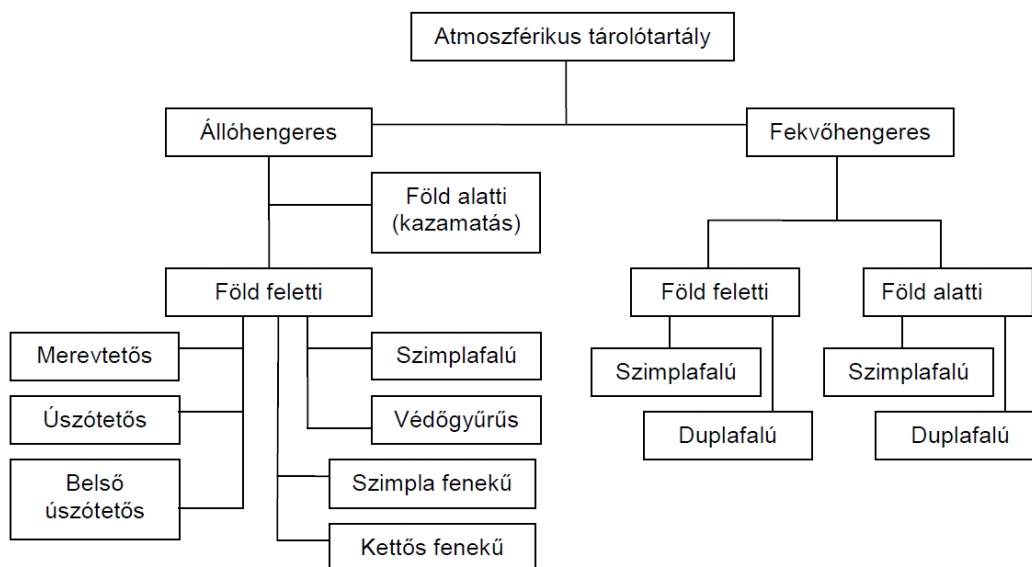
- atmoszférikus tartályok
- nyomástartó tartályok

Az atmoszférikus tartályok alkalmazási terület szerint lehetnek:

- tárolótartályok
- technológiai tartályok

5.1. Atmoszférikus tárolótartályok

Atmoszférikus tárolótartályok csoportosítását kialakításuk szerint az 5.1. ábra szemlélteti.



5.1. ábra: Atmoszférikus tárolótartályok csoportosítása

Állóhengeres atmoszférikus tárolótartályok

Az állóhengeres tárolótartályok a telepítés szerint lehetnek föld feletti vagy föld alattiak. Széles körben elterjedtek elsősorban azokon a területeken, ahol folyadékot kell nagy mennyiségben tárolni. A kőolajiparban ilyen tartályokat üzemeltetnek a kitermelő kutaknál, a feldolgozásnál, a forgalmazásnál a kőolaj és kőolajtermékek tárolásához. A tartályparkok tűzvédelmi rendszerében ilyen tartályokban tárolják a tűzi vizet is. Erőművekben, ahol olaj az energiahordozó; a vegyiparban a kénsavgyártásnál a kénsav, folyékony kén és egyéb folyadékok; az élelmiszeriparban és a mezőgazdaságban a tej, szesz, melasz, bor, a lakk; a festékiparban különböző oldószerek tárolására is ilyen tartályokat alkalmaznak.

A tartályokban a tartály alján mért üzemi nyomás a magasabb forráspontú folyadékok esetében a tárolt anyag hidrosztatikai nyomása, míg az alacsonyabb forráspontú folyadékok esetében a folyadék gőznyomásának és a folyadék hidrosztatikai nyomásának összege. Továbbá az inert gáz párna alatt üzemelő tartályok esetén a gáztér nyomásának és a folyadék hidrosztatikai nyomásának összege (a gáztér nyomása mbar nagyságrendű).

A tartályok a szerkezeti kialakításukban döntően a tetőszerkezetükben térnek el. Ezek alapján a következők lehetnek:

- merevtetős tartályok: a tartályköpenyhez mereven hozzáerősített tetejű, álló hengeres tartály,
- (külső) úszótetős tartályok: a tárolt folyadékon úszó, annak felszínét lefedő tetejű, álló hengeres tartály,
- belső úszótetős tartályok: kombinált tetőszerkezetű, vagyis a merevtetős tartály belsejébe helyezett könnyű szerkezetű úszótetővel ellátott állóhengeres tartály.

Fekvőhengeres atmoszférikus tárolótartályok

A fekvőhengeres atmoszférikus tárolótartályok lehetnek kialakítás szerint szimpla és dupla falú tartályok, és lehetnek többkamrás kialakítású tartályok is:

- Szimpla falú tartály: acéllemezből készített palástú és fenekű, megfelelő terhelési viszonyokra méretezett, „önhordó” szerkezetű tartály.
- Dupla falú tartály: olyan szimpla falú tartály, amely részben vagy egészen folyadéktömör külső acélköpennyel van körülvéve. A duplafalúsítás elérhető oly módon is, hogy a szimplafalú tartály belsejébe egy olyan fém vagy kompozit anyagú bélést helyezünk el, amelynél biztosított a két palást közötti tér tömörségének ellenőrizhetősége. Gyakran alkalmazzák ezt a típust szloptartályként.
Dupla falú tartály esetén lyukadásérzékelő rendszert kell csatlakoztatni a külső köpenyre. A duplafalú tartályok lyukadás ellenőrzése megvalósítható a két köpeny közötti térrészben
 - o folyadékérzékelő szonda alkalmazásával,
 - o folyadék feltöltéssel és szint figyeléssel,
 - o enyhe túlnyomással, vagy
 - o vákuummal is.
 - o Kriogén alkalmazás esetén hőmérséklet figyelés is alkalmazható.
- Többkamrás tartály olyan szimpla vagy dupla falú tartály, amelyek tárolótere közbenső fenekekkel, egymástól folyadéktömören elválasztott rekeszekre van osztva. Sima válaszfalak nem építhetők be.

Elhelyezésüket tekintve lehetnek:

- Föld alatti tartály: olyan tartály, amelynek felső alkotója a talajszint alatt 0,3 m mélységben van.
- Földtakarás alatti tartály: olyan földalatti tartály, amelynek a legalább 0,3 m-es földtakarása csak a terepszintből kiemelkedően (földfeltöltéssel) alakítható ki.
- Föld feletti tartály

5.2. Nyomástartó tartályok

A nyomástartó edény vagy tartály zárt, merev falú edény, melyet a környezeténél nagyobb nyomású folyadék vagy gáz tárolására terveztek. A nyomástartó edények általában nagyobb berendezések részei (például kazándob, oxigéntartály, PB gáztartály, vegyipari berendezések, gázok tárolására szolgáló tartályok, atomreaktor nyomásálló burkolata, pneumatikus, hidraulikus hajtásoknál, légfékeknel). A nyomástartó edények változatos geometriai formájúak lehetnek, de majdnem kivétel nélkül forgástest-alakúak, ezek között is leggyakoribbak a hengeres edények a nyomástól függően csekélyebben vagy erősebben domborított véglapokkal, úgynevezett edényfenekekkel.

A nyomástartó készülékeket általánosságban az alábbi csoportosítás szerint különböztetjük meg:

- föld alatti fekvőhengeres;
- föld alatti állóhengeres;
- föld feletti fekvőhengeres;
- föld feletti állóhengeres;

- gömbtartályok.

Gömbtartályok leggyakoribb alkalmazási területe a cseppfolyós gázok tárolása.

A föld feletti nyomástartó tartályok technológiában betöltött szerepük szerint lehetnek:

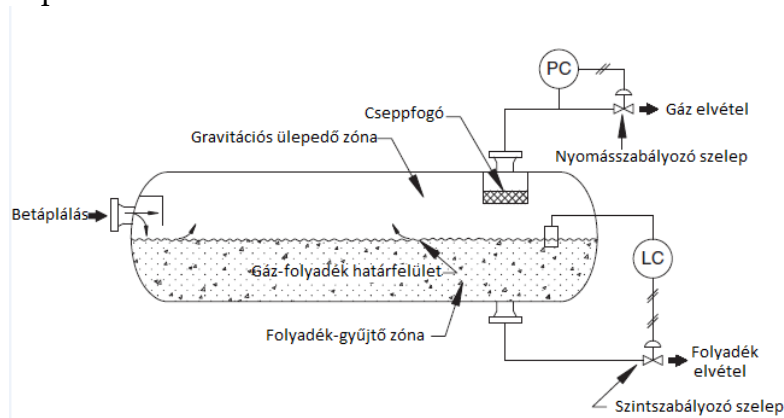
- üzemi alapanyag tartályok
- cseppfogók
- reflux tartályok
- ülepítők vagy parciális szeparátorok
- kondenz és kazántápvíz tartályok
- gőzdobok,
- segédanyag tároló tartályok, stb.

Föld feletti nyomástartó edények méretezése

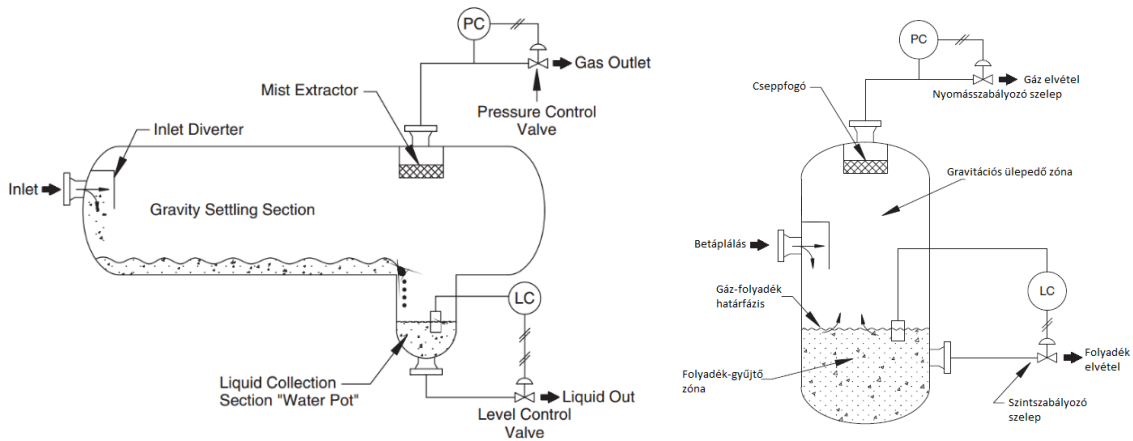
A technológiai folyamatban a nyomástartó edények legfontosabb funkciói:

- megfelelő tartózkodási idő biztosítása a szivattyú illetve a kapcsolódó technológiai egységek számára
- fázisszeparáció
 - o kétfázisú szeparátor
 - gőz/gáz-folyadék (5.2. és 5.3. ábrák)
 - folyadék-folyadék
 - o háromfázisú szeparátor (5.4. és 5.5. ábrák)

Gyakori fázisszeparátor kialakítások:

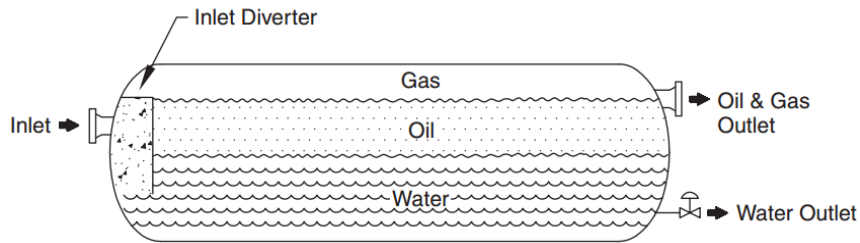


5.2. ábra: Kétfázisú fekvőhengeres (gőz/gáz-folyadék) szeparátor szintszabályzással

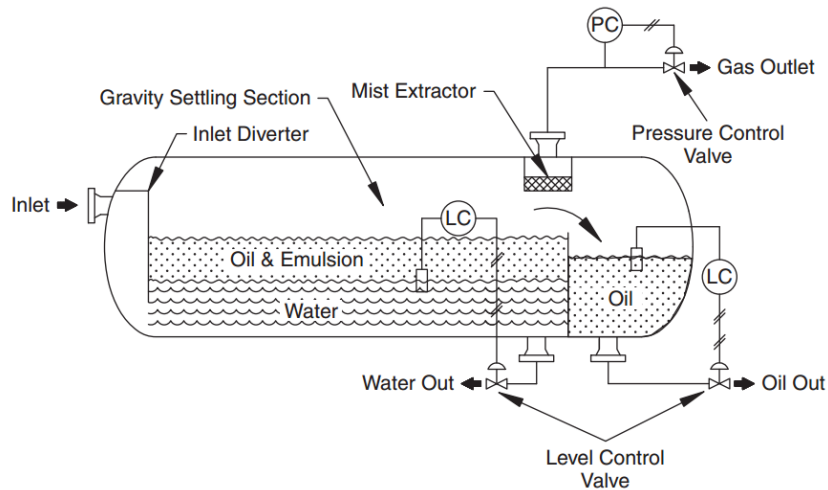


5.3. ábra: Fekvő és álló hengeres gázszeparátor

A fekvőhengeres kétfázisú folyadék leválasztó gázszeparátor folyadékzsomppal csekély mennyiségű folyadék leválasztására alkalmas.



5.4. ábra: Fekvőhengeres háromfázisú szeparátor belső elemek nélkül, fázishatár szabályzással

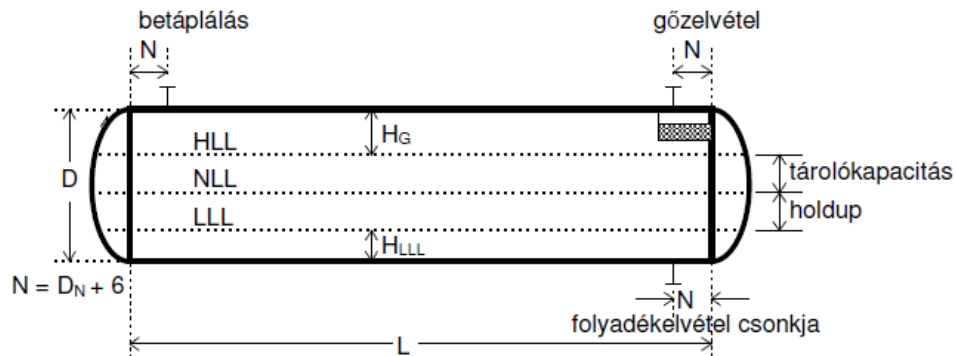


5.5. ábra: Fekvőhengeres háromfázisú szeparátor bukógáttal

Szeparátor funkció esetén a gáz és folyadék térrészt úgy kell megméretezni, hogy megfelelő tartózkodási idő álljon rendelkezésre a fázisok szétválásához. Ezen felül folyadékot is tartalmazó edények esetén a folyadék fázisra hold-up és tároló időket kell figyelembe venni (5.6. ábra).

A tárolókapacitás a normál folyadékszint és a magas folyadékszint közötti térfogat, a tárolóidő (surge time) a tárolókapacitás és a belépő folyadék térfogatáram hányadosa. Ez arról ad tájékoztatást, hogy elvétel kiesés esetén mennyi idő alatt telik fel a tartály.

A hold-up térfogat a normál folyadékszint és az alacsony folyadékszint közötti térfogat, a hold-up idő a hold-up térfogat és a kilépő folyadék térfogatáram (pl szivattyú kapacitás) hányadosa. Ez arról ad tájékoztatást, hogy betáplálás megszűnése esetén mennyi idő alatt fogy le a tartály.



5.6. ábra: Tárolókapacitás és hold-up kapacitás fekvőhengeres tartály esetén

A technológiában betöltött szerepétől függően eltérő hold-up és tárolóidőket (surge time) szükséges figyelembe venni (5.1. táblázat), de a műszerezettség, illetve a kezelők gyakorlottsága is befolyásolhatja ezen tartózkodási időket.

	Hold-up	Tároló		Hold-up	Tároló
A. Betáp tartály	10	5	D. Oszlop fenék		
B. Szeparátor			a. oszlop betáp	5	2
a. oszlop betáp	5	3	b. tartályba		
b. tartályba			b1. szivattyúval v. hőcserélőn ker.	5	2
b1. szivattyúval v. hőcserélőn ker.	5	2	b2. szivattyú nélkül	2	1
b2. szivattyú nélkül	2	1	c. csőkemence típusú visszaforrálóba	5-8	2-4
c. csőkemence betáp	10	3	E. Kompresszor szívó oldalán	10 a hengeres rész alja és a HLA között	
C. Reflux tartály			F. Fáklya üzemi cseppfogó	20-30 a HLL-ig	
a. csak reflux	3	2			
b. reflux és termék (lásd. B pont)	3+	2+			

5.1. táblázat: Javasolt hold-up és tároló (surge) idők technológiai pozíciótól függően

A hold-up és a tárolóidő korigálása a műszerezettség és a dolgozók tapasztalata alapján az 5.2. táblázatban összefoglalt tényezők szerint lehetséges.

Operátor tapasztalata	Értéke	Műszerezettség faktora	Értéke
Jól képzett	1	Jól műszerezett	1
Képzett	1,2	Átlagosan műszerezett	1,2
Képzetlen	1,5	Gyengén műszerezett	1,5

5.2. táblázat: Műszerezettség hatása a hold-up és tárolóidőre

6. DESZTILLÁLÓ KOLONNÁK

6.1. Desztillációs módszerek

Desztillációt különböző módszerekkel lehet megvalósítani. Üzem módját tekintve megkülönböztethető:

- **Szakaszos üzemű (batch) desztilláció:** Ekkor az elegy teljes mennyiségét egyszerre vezetik be a kiforrálóba, ahol az összetételváltozás miatt a hőmérséklet folyamatos emelésével végzik az elpárologtatást.
- **Folyamatos üzemű desztilláció:** Ebben az esetben a kiindulási elegy betáplálása és a termékek elvétele egy időben egyenletesen valósul meg állandó hőmérsékleten.

A desztilláció végrehajtását tekintve a felhasználható módszerek:

- **Egyszeri desztilláció:** Egyszeri desztillációkor sem a desztillátum sem a maradék nem kerül feldolgozásra egy következő lepárlásban. Fajtái:
 - o Egyensúlyi (flash) desztilláció: Ez a részleges elpárologtatás a desztilláció olyan módszere, amely a folyadékelegy hőmérsékletét nyomás alatt forráspontja fölé emelik, majd egy nyomáscsökkentő szelepen keresztül egy nagytérfogatú alacsonyabb nyomású edénybe vezetik, ahol folyadék egy része elpárolog. A gőzt külön cseppfolyósítva a folyadékelegy két részre oszlik.
 - o Differenciális, ill. frakcionált desztilláció: Differenciális desztilláció során a lepárló készülékbe adott mennyiségű anyagot táplálunk be és ennek egy részét párologtatjuk el. A gőzöket elvezetjük a folyadék fölé, majd lecsapatva szedőben gyűjtjük össze. Amennyiben a keletkező desztillátumot időben egymás után külön-külön szedőedényekben gyűjtjük, akkor a termékek (frakciók) összetétele különböző lesz. Ezt nevezik frakcionált desztillációnak.
- **Ismételt desztilláció:** Ismételt lepárlás esetén a lepárlási folyamatot a desztillátum, ill. a maradék újbóli lepárlásával többször ismétljük és így a szétválasztás fokozható. Fajtái:
 - o Egyenáramú és ellenáramú desztilláció: Egyenáramú desztilláció esetén Minden fokozatban csak a desztillátum kerül feldolgozásra, az egyes üstökben lévő maradékot eltávolítják a rendszerből. Hátránya, hogy a desztillátum mennyiség folyamatosan csökken. A desztillátum kihozatal javítható ellenáramú desztillációval, amikor a maradékot nem távolítják el a rendszerből, hanem visszaadagolják az előző üstbe.
 - o Rektifikálás: Amikor a többszöri részleges elpárologtatást és részleges kondenzációt egy folytonos ellenáramú műveletben valósítják meg, akkor rektifikálásról beszélünk. Előnye, hogy feleslegessé válik az egyes üstökből eltávozó gőzök hűtése, valamint az üstök fűtése. Elegendő egy visszaforráló és egy kondenzátor alkalmazása, nem kell köztes hőcserélőket alkalmazni. Rektifikálás megvalósítható egy desztilláló oszlopban, ahol az elválasztási fokozatnak a tényérok felének meg.

6.2. Elegyek szétválasztási sorrendjének meghatározása

Desztilláló kolonnák tervezése előtt fontos a szétválasztási feladat pontos definiálása és az elegy elválasztási sorrendjének meghatározása, melyre több tervezési technika is szolgál. Kétkomponensű elegy szeparációjához elegendő egy vágás, mely megvalósítható egy hagyományos oszlop (egy betáplálás, egy fejtermék és egy fenéktermék) segítségével. Amennyiben egy többkomponensű elegy szétválasztását csak hagyományos oszlopokkal (egy vágás oszloponként) valósítanánk meg, akkor az csak több, egymás után kapcsolt oszloppal lehetséges. Általánosan egy M komponensű elegy elválasztásához $M-1$ oszlop szükséges, amennyiben nincsenek termodinamikai korlátai a szétválasztásnak. A lehetséges szétválasztási sorrendek száma ekkor:

$$\frac{[2 \cdot (M - 1)]!}{M! \cdot (M - 1)!}$$

Az elválasztáshoz szükséges vágások száma a komponensek számának növekedésével ugrásszerűen nő, emiatt fontos az optimális elválasztási sorrend meghatározása. Egy-egy szétválasztási sorrend optimális műveleti tervezése sokváltozós feladat. A döntési változók közé tartozik többek között az egyes oszlopok elméleti tényérszáma, betáplálási tényér száma, a betáplálás hőállapota, a kolonna nyomása, a refluxarány és az oszlopközi áramok nagysága és összetétele. A meghatározott sorrendek közül egyenes sorrendnek nevezik azt, amikor minden vágásnál a legillékonyabb komponens kerül leválasztásra, az összes többi fordított sorrend.

Tervezési módszerek:

- szélsőérték keresésen alapuló módszer,
- evolúciós stratégián alapuló módszer
- energetikai módszer
- heurisztikus szabályok,
- ezek különböző kombinációja

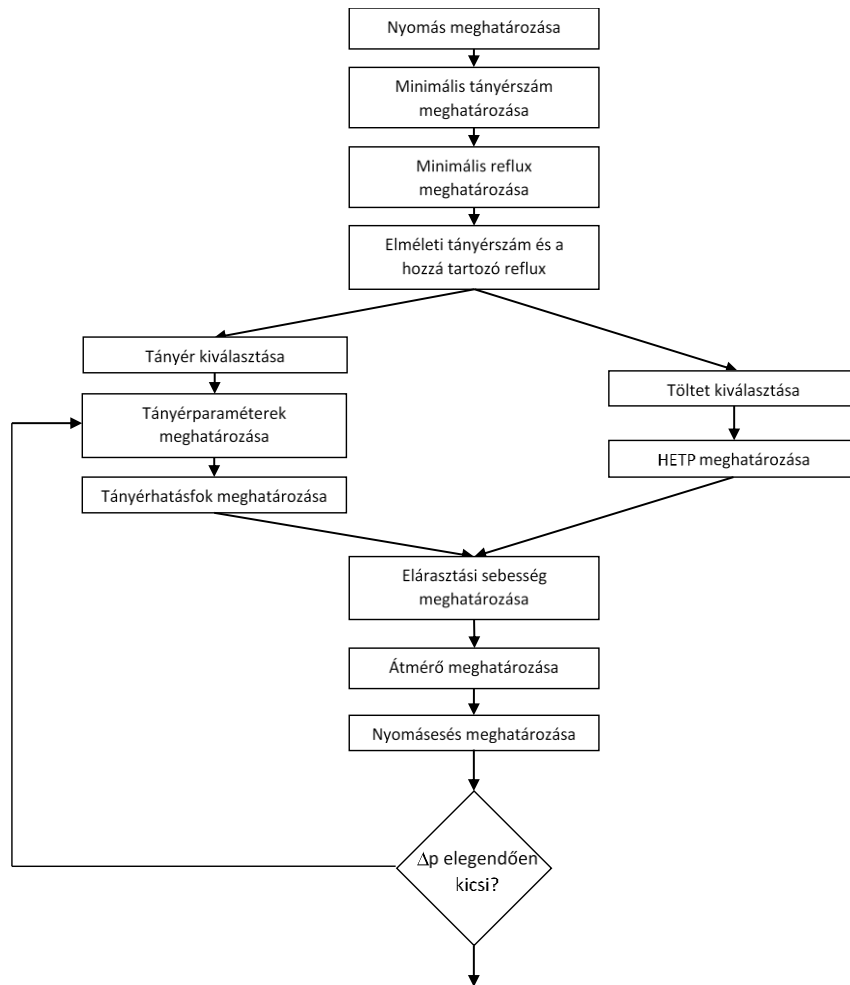
A szélsőérték és az evolúciós stratégián alapuló módszereknek nagy számítási igényük van, emiatt speciális matematikai és számítástechnikai tudást igényelnek. Előbbi módszer egy célfüggvény mentén haladva a paraméterek változtatásával határozza meg az optimális megoldást, utóbbi pedig egy kezdőlépésként megadott szétválasztó rendszert fejleszt tovább. Az energetikai módszer a már meghatározott struktúrák fejlesztésére alkalmazható, mely vizsgálja egy desztilláló oszlop exergiavesztését és kompozit görbéjét. A gyakorlatban az optimális szétválasztási sorrendet (vagy legalább a legígéretesebb sorrendet) heurisztikus módszerekkel jelölik ki. Ezek a szabályok azonban gyakran ellentmondásokat és átfedéseket tartalmaznak. A heurisztikus szabályok:

1. Egyenes sorrend a preferált közel ekvimoláris elegyösszetétel és páronként közel azonos illékonyság esetén.

2. Szomszédos páronként közel azonos relatív illékonyságok esetén a nagyobb koncentrációjú komponenszt érdemes először elválasztani a többtől
3. A költséges és valamilyen szempontból nehéz (pl. azeotróp elegy, relatív illékonyságok közel vannak 1-hez) vágásokat célszerű a szétválasztási sor végére hagyni
4. Kedvező, amikor egy-egy vágásnál a desztillátum és a maradék mólárama megegyezik.

6.3. *Rektifikáló kolonna tervezése, méretezése*

Egy üzemben a desztilláló kolonna a többi berendezéssel együtt, azokkal szoros kölcsönhatásban működik, így a tervezési kapacitásának meghatározásához figyelembe kell venni a teljes termelést, az abban várható ingadozásokat és a többi készülék teljesítményét. Célszerű a kolonnát a névleges üzemi kapacitáshoz képest 20-25%-al túltervezni, mivel így elkerülhető, hogy az üzem korlátozó tényezője a kolonna legyen. Nagyobb túlméretezés esetén a kolonna alulterhelése miatt a kívánt szétválasztás nem valósul meg, valamint a beruházási költség is jelentősen megemelkedik. Adott feladat ellátására a különböző kolonnákat gazdaságosság alapján szokták összehasonlítani, melyhez figyelembe kell venni a beruházási, üzemeltetési és karbantartási költségeket is. Egy rektifikáló kolonna tervezésének egyszerűsített vázlatát mutatja a 6.1. ábra.



6.1. ábra: Kolonna méretezésének egyszerűsített ábrája

6.4. Paraméterek hatása a desztillációra

6.4.1. NYOMÁS

Általánosan elmondható, hogy a legjobb atmoszférikus nyomáson működtetni a rektifikáló kolonnát, hacsak nincsen egyéb indok ettől eltérő nyomás alkalmazására. Ilyen indok például:

- Hőérzékeny anyagok desztillációja.
- Nyomásra érzékeny azeotrópok elválasztása.
- Hűtőgép alkalmazásának elkerülése nyomás növelésével.
- Nyomás változtatásával (növelés, csökkentés) lehetőség nyílik hő hasznosítására az egész folyamaton belül.
- Magasabb betáplálási nyomással járó költségek meghaladhatják a magas nyomás alkalmazásával szerzett előnyöket.

Nyomás növelés

A nyomás növelésének hatására a relatív illékonyság csökken, ezáltal az elválasztás nehezedik, ami nagyobb tányérszámhoz, és oszlopmagassághoz vezet. Továbbá a nagy nyomás a készülék falvastagságának növekedését is eredményezi, ami mind

hozzájárul a magasabb beruházási költséghez. Magas nyomás mellett drágább fűtőközeg alkalmazására is szükség lehet a forráspont növekedés miatt. Ezek mellett azonban a nyomás megnövelésekor a gőz sűrűsége nagyobb, így ugyanakkora refluxarány kisebb térfogatáramú gőzt, és így kisebb oszlopátmérőt eredményez. Ez viszont csökkentheti a beruházási költséget.

Nyomás csökkentés

Alacsonyabb nyomás könnyebb elválaszthatóságot, egyszerűbb mechanikai szerkezetet és olcsóbb fűtőközeget eredményez. Egyes esetekben azonban a kondenzáció alacsony hőmérséklete igényelhet speciális hűtőközeget, ami igen drága lehet. Lehetőség szerint hőérzékeny anyagokat vákuum desztillációval válasszunk el. Ennek oka, hogy nagyobb nyomáson az elegyek forráspontja magasabb, ami hődegradációhoz vezethet.

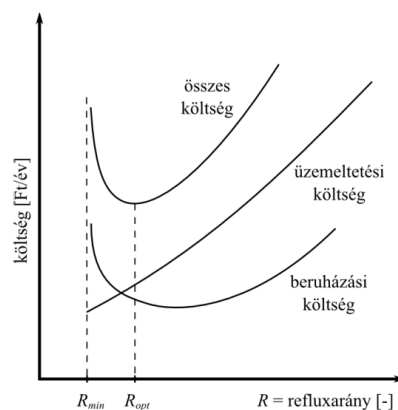
6.4.2. REFLUXARÁNY

A refluxarány (R) a kolonnába visszavezetett folyadék (L) és az elvett desztillátum (D) mennyiségének hányadosa:

$$R = L/D$$

Nagyobb refluxarány könnyebb elválasztást tesz lehetővé, így az oszlop szükséges magassága kisebb lehet. A keletkező gőzarány azonban nagyobb térfogatú, így adott gőzsebességhez nagyobb oszlopátmérő szükséges. A kondenzálandó és visszaforrallandó mennyiségek is nagyobbak, így nagyobb mennyiségű fűtő- és hűtőközeg, és nagyobb méretű kondenzátort, illetve visszaforrallót kell tervezni, mely a beruházási költséget megemeli.

Nagy beruházások esetén a refluxarányt gazdaságossági megfontolások és optimalizálás alapján határozzák meg. A gazdaságilag optimális refluxarány meghatározásához szükség van a beruházási és működési költségek számítására, melynek összege adja az összes költséget. Az összes költség függvény minimuma mutatja meg az optimális refluxarányt (6.2. ábra), melyből az optimális kolonna méretei számolhatóak.



6.2. ábra: Optimális refluxarány meghatározása

Mivel az így meghatározott optimális refluxarány gazdasági optimum, ezért az árak struktúrájától, jelentősen függ. Azoknál a beruházásoknál, ahol nem a rektifikálás a költség meghatározó (pl. gyógyszergyártásnál) általános szabályként elmondható:

$$R = (1,2 \dots 2) \cdot R_{min}$$

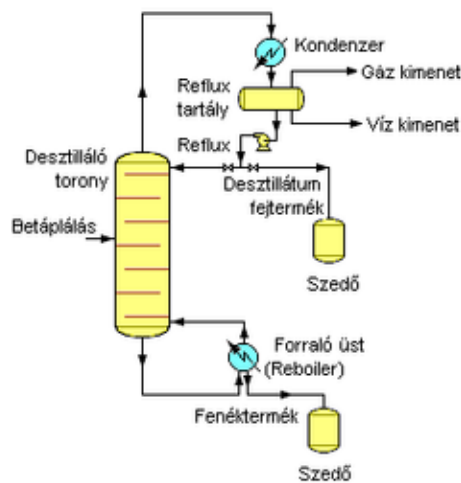
Amennyiben desztilláció esetén energiaintegrációt is alkalmazunk azáltal, hogy a magasabb hőtartalmú termékekkel előmelegítjük a betáplált elegyet pl. olajiparban AV üzem esetén, akkor az alkalmazott refluxarány az általánostól eltérő lehet.

6.4.3. BETÁPLÁLÁS HŐÁLLAPOTA

A betáplált elegy hőállapota nagymértékben befolyásolja a kolonna működését. Forrpontinál jelentősen alacsonyabb hőmérsékletű folyadék bevezetése visszakondenzálja az oszlopban felszálló gőzt. Túlságosan magas hőmérsékletű betáplálás pedig nagy mennyiségű folyadékot párologtathat el a betáplálási tányér felett, ezzel feleslegesen növelve a kondenzátorban visszahűtendő pára mennyiséget. A tervezéskor egy kolonna szimulációjának végén érdemes az utolsó lépésként pontosan beállítani a betáplálás hőmérsékletét oly módon, hogy a kívülről bevitt / elvont hőmennyiség a legkisebb legyen. Fűtőközeg-felhasználás takarítható meg a visszaforralóban, ha a termék áramokkal előmelegítjük a betáplált elegyet legalább egyensúlyi folyadék állapotig.

6.5. Rektifikálás berendezései

Az elválasztás a desztilláló oszlopban (kolonnában) valósul meg. A kolonna vázát a köpeny adja, míg belseje lehet tányéros vagy töltetes kialakítású. A kolonnák kiszolgáló berendezései a hőcserélők, melyek közül kiemelendő a visszaforraló (üst, reboiler) és a kondenzátor. Egyes desztillációs esetekben ezek különleges megoldásúak lehetnek, vagy akár valamelyikük hiányozhat. Egy általános felépítésű rektifikáló berendezéshez (6.3. ábra) hozzátartozik még a refluxtartály, szükség esetén a refluxszivattyú és a szedőedények.



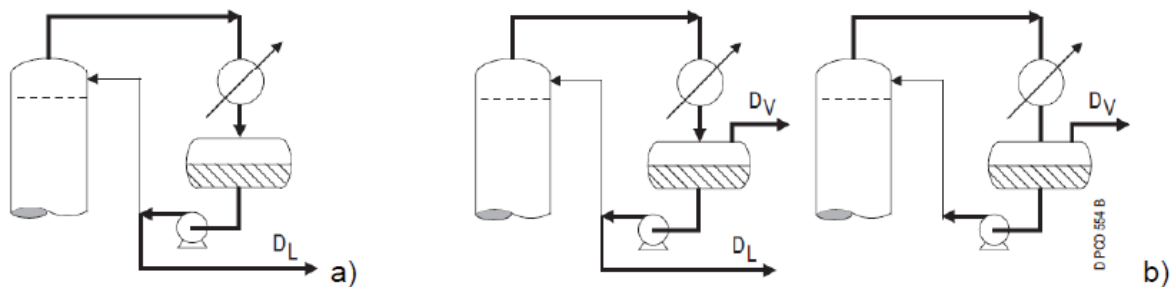
6.3. ábra: Rektifikálás berendezései

6.5.1. KONDEZÁTOROK

A kondenzátorban a kolonnából távozó párat kondenzáltatják, melynek egy részét visszavezetik az oszlopba refluxként. A kolonna fején távozó gőzök kondenzálási hőmérsékletét és ezzel együtt a rektifikáló oszlop nyomását is a kondenzátorban rendelkezésre álló hűtőközeg hőmérséklete szabja meg. Az oszlop nyomását mindig a legrosszabb esetre kell tervezni, amikor a legmagasabb a hűtőközeg hőmérséklete. A kondenzátoroknak két típusa ismert:

- **Teljes (total) kondenzátor** (6.4.a ábra): A pára teljes mennyisége kondenzáltatásra kerül.
- **Részleges (partial) kondenzátor** (6.4.b ábra): A pára egy része kondenzál csak, a desztillátum folyadékként vagy gőzként is elvehető.

Részleges kondenzációt érdemes alkalmazni, mikor a desztillátum további felhasználása gőzfázisban valósul meg, vagy az alacsony forráspontú desztillátum miatt a teljes pára lekondenzáltatásához nagy felületű hőcserélőre lenne szükség. A parciális és totálkondenzátor összehasonlítását az 6.1. táblázat mutatja.



6.4. ábra: a) Teljes kondenzáció b) Részleges kondenzáció pára és folyadék elvétellel valamint csak pára elvétellel

Az iparban általánosan felületi kondenzátort alkalmaznak, mely lehet csőköteges/lemezes hőcserélő vagy léghűtő. Leggyakrabban vízszintes elhelyezkedésű, vízhűtéses csőköteges hőcserélőt alkalmaznak, melyekben csőoldalon áramlik a hűtőközeg, köpenyoldalon pedig a fázisváltás valósul meg. A kondenzátorból a kondenzátumot általában forrásponti folyadékként veszik el, melynek egy részét visszavezetik refluxként a kolonnába. Amennyiben szükséges másik részét (desztillátumot) pedig utóhűtővel lehűtik. A reflux visszavezetése megvalósítható gravitációs úton, ekkor a refluxtartályt az üzem egy magas pontjára kell elhelyezni, vagy alkalmazhatnak refluxszivattyút is. Utóbbi esetben a könnyebb karbantartás, hozzáférhetőség végett a refluxtartályt az üzem alapszintjén helyezik el. Amennyiben az elvett kondenzátumot forráspontja alá hűtik, és úgy vezetik vissza refluxként „hideg reflux” alakul ki, ekkor a tervezés során számolni kell a belső refluxarány megnövekedésével. A növekedés oka, hogy több pára kondenzál a kolonnában és így a lefele csurgó folyadék mennyisége megnő. Nagyon illékony komponenseket tartalmazó elegy desztillációja esetén víztől eltérő hűtőfolyadékot kell alkalmazni pl. etilén, propilén, melyek meglehetősen drágák. Ekkor előnyös lehet a kolonna nyomásának megemlése, mely megnöveli a kondenzáció hőmérsékletét és

így akár a vízűtés is megvalósítható. Amikor a kondenzálódó közeg keveredhet a hűtőközeggel (pl. a vizes oldatok besűrítésénél, ahol víz a desztillátum), akkor a szerkezetileg sokkal egyszerűbb, olcsóbb keverő kondenzátorok alkalmazhatóak.

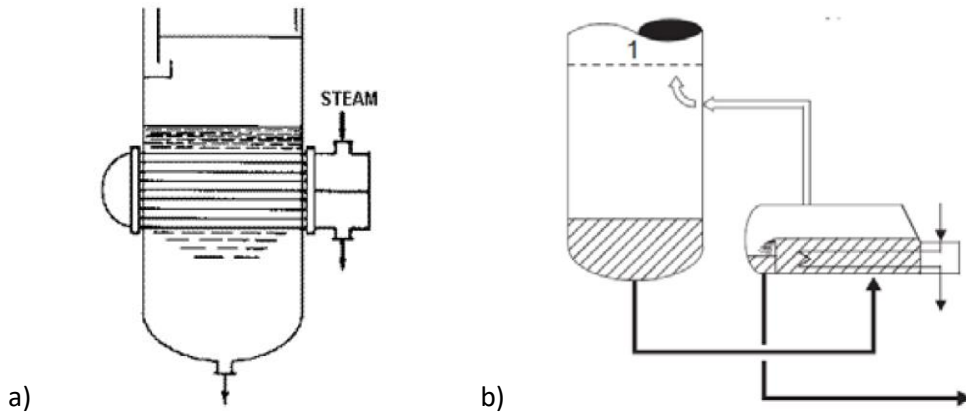
Változó	Kondenzátor típusa	
	Parciális	Totál
Fejtermék	gőz	folyadék
Nyomás	kisebb	nagyobb
Hűtővíz hőmérséklete	azonos	azonos
Tányérszám	kisebb	nagyobb
Kolonna falvastagsága	kisebb	nagyobb
Kapacitás a gőzsebesség alapján	kisebb	nagyobb

6.1. táblázat: Parciális és totálkondenzátor összehasonlítása

6.5.2. VISSZAFORRALÓK

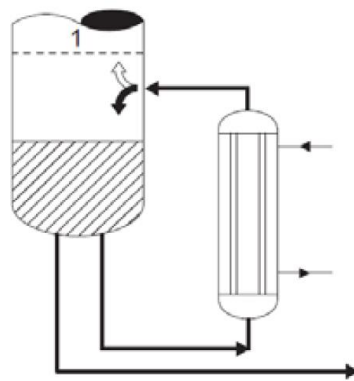
A visszaforralók (reboilerek) hő közlésére alkalmas berendezések, melyek biztosítják a fenéktermékből az illékonyabb komponensek elpárologtatáshoz szükséges hőmennyiséget. Gondos megválasztásuk, üzemeltetésük és karbantartásuk fontos, mivel egy rosszul kiválasztott és működtetett reboiler a kolonna elárasztásához vezethet. Elárasztás (flooding) az a folyamat, amikor a kolonna folyadékterhelése megnő, ezáltal a tányéron a habmagasság, a folyadék feltorlódik, és így a hab elérheti a felette levő tányért. Legrosszabb esetben a visszatartott folyadék fokozatosan feltölti az egész oszlopot, amely így működésképtelen lesz. A visszaforralók is leggyakrabban felületi hőcserélők. Speciális esetben pl. vizes közeg desztillációjakor alkalmazható közvetlen gőzbefúvatásos direkt hőcserélő is. A reboilereket általánosan vízgőzzel fűtik, néha olajjal vagy egyéb fluidummal. Reboilereknek számos típusa ismert, melyek közül egyesek az oszlopba vannak építve:

- **Üst kiforraló:** Legegyszerűbb és legritkábban alkalmazott visszaforraló a köpenyen keresztül fűthető üst, melynek a hőátadó felülete és a gőztermelő kapacitása korlátozott. Kis üzemeknél az oszlop ráépíthető az üstre, ezzel megtakarítva helyet, valamint csővezetékek építését a kolonna és az üst között.
- **Kettle típusú reboiler** (6.5. b ábra): Nagyobb fajlagos felület érhető el csőköteges hőcserélőben, mely az oszlopa be is építhető. A **belső visszaforraló** (6.5. a ábra) nagy hátránya, hogy dugulás, lyukadás esetén csak a torony megbontásával lehet javítani. Az U-csöves **Kettle típusú reboilerben** a kolonna fenékterméke részlegesen elpárolog, a gőz(gáz)-folyadék szeparáció miatt egy elméleti fokozatnak minősül.



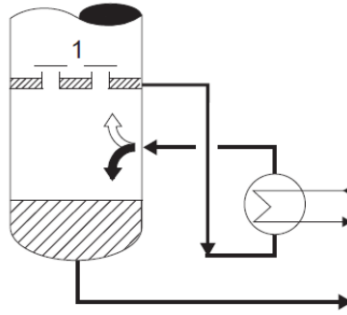
6.5. ábra: a) Belső visszaforráló; b) Kettle típusú reboiler

- **Termoszifon reboiler:** Termoszifon reboiler esetén a desztilláló oszlop aljából természetes cirkulációval jut a folyadék a visszaforralóba, ahol részlegesen elpárolog. A termoszfion reboilernek általában csőköteges kialakításúak, ahol a fűtendő közeg a csőoldalon áramlik. A működése a kolonna-fenéken lévő folyadék és a visszaforralóban lévő vegyes fázis sűrűségkülönbségén alapul. A termoszfion visszaforralók lehetnek vertikális (6.6. ábra) és horizontális elrendezésűek is. Vertikális elrendezés esetén a termoszfiont úgy kell tervezni, hogy a cirkuláló vegyes fázis térfogat százalékosan kifejezve 75-95% gőzt tartalmazzon. A hőátadás akkor maximális, ha a folyadékszint a cső aljától nézve, annak kb. 1/3-ig ér.



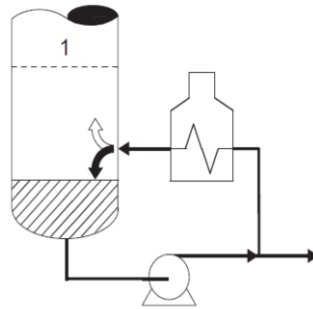
6.6. ábra: Vertikális termoszfion reboiler

Termoszifon reboilernek egy változata az egyszeres átfutású termoszfion reboiler (6.7. ábra). Működésében az eltérés a hagyományos reboilerhez képest, hogy az alsó tányérról elvett folyadék teljes mennyisége átfolyik a reboileren és a kolonna fenéken összegyűlő folyadék nem jut vissza a visszaforralóba. A kolonna fenékterméke a reboiler visszatérő áramának folyadék része. Az egyszeres átfutású reboiler akkor működik jól, ha a kilépő hőmérséklete és a torony fenékhőmérséklete azonos.



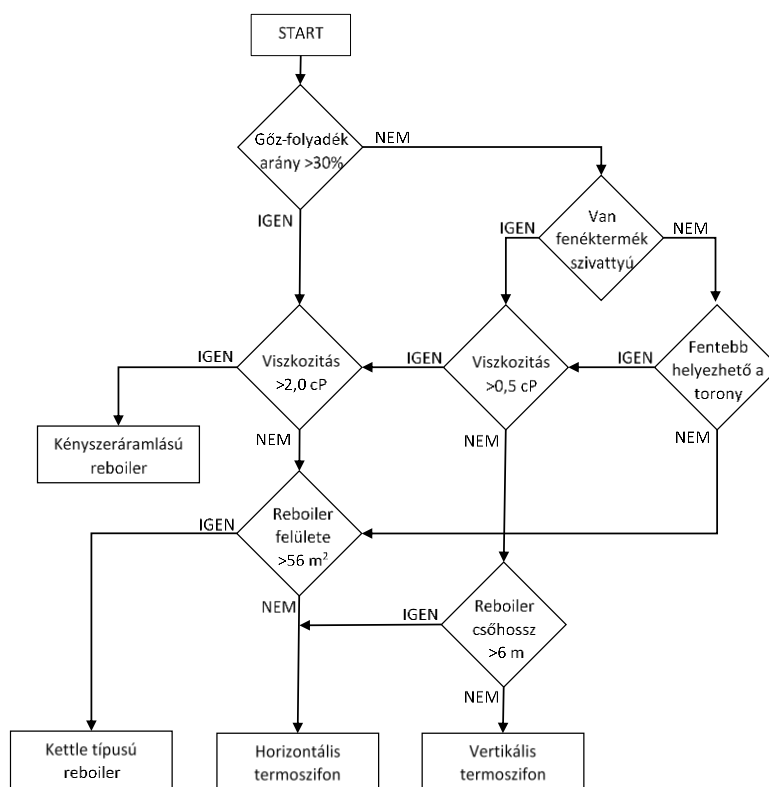
6.7. ábra: Egyszeres átfutású termoszfion reboiler

- **Kényszeráramlású reboiler** (6.8. ábra): A kényszeráramlásos reboilerek abban különböznek a termoszfionoktól, hogy a cirkuláció elősegítésére szivattyút alkalmaznak. Kényszeráramlást legtöbbször olyan esetekben alkalmaznak, ha a reboiler csőkemence, valamint a reboiler hője több technológiai áram felesleges hőjének visszanyeréséből származik. Utóbbi esetben több, nagy nyomáseséssel bíró hőcserélőre van szükség. Nagy előnye ennek a rendszernek, hogy nincs szükség a reboiler és a hozzá tartozó vezeték kritikus nyomásesésének rendkívül pontos tervezésére.



6.8. ábra: Kényszeráramlású reboiler

A visszaforráló típusának kiválasztásához a 6.9. ábra nyújt segítséget:



6.9. ábra: Visszaforralók kiválasztása

6.6. Oszlopbelső típusai, osztályozása

A desztillációs oszlop, kolonna belső szerkezetének megválasztása fontos lépés a tervezés során, mivel ez segíti az anyagátadás létrejöttét. Elsődleges szerepe a gőz(gáz-) és folyadék áramok érintkeztetéséhez szükséges felület biztosítása. Minél nagyobb ez a felület, tehát minél intenzívebb fázisérítkeztetést tesz lehetővé a belső szerkezet, annál jobb lesz az anyagátadás. A kolonnában kialakuló áramlási viszonyok is a szerkezet kialakításától függenek, ezért a készülék átmérőjének és belső szerkezetének méretezése és ellenőrzése hidraulikai számításokon alapul. A hidraulikai méretezéssel lehet biztosítani a kolonna terhelhetőségét (gőz- és folyadékkapacitást), valamint ellenőrizni lehet, hogy a belső szerkezeti elemek és azok elhelyezkedése alkalmas-e az adott szétválasztás megvalósítására.

Az oszlopbelső kiválasztásának szempontjai:

- A gáz- és folyadékfázis érintkezési felületének maximalizálása.
- Az érintkezési felületet egyenletes elosztása az oszlop teljes keresztmetszetében.
- Az egységnyi oszloptérfogatra eső kapacitás maximalizálása.
- Nyomásesés minimalizálása.
- Költség minimalizálása.

A gyakorlatban a desztillációs oszlopokat a szerint különböztetik meg, hogy a belső szerkezete **tányérokat** vagy **töltetet** tartalmaz. Előbbi lépcsőzetes, utóbbi többé kevésbé folytonos (differenciális) fázisérintkeztetést hoz létre. A két kolonnabelső-típust ritkán keverik egy kolonnában, de néha, pl. felújítások, reaktív desztillációs eljárások során előfordulhat. Mindkét oszlopbelső-típus tovább csoportosítható.

6.6.1. TÁNYÉROS OSZLOPOK

A tányéros kolonnák esetében a tányérok általában a torony falára erősített tányértartó gyűrűkön helyezkednek el egyenletes távolságra egymástól. A tányérok alá merevítőket, tartókat szoktak elhelyezni a tányér deformálódásának megakadályozására. Az oszlop köpenyét és a tányérokat leggyakrabban fémből készítik, melynek anyagválasztása során figyelembe kell venni az elválasztani kívánt anyag korróziós tényezőit. Egyedi esetekben alkalmazható üveg vagy grafit-szerkezet, vagy műanyaggal, kerámiával bélelt fémszerkezet.

A tányérok kialakítása lehet:

- **túlfolyós (keresztáramú)**
- **túlfolyó nélküli (ellenáramú)**

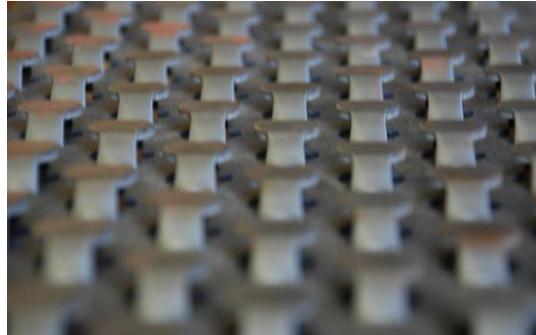
Gyakran ugyanazt a tányértípust mindkét kialakítással alkalmazzák. A tányéroknak több típusa ismert:

- **Szitatányér** (6.10. ábra): Egyszerű kiképzésű, perforált tányérok. A felfelé szálló gáz a lyukakon keresztül buborékol át a tányéron lévő folyadékot. A gáz sebessége megakadályozza a folyadékot abban, hogy a lyukakon keresztül csorogjon le. Ha a gázsebesség kicsi, a folyadék leszivároghat a lyukakon, ezáltal rontva a hatásfokot.



6.10. ábra: Szitatányér

- **Rögzített-szelepes tányér** (6.11. ábra): A perforációk kis, rögzített sapkával vannak ellátva. Működése a szitatányéréhoz hasonló.



6.11. ábra: Szelepes tányér

- **Mozgószelepes tányér** (6.12. ábra): A perforációk kis mozgatható sapkával vannak ellátva, amelyek nyitnak, ha a gőzsebesség megnő. Egyébként zárva maradnak. Ennek a megoldásnak előnye, hogy egészen kicsi kihasználtsággal is hatékonyan tud működni az oszlop. Azonban drágább, mint az előző kettő típusú.



6.12. ábra: Mozgószelepes tányér

- **Buboréksapkás tányér** (6.13. ábra): A perforáción átáramló gőz kis, kéményszerű csövön áramlik felfelé. A kéményszerű csövet harang formájú sapka veszi körbe, melyet a gőznek telítenie kell, mielőtt a harang alsó pereme alatt átbukna. Kialakítása miatt igen drága, előnye azonban, hogy nagyon alacsony gőz- és folyadékáramok mellett is hatékony.



6.13. ábra: Buboréksapkás tányér

Egy tányéros oszlopot úgy kell megtervezni, hogy a folyadék csak a lefolyón keresztül távozzon lefelé (ne szivárognon keresztül a lyukakon, és ne ragadja magával a gőz felfelé), valamint a gőz csak a lyukakon áramoljon felfelé (ne buborékoljon keresztül a lefolyón, és ne ragadja magával a folyadék lefelé). Tányéros kolonnabelső esetén az oszlop átmérőjén és magasságán kívül a következő faktorok befolyásolják az oszlop várható működését:

- Átömlések száma
- Tányértávolság

- Túlfolyómagasság
- Lefolyócső
- Hézag a lefolyócső alatt
- Lyukméretek
- Lyuk-területarány

Egy tányér kiválasztásánál fontos szempont annak hatásfoka, a nyomásesése, az ár, az egyszerű konstrukció, könnyű szerelhetőség, tisztíthatóság és karbantartás. Egy tányér rugalmasságát, szétválasztó képességét a maximális és minimális gőzsebesség hányadával „turn-down ratio” lehet jellemezni. Egy kolonna gőzterhelését az összehasonlíthatóság kedvéért az F-faktorral jellemzik, mely az üres oszlopra vonatkoztatott gőzsebesség és a gőzsűrűség gyökének szorzata. Fontos az elválasztandó elegy tulajdonsága, illetve a tányérok folyadék visszatartása (hold-up) is, mely befolyásolja vészhelyzet esetén a kolonna leürítésének sebességét, valamint hődegradációra képes anyagok esetén a tartózkodási időt. Az egyes tányértípusok jellemzőit az alábbi 6.2. táblázat tartalmazza.

	Szitatányér	Rögzített-szelepes	Mozgószelepes	Buboréksapkás
Kapacitás	magas	magas	magas, nagyon magas	mérsékelt
Hatásfok	magas	magas	magas	mérsékelt
Kihordás	mérsékelt	mérsékelt	mérsékelt	kicsit magasabb
Nyomásesés	mérsékelt	mérsékelt	kicsit magasabb	kicsit magasabb
Költség	alacsony	alacsony	kicsit magasabb	magas
Karbantartási igény	alacsony	alacsony	mérsékelt	viszonylag magas
Elszennyeződési hajlam	alacsony	alacsony	mérsékelt	mérsékelt
Korrózió	alacsony	nagyon alacsony	mérsékelt	mérsékelt
Alkalmazási terület	Mindig, ha a turn-down nem fontos Magas elszennyeződési és korróziós veszély esetén	Mindig, ha a turn-down nem fontos Magas elszennyeződési és korróziós veszély esetén	Mindig, ha a turn-down fontos	Alacsony gáz- és folyadékáramok esetén

6.2. táblázat: Tányértípusok jellemzői

Tányér használatának előnyei

- *Kicsi az érzékenysége a szilárd szemcsékre:* Tányéros oszlopokban mintegy egy nagyságrenddel nagyobb lehet, mind a gáz-, mind a folyadéksebesség a tölteteshöz képest. Ez lemossa a szilárd szennyeződést a tányérok felületéről, míg a töltetek folyadék által nem súrolt felületein könnyen összegyűlhet a szennyeződés. Mozgószelepes tányérok azonban kevésbé ellenállóak a szennyeződéseknek; beleragadhatnak a kisméretű lyukakba.

- *Jól tűri az alacsony folyadékterhelést:* Töltetes oszlopokban gyakoribb probléma az egyenlőtlen folyadék eloszlás; különösen nagyobb átmérőjű oszlopokban, kisebb folyadékterhelés mellett, rendezett töltet esetén jelentkezik gyakrabban ez a probléma. Tányérok könnyebb úgy megtervezni, hogy a folyadékterhelés a teljes keresztmetszetben egyenletes legyen.
- *Összetett desztillációs oszlopok alkalmazásakor előnyös:* Köztes visszaforralók, köztes kondenzátorok, hűtőkígyók és oldalelvételek könnyebben kivitelezhetők tányéros, mint töltetes oszlopokban.
- *Változó nyersanyag-összetétel esetén alkalmazható:* Változó összetételű nyersanyagot az oszlop különböző pontjain kell bevezetni. Töltetes oszlopok esetén ez minden bevezetési ponton újabb folyadék elosztó elhelyezésével járna, aminek komoly költségvonzata van.
- *Reaktív desztilláció megvalósításakor előnyös:* A nagyobb folyadék hold-up-ból származó nagyobb tartózkodási idő sokkal alkalmasabbá teszi a tányéros oszlopokat kémiai reakciókkal együtt járó elválasztási műveletekre, mint a töltetes oszlopokat. Meg kell jegyezni azonban, hogy léteznek speciális, reaktív desztillációs alkalmazásokhoz kifejlesztett töltetek is.
- *Jól tűri az alacsony kapacitás-kihasználtságot:* Mozgó szelepes és buboréksapkás tányérok, köszönhetően speciális kialakításuknak, sokkal jobban alkalmazhatóak olyan esetben, amikor a tervezési kapacitáshoz képest sokkal alacsonyabb betáplálási áram mellett használjuk az oszlopot. Töltetes oszlopok kevésbé hatékonyak ilyen körülmények között.
- *Kisebb a készülék súlya:* A tányéros oszlopok általában kisebb súlyúak, így jellemzően kisebb beruházási költség-vonzatuk van, mint a töltetes oszlopoknak.
- *Jobban modellezhető, egyszerűbben határozható meg a hatékonysága:* Töltetes oszlopok hajlamosak az egyenetlen folyadék eloszlásból fakadó hatásfokcsökkenésre, ennek köszönhetően a töltetes oszlop kisebb biztonsággal modellezhető.

6.6.2. TÖLTETES OSZLOPOK

A töltött oszlopok elsődleges előnye a tányérosakkal szemben, hogy nagyobb fázisérintkeztetési felületet biztosítanak az elválasztáshoz. A jó működés alapvető feltétele, hogy a folyadék minden keresztmetszetben egyenletesen legyen elosztva. Emiatt fontos a helyes betáplálás, valamint a folyadék elosztók (pl. elosztórózsza, elosztó tányér) és folyadékterelő rendszerek megválasztása. A töltetek lehetnek inertek, ekkor csak a fázisérintkeztetésben vesznek részt, valamint katalizátorok reaktív desztilláció esetén. A kolonnákat két fő csoportba lehet osztani: **rendezetlen (random)** és **rendezett (strukturált)** töltetes oszlopokra. Típustól függetlenül a töltetek készülhetnek üvegből, agyagból, porcelánból, műanyagból, fémből (pl. acél, saválló, réz). A töltet anyagának kiválasztásához nyújt segítséget a 6.3. táblázat.

Töltet anyaga	Tulajdonságok és alkalmazhatóság
Fém	<ul style="list-style-type: none"> – nagyobb kapacitás és hatásfok biztosítása – széles geometriai skálán elérhető – nyomásálló – ára speciális igények esetén nagymértékben növekedhet (pl. rozsdamentes acél 3-5x ár) – nem korrozív közeg esetén alkalmazható
Kerámia	<ul style="list-style-type: none"> – mechanikailag nem stabil – kis kapacitás – főként magas hőmérsékleten és reaktív közeg esetén alkalmazzák
Műanyag	<ul style="list-style-type: none"> – alacsony ár – oxidáló környezetben degradálódik – rosszul nedvesíthet – alkalmazása függ a hőmérséklettől, alacsony hőmérsékleten rideggé válik, magas hőmérsékleten degradálódhat pl. polipropilén 120 °C-ig alkalmazható

6.3. táblázat: Töltet anyagok tulajdonságai és alkalmazhatóságuk

Rendezetlen (random) töltet

A rendezetlen töltet (6.14. ábra) ömlesztve helyezkedik el a kolonnában töltettartó rácsok között. Sokféle típusa ismert, mely meghatározott mérettel és alakkal bír. Általános csoportosításuk szerint lehetnek gyűrűk, nyergek és egyéb alakúak. A töltet kiválasztásakor figyelembe kell venni az elválasztani kívánt elegy tulajdonságait, valamint a rendezetlen töltetre jellemző fajlagos tömeget, darabszámot, geometriai fajlagos felületet és a relatív hézagterefogatot. Utóbbi két paraméter meghatározza a töltet nyomásesését.



6.14. ábra: Rendezetlen töltetek

Rendezett (strukturált) töltet

Rendezett töltet (6.15. ábra) lehet ismétlődő mintázattal bíró hullámosított szitaszövet, lemez, drótháló, vagy műanyag, melyeket úgy helyeznek egymásra, hogy az élek keresztezzék egymást és megfelelő paraméterekkel rendelkező járatok alakuljanak ki közöttük. Az egymást keresztező lemezekből egységcsomagokat készítenek. Kis

keresztmetszetű oszlopoknál az oszlopátmérővel megegyező méretű hengeres tárcsát alkotnak, nagyobb átmérőjű oszlopoknál azonban szelvényekben építhető be a kolonnába.



6.15. ábra: Rendezetlen töltetek

Töltetes oszlopok méretezésénél két ellentmondó szempontot kell összeegyeztetni: az érintkezési felületet és a kapacitást egyszerre kell maximalizálni. Mivel a gáz- és folyadékfázis érintkezése a töltet felületén valósul meg, a fázisérintkezési felület növelését a töltet fajlagos felületének növelésével lehet elősegíteni. Kisebb rendezetlen töltet darabok, vagy kisebb rések a rendezett töltetlemezek között nagyobb fajlagos nedvesített felületet eredményeznek – így ugyanolyan magasságú töltet ugyanakkora átmérőjű oszlopban nagyobb HETP (Height Equivalent to a Theoretical Plate, egy elméleti tányérral egyenértékű töltetmagasság) értéket fog eredményezni. Ugyanakkor kisebb rendezetlen töltet darabok, vagy kisebb rések a rendezett töltetlemezek között a gázáram ellenállásának növekedését eredményezik, ezáltal a kapacitás csökken. A két szempont között kompromisszumot lehet találni.

Töltet előnyei

- *Rugalmas működés:* A töltetes kolonnák terhelése széles tartományban változtatható és így többféle termék elválasztására is alkalmasak lehetnek.
- *Kis nyomásesés és jó terhelhetőség:* A töltet által szabadon hagyott keresztmetszet sokkal nagyobb, mint a tányér által szabadon hagyott keresztmetszet, így a nyomásesés töltetek esetében sokkal kisebb. Töltetes oszlopok esetében nincs jelen a tányérokra összegyűlő folyadékoszlopból eredő hidrosztatikai nyomás sem. Vákuumrendszerek esetében ez kisebb fenéknymást jelent, ami alacsonyabb hőmérsékletet is jelent, és így kisebb a hődegradáció valószínűsége. A kisebb nyomásesés kisebb kompresszor- vagy ventilátor költséggel jár.

Desztilláló oszlop felújítása esetében, ha a tányérokot töltetre cseréljük, a csökkenő nyomásesés megnövelt kapacitást, javuló elválasztást vagy energianyereséget eredményez. A rendezett töltet szintén alkalmas eszköz a kapacitás és az elválasztás között fennálló trade-off kihasználására. Magasabb töltetrész nagyobb kapacitással jár. Az oszlop nagyobb folyadékterheléssel bíró szakaszaiban magasabb töltetrészt alkalmazva; míg a kisebb

folyadékterheléssel bíró szakaszaiban alacsonyabb töltetrészt alkalmazva az elválasztás minősége javítható. Így a kapacitás és elválasztás mértéke együttesen maximalizálható. Tányérok esetében ez a tányértávolság változtatásával oldható meg, ami nehezkesebb.

- *Habzásra hajlamos elegy desztillációjakor alkalmazható:* Töltetek esetében a kisebb gáz- és folyadéksebesség kisebb habzásveszéllyel jár.
- *Kis átmérőjű oszlopoknál előnyös:* Kis átmérőjű tányéros oszlopok feleslegesen drágák – vagy túl kell őket méretezni nagyobb átmérőre.
- *Korrozív elegy esetén:* A kerámia anyagú töltetek nem korrodálódnak. Tányérok is kialakíthatóak nemfém-anyagú vagy korrózióálló kivitelben, de ezek drágábbak.
- *Kisebb mennyiségű folyadék hold-up:* Töltetes oszlopok kisebb mennyiségű folyadékot tartanak vissza, mint a tányéros oszlopok. Ennek főleg termálisan instabil közegek esetén van jelentősége, mert a kisebb hold-up kisebb tartózkodási időt is jelent.

Töltet hátrányai

- *Rosszul tűri az alacsony folyadékterhelést:* Alacsony folyadékterhelés esetén a rendezetlen töltetet rosszul nedvesíti a folyadék, és egyenlőtlen folyadékeloszlás is felléphet, ami rossz hatékonysághoz vezet.
- *Rosszul viseli a betáplálás hirtelen változását:* Rendezetlen töltetek rosszul tűrik a betápláramban hirtelen bekövetkező összetétel- és tömegáram-változásokat.

Rendezett töltet hátrányai

- *Rossz hőelvezetés:* A rendezett fémtöltet vékony anyaga rosszul vezeti el a hőt a forró pontok környékéről. Ez bizonyos esetekben tüzekhez vezethet, mikor az oszlopot kinyitják az atmoszférára. Például hegesztési munkáknál, pirofóros anyagmaradványokat, nagy illékonyságú szerves anyagmaradékot tartalmazó oszlop megbontásakor lehet igen veszélyes.
- *Nehezebb anyagminőség választás:* A rendezett fémtöltet vékony anyagának köszönhetően fokozottan korrózió-érzékeny. Ennek következtében gyakran rozsdamentes acél használata szükséges olyan esetekben is, amikor egyébként egyszerű szénacél is megfelelne. Ez növeli a beruházási költséget.
- *Nehezebben végezhető oszlopfal-vizsgálat:* A rendezett töltet az oszlophoz való szoros illeszkedése miatt könnyen sérül, ezért viszonylag ritkán kerülhet sor oszlopfal-vizsgálatra. Az oszlop falának időközönkénti vizsgálata így nehézségekbe ütközhet.
- *Nehéz öblítés:* Leálláskor az oszlopban maradt folyadék maradéktalan eltávolítása gyakran igen nehézkes rendezett töltet esetén. Az ilyen folyadék nem kielégítő eltávolítása veszélyes lehet.
- *Rosszul tűri a magas folyadékterhelést:* A többjártatú tányérok hatékonyan el tudják osztani a tányéron a magas folyadékterhelést. Ugyanez a rendezett töltetek

esetén nem működik, így magas folyadékterhelés esetén a kapacitástartalék gyorsan csökken.

7. NYOMÁSHATÁROLÁS

A vegyiparban, a kőolaj- és földgáziparban, a gyógyszergyártásban, az élelmiszer- és az energetikai iparban a nyomástartó rendszerek, berendezések túlnyomás elleni védelme biztonsági, gazdasági, környezetvédelmi és technológiai szempontból is rendkívül fontos feladat. Normál körülmények között a technológiai folyamatban az üzemi nyomás nem haladhatja meg a nyomástartó edény engedélyezési nyomásának értékét. Rendellenes folyamat következtében azonban a rendszer nyomása az engedélyezési nyomás fölé emelkedhet, azaz túlnyomás alakulhat ki a rendszerben.

A rendszer túlnyomás határolásának kialakítása egy meglehetősen komplex mérnöki feladat, melynek során a tervező megvizsgálja a túlnyomás kialakulásának lehetséges okait és annak mértékét, majd a nyomáshatárolási filozófia és a rendszer sajátosságainak ismeretében kiválasztja a megfelelő védelmi módot, mellyel elkerülhető, hogy a rendszerben túlnyomás alakuljon ki.

A tervezőnek az alábbi védelmi módok, eszközök állnak rendelkezésére, hogy biztosítsa a túlnyomás kialakulásának elkerülését, csökkentse a kialakulás kockázatát:

- a rendszer tervezési nyomását úgy határozza meg, hogy az felette legyen a rendszerben kialakulni képes maximális nyomásnak, minden lehetséges forrást figyelembe véve.
- megfelelően méretezett nyomáscsökkentő, lefúvató szerelvények tervez be (pl.: biztonsági szelepek, hasadó tárcsák) és vagy műszeres védelmi rétegek kialakítása
- locked-open (nyitott pozícióban lakatolt) szerelvények tervez be, melyek alkalmazásával a kezelő tudomást szerez arról, hogy ha a szelep nyomáshatárolás szempontjából kritikus elem, létfontosságú, hogy nyitott állapotban legyen, ha ezt bezárják, az elfogadhatatlan kockázatokkal, és beláthatatlan következményekkel jár a rendszer túlnyomás védelme szempontjából.

A túlnyomás határolásának vizsgálatához, kialakításához, elengedhetetlenül szükséges az alábbi fogalmak és alapelveinek ismerete:

- Dupla meghibásodás (Double Jeopardy)
A túlnyomást okozó tényezők akkor tekinthetők függetlennek, ha nincs technológiai, mechanikai, villamos/irányítástechnikai kapcsolat köztük, vagy ha elegendően hosszú idő eltelik ezen események lehetséges egymást követő előfordulásai között. Kettő vagy több független esemény (vagy más néven kettős veszély) egyidejű előfordulása nem képezheti a tervezés alapját.
Kettős meghibásodásnak tekinthetők például:
 - o tűzeset és a hőcserélők csőtörésének egyidejű előfordulása

- tűzeset és kezelői mulasztás (pl.: kiszakaszolt készülékek leürítésének, és nyomásmentesítésének elmulasztása) egyidejű előfordulása
 - áramkimaradás és kezelői hiba, (ami pl.: elzáráshoz vezet) egyidejű előfordulása
- Rejtett (látens) hiba

A látens meghibásodásokat általában meglévő állapotnak kell tekinteni, nem pedig a hiba okának, annak vizsgálata során, hogy egy forgatókönyv egyszeri, vagy kettős meghibásodást (veszélyt) jelent-e.

Rejtett hibák előfordulhatnak például a műszerezésben, melyek megakadályozzák, hogy az adott műszer megfelelően működjön egy esetlegesen (független okból) kialakuló túlnyomásos állapotban. Ez nem tekinthető kettős meghibásodásnak, ahogy az sem, ha feltételezzük pl.: egy visszacsapó szelep látens meghibásodását, amely lehetővé teszi a szivattyú meghibásodása esetén a fordított áramlás kialakulását.

- Kezelői hiba / kezelő beavatkozásának hatása

A rendszer túlnyomás határolásának vizsgálata/kialakítása során a kezelői hiba a túlnyomás lehetséges forrásának tekinthető.

Annak meghatározásához/eldöntéséhez, hogy a maximális lefúvatási körülmények meghatározása során figyelembe vehető-e az operátor/kezelő helyes beavatkozásának hatása, mérlegelni kell / meg kell győződni az alábbiak felől:

- van-e független alarm, ami jelzést ad a kezelőnek zavaros működésről
- van-e elegendő ideje a kezelőnek, hogy azonosítsa a problémát, és beavatkozzon
- a kezelő megfelelően képzett, és jogosult a beavatkozásra
- a kezelői beavatkozás elmulasztásának következménye ismert és köztudott
- az alarm meghibásodásának, és a kezelői beavatkozás elmulasztásának lehetősége figyelembe van véve a veszélyek elemzése során.

Amennyiben a fenti tényezők nem teljesíthetők maradéktalanul, nem javasolt figyelembe venni a kezelői beavatkozást, mint maximális lefúvatási körülmény kialakulását korlátozó tényezőt. Ennek eldöntése minden esetben a tervező kizárólagos/egyedi felelőssége.

Általában elfogadott és alkalmazható kezelői válaszidő 10 – 30 perc az üzem komplexitásától, és a technológiai rendszer dinamikájától függően.

A rendszer vizsgálata során mindig a jó mérnöki szemléletet kell előtérbe helyezni, nem pedig vakon ragaszkodni az itt leírt irányelvekhez.

A kapott eredménynek gazdaságilag elfogadhatónak, működőképesnek, és megvalósíthatónak kell lennie, úgy hogy mindezek mellett semmiképpen nem maradhat olyan körülmény, ami veszélyeztetné a személyzetet vagy üzembiztonságot.

7.1. Túlnyomás kialakulásának lehetséges okai

Az egyedi lefúvatási mennyiségek meghatározásához számításba kell venni a túlnyomás kialakulásának lehetséges okait.

Egy esetlegesen kialakuló túlnyomásos állapot során a lefúvatandó mennyiségek alapvetően a nettóenergia-bevitel határozza meg. A két legelterjedtebb energia beviteli mód:

- hőbevitel, melynek során megemelkedik a nyomás a rendszerben a párolgás vagy a folyadékok hőtágulása (termikus expanzió) következtében.
- direkt nyomás növekedés, nagyobb nyomású forrásból

A rendszerben kialakuló túlnyomás származhat csak az egyik, vagy akár mindkét forrásból is.

7.2. Egyedi lefúvatási esetek

Egy rendszer túlnyomás védelmének kialakítása/vizsgálata során a leggyakoribb lefúvatási esetek, melyeket figyelembe kell venni:

- Lezárt kilépő szerelvény (elézárás)
- Segédenergia kimaradás (pl.: hűtővíz, műszerlevegő)
- Segédrendszeri hiba elektromos áram kimaradás
- Nem kondenzálódók felhalmozódása
- Illékony folyadék nem normális megjelenése
- Túltöltés
- Szabályzási hiba
- Figyelmetlen szelep nyitás/zárás
- Reflux kimaradás
- Nemnormális hőbevitel
- Kémiai reakció
- Hidraulikus expanzió
- Nagynyomású gázáttörés

Az 7.1 táblázat némi útmutatást tartalmaz (a teljesség igénye nélkül) arra vonatkozóan, hogy az egyes lefúvatási esetekben, hogyan becsülhető a maximális lefúvatási mennyiség.

Lefúvatási eset	Max lefúvatási mennyiség becslése (folyadék)	Max lefúvatási mennyiség becslése (gáz / gőz)
Lezárt kilépő szerelvény	Max. folyadék mennyiség, amit a szivattyú szállítani képes	A teljes belépő gáz és gőz mennyiség plusz, ami keletkezik a rendszerben a lefúvatási körülményeket (nyomás, hőmérséklet) figyelembe véve.
Segédenergia kimaradás (hűtővíz kimaradás kondenzátorok esetében)	-	A teljes kondenzátorba belépő gőzmennyiség a lefúvatási körülményeket (nyomás, hőmérséklet) figyelembe véve.
Segédrendszeri hiba, áramkimaradás	-	A rendszer villamosenergia ellátásának kialakítását tanulmányozva meghatározható, az áramkimaradás hatása a rendszerre nézve (a rendszer mely elemeit érint), majd a legrosszabb esetet figyelembe véve elvégezhető a méretezés.
Nem kondenzálódók felhalmozódása	-	<u>Oszlopok esetében:</u> A teljes kondenzátorba belépő gőzmennyiség a lefúvatási körülményeket (nyomás, hőmérséklet) figyelembe véve. <u>Más készülékek esetében:</u> A teljes belépő gáz és gőz mennyiség plusz, ami keletkezik a rendszerben a lefúvatási körülményeket (nyomás, hőmérséklet) figyelembe véve.
Illékony folyadék nemnormális megjelenése (pl.: víz forró olajban)	-	Ezen eset elkerülése érdekében alkalmazzunk alternatív védelmi megoldásokat. Csőköteges hőcserélők csőtörése esetén az alábbiak szerint kell eljárni:
Túltöltés	Max. folyadék mennyiség, amit a szivattyú szállítani képes	-
Szabályzási hiba	-	A technológiai rendszer sajátosságait figyelembe véve minden eset egyedileg vizsgálandó.
Figyelmetlen szelep nyitás/zárás	-	

Lefúvatási eset	Max lefúvatási mennyiség becslése (folyadék)	Max lefúvatási mennyiség becslése (gáz / gőz)
Reflux kimaradás	-	A teljes belépő gáz és gőz mennyiség, plusz, ami keletkezik a rendszerben. A lefúvatási körülményeket (nyomás, hőmérséklet) figyelembe véve kevesebb gőz kondenzálódik az oldaltermék refluxok visszavezetésének hatására is.
Nemnormális hőbevitel	-	Túlfűtés esetén becsült maximálisan keletkező gőz mennyiség, figyelembe véve a nemkondenzálódókat is.
Kémiai reakció	-	Becsült keletkező gáz/gőz mennyiség normál és kontrollálatlan körülmények között
Nagynyomású gázátörés	-	A nyomást csökkentő szelep teljes nyitottsághoz tartozó cv értékét és a rendszerek tervezési nyomásának különbségét (hajtóerő) figyelembe véve becsült gázmennyiség.

7.1 táblázat: Útmutató a maximális lefúvatási mennyiségek becsléséhez

7.3. Biztonsági szerelvények

A műszaki gyakorlatban a tervező a rendszerparaméterek ismeretében, művelettani és rendszertechnikai eszközök segítségével határozza meg a nyomástartó rendszer várható zavara esetén lefúvandó tömegáram nagyságát, majd a közeg fizikai-kémiai tulajdonságai (halmazállapot, fázisok száma, hőmérséklet), és a nyomástartó edény terhelhetősége (üzemi, maximális nyomás) alapján kiválasztja a megfelelő méretű és típusú nyomáshatároló eszközt.

A biztonsági szerelvények kiválasztását, méretezését érvényben lévő szabványok és előírások szabályozzák, melyeket a tervezőnek figyelembe kell vennie:

- MSZ EN ISO 4126 Safety devices for protection against excessive pressure
- API 520 Sizing, Selection, and Installation of Pressure-relieving Devices in Refineries
- API 521 Pressure-relieving and Depressuring Systems
- API 526 Flanged Steel Pressure-relief Valves
- AD 2000 Merckblatt

A leggyakrabban alkalmazott biztonsági szerelvényeknek két fő típusát különböztetjük meg.

- Biztonsági tárcsák (hasadótárcsák)
- Biztonsági szelepek

7.3.1. BIZTONSÁGI TÁRCSÁK

A biztonság tárcsákat elsősorban olyan helyeken használják, ahol a biztonsági szelepek a közeg tulajdonsága, vagy más üzemeltetési körülmények miatt nyomáshatárolás céljára nem alkalmasak.

Rendszerint biztonsági tárcsát alkalmazandók, ha

- a közeg felrobbanására lehet számítani;
- a közeg ragacsos, elkérgesedésre, kristályosodásra, polimerizálódásra hajlamos;
- a lefúvandó közeg folyadék, és a kinematikai viszkozitása $3 \cdot 10^{-4}$ m²/s- nél nagyobb;
- a folyadék, ill. gáz halmazállapotú közegben szilárd szemcsék is vannak;
- a berendezés rezgő, mozgó állapotban működik; tökéletesen tömör zárás szükséges;
- az üzemi nyomás igen nagy ($p_{ü} > 760$ bar(g));
- a hosszú tápvezetéken szeleprezgés miatt biztonsági szelep nem használható.
- a lefúvás csak nagyon ritkán fordul elő (pl. különböző nyomású terekkel rendelkező berendezések (hőcserélők) térelválasztó elemeinek lyukadása, stb.)
- a töltet erősen korrozív hatású (ez esetben főleg a grafit törőtárcsa alkalmas).

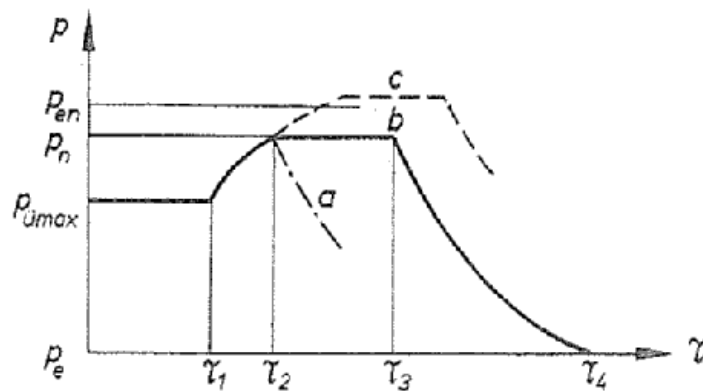
A biztonsági tárcsa használatának az alábbi feltételei vannak:

- a szükséges nyomáson működjön;
- működés után megfelelő fúvóka keresztmetszet váljék szabaddá;
- tartós üzemben legalább kb. 4000-8000 óra legyen az élettartama;
- működésével a védett rendszerre és környezetre nézve veszélyt ne jelentsen.

A biztonsági tárcsák alkalmazásának számos előnye és ugyanakkor hátránya is van, amelyek az alábbiakban olvashatók. Az adott pozícióban való alkalmazhatóságot a tervezőnek minden esetben a lentiek, valamint az adott technológia sajátosságainak figyelembe vételével, mérlegelésével kell meghatározni.

- A biztonsági tárcsák alkalmazásának előnyei:
 - o Szerkezeti kialakításuk egyszerű, mozgó alkatrészeket nem tartalmaznak,
 - o Beszerelésük helyén, a berendezés falára merőleges helyigényük kicsi.
 - o Nagy fúvókaméretük lehet ($3 \text{ mm} \leq d_f \leq 1100 \text{ mm}$).
 - o Különösebb karbantartást nem igényelnek.
 - o Huzamosabb használat után is megfelelően működnek.
 - o Üzembiztosak, a nyitónyomást külső behatással nem lehet növelni; rendellenesség esetén általában előbb nyitnak a kelleténél.
 - o A korróziót kivéve érzéktelenek a töltet tulajdonságaira (nem dugulnak el, nem ragadnak le stb.).
 - o Rezgésnek, mozgásnak kitett berendezéseken is tömören zárnak.
 - o Lassú és gyors nyomásemelkedés (töltetrobbanás) esetén egyaránt hatásosan, tehetetlenség nélkül működnek és igen kedvező, szabad lefúvást tesznek lehetővé.
 - o A védendő berendezés nagymértékű túlmelegedése esetén, nyomásnövekedés nélkül az üzemi nyomáson is nyithatnak, megakadályozva a berendezés teherbírásának csökkenéséből származó robbanását; (a hőmérséklet növekedés ugyanis rendszerint jobban csökkenti a tárcsa szilárdságát, mint a berendezés szilárdságát).
 - o A biztonsági szelepnél olcsóbbak.
 - o Biztonsági szeleppel sorba építve is használhatók.
- A biztonsági tárcsák alkalmazásának hátrányai:
 - o A tárcsák működése után a fúvóka keresztmetszet nyitott marad, így a berendezés nyomása a lefúvóoldali (pl. környezeti atmoszférikus) ellennyomás értékére csökken (7.1. ábra). Ezáltal a berendezés tartalma teljesen vagy részlegesen kiürül, ez pedig termelés kiesést, anyagvesztést és esetleg még a berendezésben veszélyhelyzetet is okozhat. Ezért a tárcsák alkalmazása korlátozott. Piroforos tulajdonságú polimerizátumot vagy tűzveszélyes gázokat (gőzöket) tartalmazó berendezéseknél a tárcsa önállóan nem használható, mert a expandálás

után bekerülő levegő a berendezésben égési (robbanást) okozhat (így pl.: cseppfolyós gáztartályokon önállóan nem alkalmazhatók).



7.1. ábra: A nyomástartó berendezésben fellépő névleges nyomásváltozás lassú, fokozatos nyomásnövekedéskor és a biztonsági tárcsa működésekor

- a) a fúvóka keresztmetszete túlméretezett
- b) a fúvóka keresztmetszete jól méretezett;
- c) a fúvóka keresztmetszete aláméretezett;
- τ_1 a túlnyomás-növekedés kezdete;
- τ_2 , a biztonsági tárcsa nyitása;
- τ_3 a nyomáscsökkenés kezdete;
- τ_4 a lefúvás vége

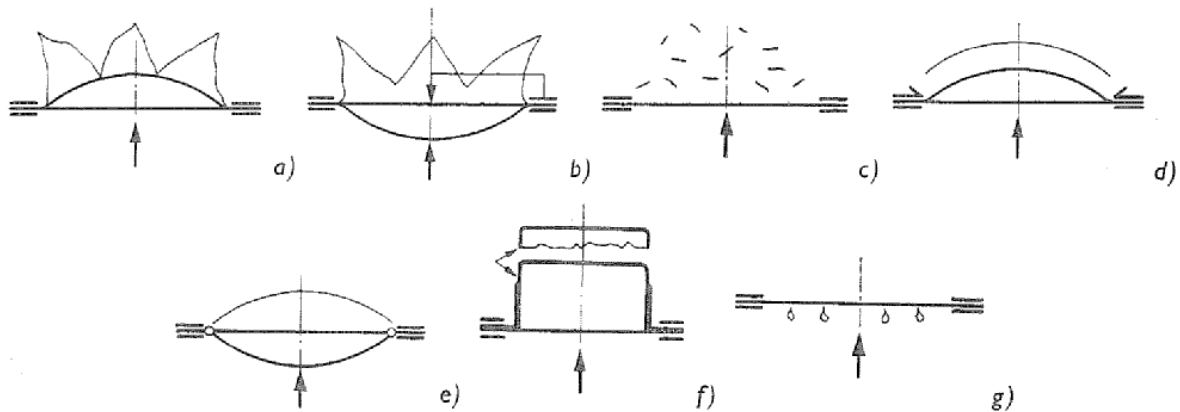
- A tárcsák működését követő expandáláskor a berendezés nagymértékben lehűlhet, ez esetleg ridegtörésre nem hajlamos szerkezeti anyagok alkalmazását teszi szükségessé.
- A legnagyobb üzemi nyomás és a nyitónyomás között nagyobb különbséget kell tartani, mint biztonsági szelep esetén. Így a biztonsági tárcsával védett berendezés (rendszer) kihasználási foka rosszabb. Egyes tárcsaszerkezet használata esetén a legnagyobb üzemi nyomás pl. csak kb. 70%-a lehet a nyitónyomásnak.
- A beépített tárcsa nyitónyomása nem ellenőrizhető. Erről csak a vele azonos méretű és tulajdonságú, egy sorozatban gyártott tárcsa kipróbálásával győződhetünk meg.
- Ha a berendezésekben a belső nyomáson kívül vákuum is felléphet, akkor a tárcsákat szükség szerint vákuumtámasszal kell felszerelni.
- Csak homogén, reprodukálható minőségű szerkezeti anyagból gyárthatók.
- Működésük során — különösen a törő-, nyíró- és szakadó tárcsák — kivetődő alkatrészei veszélyesek, így ezek felfogásáról gondoskodni kell.
- Érzékeny szerkezetek, könnyen megsérülhetnek, ezért a csomagolásuk, szállításuk, szerelésük különös gondosságot kíván.

- Élettartamuk korlátozott, a gyengülésből (kúszásból stb.) származó nem kívánatos működés elkerülésére a tárcsákat időnként cserélni kell.
- Tűz- és robbanásveszélyes közeget tartalmazó berendezésekhez szikraképző anyagú tárcsaszerkezetek nem használhatók.

Működési elvük szerint megkülönböztetünk:

- önműködő tárcsaszerkezeteket,
- áttételesen működő tárcsaszerkezeteket

Az önműködő tárcsák nyitónyomását a tárcsa szerkezeti anyagában fellépő belső erők határozzák meg. Szerkezeti kialakításuktól és szerkezeti anyaguktól függően működnek, Működésük jellege szerint megkülönböztetünk hasadótárcsákat, törőtárcsákat, nyíródótárcsákat, szakadótárcsákat, olvadótárcsákat. (7.2. ábra)



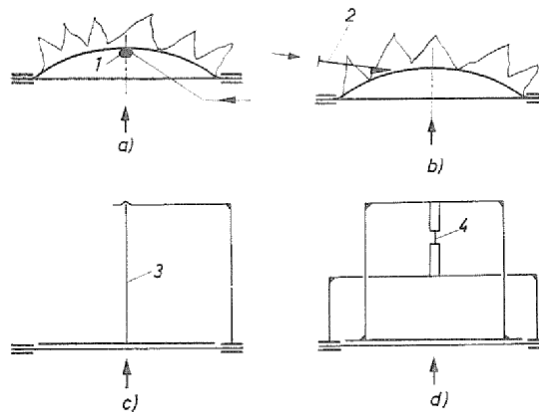
7.2. ábra: Az önműködő tárcsaszerkezetek típusai

a) elődomborított hasadótárcsa; b) átbillenő hasadótárcsa; c) törőtárcsa; d) elődomborított nyíródótárcsa; e) átbillenő nyíródótárcsa; f) szakadótárcsa g) olvadótárcsa

Az olvadótárcsákat elsősorban hőmérséklet határolásra alkalmazzák. Túlnyomás határolóként csak akkor használhatók, ha a lefűvandó közeg hőmérséklete és nyomása között – fizikai törvény által megszabott – összefüggés van.

Az áttételesen működő tárcsák nyitónyomását járulékos külső erők határozzák meg. Működési jellegük, illetve szerkezeti kialakításuk alapján megkülönböztetünk (7.3. ábra):

- | | |
|-------------------------------|------------------|
| a) robbanótöltetes tárcsákat; | 1, robbanótöltet |
| b) dugattyúkéses tárcsákat; | 2, dugattyúkés |
| c) kihajlópálcás tárcsákat; | 3, kihajlópálca |
| d) szakadócsapos tárcsákat. | 4, szakadócsap |



7.3. ábra: Az áttételesen működő tárcsaszerkezetek típusai

Fontos követelmény, hogy az anyag szerkezete és mechanikai tulajdonságai az üzemelés során ne változzon nagymértékben.

7.3.2. BIZTONSÁGI SZELEPEK

A biztonsági szelep olyan túlnyomás-határoló szerelvény, amelyet az adott közeg nyomása önműködően nyit, megengedhető nyomásnövekedés esetén meghatározott mennyiségű közeget átbocsát, majd bizonyos nyomáscsökkenés után önműködően lezár.

A biztonsági szelepek szerkezetük alapján az alábbi csoportokba oszthatók:

- súlyterhelésű
- rugóterhelésű biztonsági szelepek
- segédműködtetésű

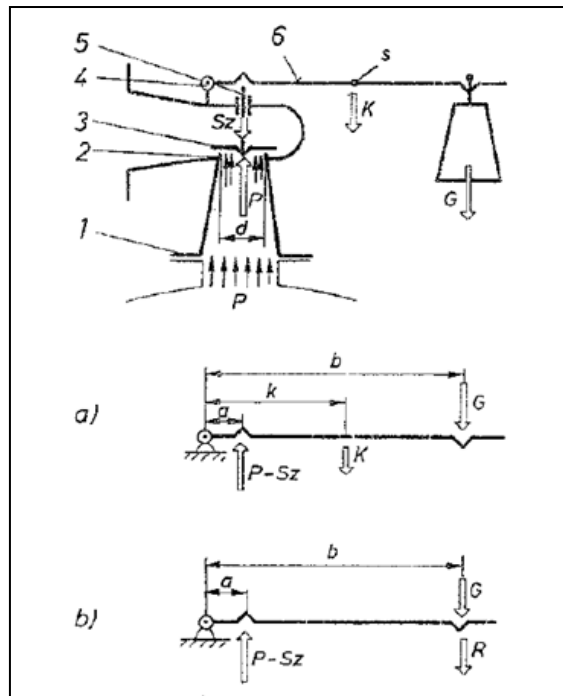
Amíg a súlyterhelésű szelepek csak stabil berendezéseken üzembiztosak, addig a rugóterhelésűek stabil, félstabil vagy mozgó berendezéseken is működőképeseek.

Súlyterhelésű szelepek

A súlyterhelésű szelep egyike a legbiztosabb nyomáshatároló szerkezetnek. Általában kis nyitónyomás ($p_{ny} \leq 0,5 \text{ bar}$) esetében alkalmazzák. Ilyen nyomásra ugyanis a rugóterhelésű biztonsági szelepek már nem minden esetben alkalmasak. A súlyterhelésű biztonsági szelepek elsősorban a gőzkazánok és légtartályok túlnyomáshatárolására alkalmasak.

A szelep elvi felépítését és a fellépő erők egyensúlyát a 7.4. ábra szemlélteti. A szelepház alsó karimája (1) csatlakozik a nyomástartó berendezéshez, így a p nyomás a szeleppüléssel (2) hézagmentesen összecsiszolt szeleptányérra (3) hat, és azt d átmérőjétől függően P erővel terheli. A P erő a szeleptányér és a szelepszár (5) Sz súlya ellenében, a szelepkart (6) a csuklópontja (4) körül igyekszik felfelé elfordítani.

A súlyterhelésű szelepek hátránya, hogy nagy nyomásokhoz egyre nagyobb súlyokra van szükség, amelyek a szerkezet tehetetlenségét jelentősen megnövelik.



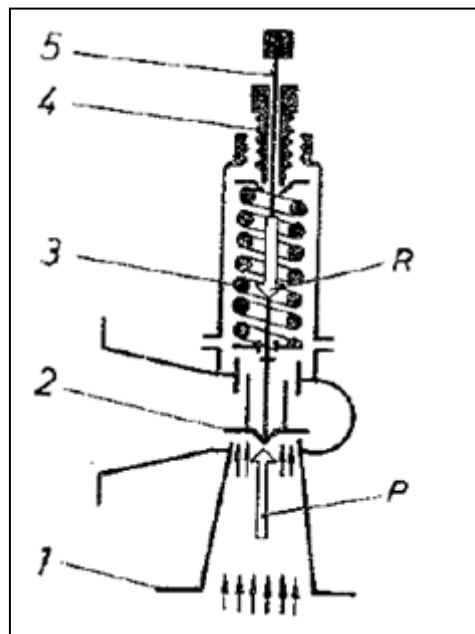
7.4. ábra: Súlyterhelésű biztonsági szelep egyensúlya

Rúgóterhelésű biztonsági szelepek

A rúgóterhelésű biztonsági szelepek szerkezete egyszerű, és a növekvő üzemi nyomások következtében egyre elterjedtebben alkalmazzák.

A rúgóterhelésű szelepek ma már ritkán alkalmazott fajtája a közvetett rúgóterhelésű szelep. Ennek szerkezete megegyezik a súlyterhelésű szelepével, csak a kar végén a terhelést nem súly, hanem nyomórúgó biztosítja.

A rúgóterhelésű szelepek jelentős része közvetlenül rúgóterhelésű. Ilyen szelep elvi, vonalas vázlatát szemlélteti a 7.5. ábra.

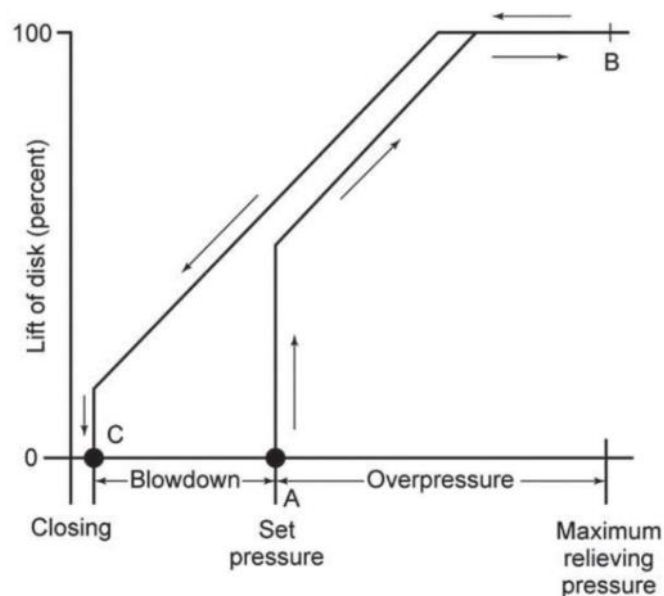


7.5. ábra. Közvetlen rúgóterhelésű biztonsági szelep elvi vázlata

Az alsó karima (1) felől ható p nyomás a becsiszolt szeleptányért (2) P erővel terheli. Ezzel az erővel kell egyensúlyt tartani a vele szemben működő R rúgóerőnek, amelyet a rugót (3) támasztó csavar segítségével (4) lehet beállítani. A kinyúló hengeres szelepszár (5) a szelep üzem közbeni ellenőrzésére való.

A közvetlen rugóterhelésű biztonsági szelepek működését a 7.6 ábra szemlélteti. Ezek esetében a technológiai közeg nyomásának növekedésével a záróerő fokozatosan csökken, vagyis minél közelebb van a biztonsági szelep nyitónyomása az üzemi nyomáshoz, annál nagyobb a szelep szivárgásra való hajlamossága. A szivárgás elkerülésére a biztonsági szelep nyitónyomását a legnagyobb üzemi nyomásnál legalább 5 - 10%-kal magasabbra kell állítani. A nyitónyomás (A) elérése után a biztonsági szelep teljes nyitáshoz, azaz, hogy elérje a teljes áteresztő képességét, további nyomásnövekedés szükséges. A rendszerben így kialakuló nyomást hívjuk lefúvatási nyomásnak (B). Ezt figyelembe véve tehát a berendezés tervezési nyomásának a legnagyobb üzemi nyomásnál kb. 10%-kal nagyobbak kell lennie. Érdeemes megjegyezni, hogy ez drága szerkezeti anyagból készített berendezésnél jelentős többletköltséget is okozhat.

A rugóterhelésű biztonsági szelepek zárónyomása (C) a nyitónyomásnál (A) 5-10%-kal is kisebb lehet. Ennek elérésére jelentős töltetmennyiséget kell lefújni. Ez veszteséget okoz és a kibocsátott közeg további veszélyforrást jelenthet. A nyitási és zárási nyomás közötti jelentős különbség lényegesen ronthatja a technológia hatásfokát is. Esetenként a lefúvás káros szeleprezgéssel is jár.



7.6. ábra. Rugóterhelésű biztonsági szelepek működés

A rugóterhelésű szelepek alkalmazása jelentősen elterjedt az iparban egyszerű kialakításuknak és széleskörű alkalmazhatóságuknak köszönhetően. Vannak azonban olyan speciális (pl.: nagy nyomású és hőmérsékletű technológiák, vagy éppen közel

atmoszférikus nyomású, technológiák magas ellennyomású lefúvatási esetekkel) területek, lefúvatási körülmények, ahol a hagyományos rugóterhelésű szerelvények alkalmazhatósága már korlátos. Ilyen esetekben alkalmazhatók a segédvezérlésű biztonsági szelepek.

Segédvezérlésű biztonsági szelepek

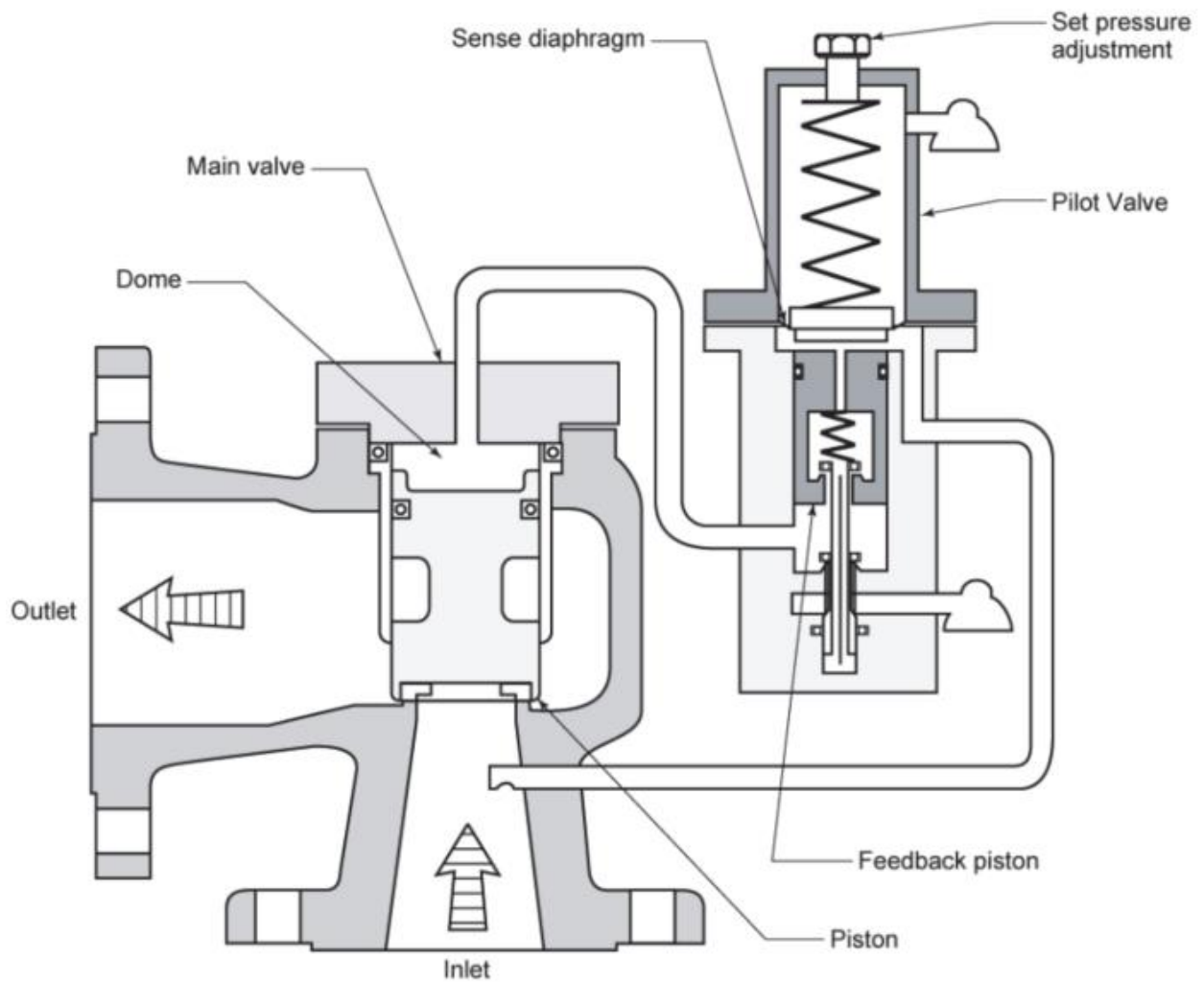
A segédvezérlésű biztonsági szelepek szerkezeti felépítését a 7.7 ábra szemlélteti. Ezek szerkezetileg bonyolultabbak, mint a normál rugóterhelésű biztonsági szelepek. A főszelephez csatlakozik a szelepnitást vezérlő többnyire kisméretű rugóterhelésű biztonsági szelep. A főszelep záróeleme olyan kialakítású, hogy a külső felülete nagyobb, mint a belső (szelepülék felőli). A kialakításból adódóan a beállítási nyomás eléréséig a szelep záróelemének mindkét oldalán ugyanaz az üzemi nyomás alakul ki. A külső oldal nagyobb felületének köszönhetően, a záróerő a nyomásnövekedés során végig megfelelően tömören zárva tudja tartani a szelepet, minimalizálva ezzel a szivárgás lehetőségét. A nyitónyomás elérését követően a segédszelep elengedi a nyomást a zárelem kilépő oldaláról, így a záróerő lecsökken/megszűnik, a záróelem felemelkedik, és kinyit a főszelep, melyen keresztül megindul a nyomásmentesítés. A teljes nyitottság eléréséhez itt is nyomásnövekedés szükséges. A túlnyomás megszűnését követően a segédszelep bezár, visszaépül a nyomás főszelep záróelemének kilépő oldalára és az így kialakuló záróerő ismét zárva tartja a szelepet. A fő- szelep zárónyomása is pontosabban szabályozható a vezérlőszeleppel. A megvalósítható legkisebb viszonylagos zárónyomás-különbség kb. $Z = 2\%$.

Megállapítható, hogy a nagyobb nyomástartományok és teljesítmények esetén a segédvezérlésű biztonsági szelepek alkalmazása előnyösebb, mint a közvetlen működésű rugóterhelésű szelepeké, mert a fokozzák biztonságot és az üzemeltetés megbízhatóságát.

A segédvezérlésű biztonsági szelepek alkalmazásának azonban hátrányai is vannak.

- Kis átmérőjű vezérlővezetékeket, fojtónyílásokat tartalmaznak, amelyek eldugulhatnak, ezzel megakadályozhatják a vezérlés működését. Ezért csak tiszta gázokhoz (gőzökhöz) és tiszta folyadékokhoz alkalmazhatók.
- Kis hőmérsékleten a vezérlővezeték befagyhat.
- A vezetékbe kerülő kondenzátum a vezérlés pontosságát csökkenti.

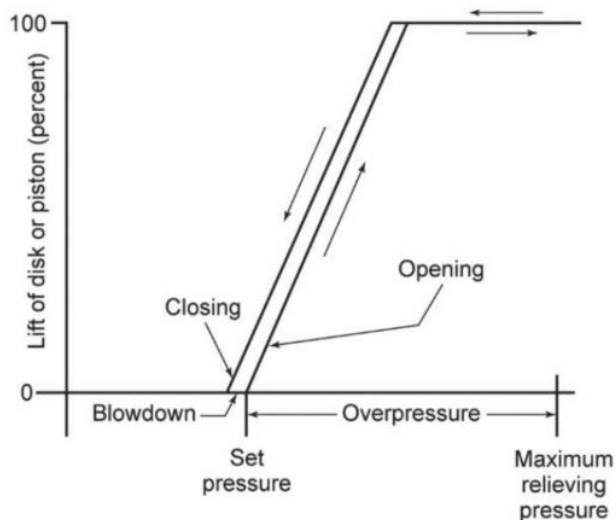
A működés megbízhatóságának fokozására több, párhuzamos vezérlés kapcsolható egy biztonsági szelephez, ill. a teljes lefúvandó töltetmennyiséget több párhuzamosan kapcsolt biztonsági szelepen lehet elosztani.



7.7 ábra. Segédvezérlésű biztonsági szelep

A biztonsági szelepek a nyitási karakterisztikájuk szerint két csoportba sorolhatók:

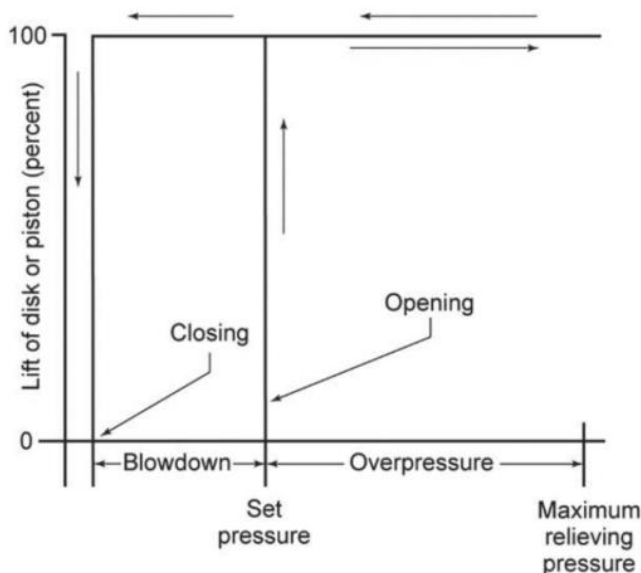
- *arányos emelkedésű szelepek*: azok a biztonsági szelepek, amelyek a teljes löket több mint 20%-án keresztül, vagy pedig a nyitási nyomás 5%-ánál nagyobb tartományban közelítőleg a nyomásemelkedéssel arányosan nyitnak. Az ilyen karakterisztikájú szelepek általában folyadékok lefúvatásánál használatosak.



7.8. ábra. Arányos emelkedésű szelepek működése

- teljes nyitású szelepek: azok a biztonsági szelepek, amelyek nyitás után 5%-on belüli nyomásemelkedés esetén lökészerűen, a konstrukció által határolt löketig nyitnak. A löketnek az a része, amelyik az azonnali további nyitás bekövetkeztéig tart (arányos tartomány), az egész löketnek legfeljebb a 20%-a lehet.

Az ilyen karakterisztikájú szelepeket általában akkor alkalmazzuk, ha a lefűjandó közeg gázok/gőzök.



7.9. ábra. Teljes nyitású szelepek működése

Biztonsági szelepek méretezése és telepítése

A biztonsági szelepek méretezése során a tervező minden egyes egyedi lefűvatósi esetre meghatározza a szelep szükséges átfolyási keresztmetszetét, az adott esethez tartozó lefűvatósi mennyiségek, lefűvatósi körülmények és közegparaméterek figyelembe vételével, a szabványokban közölt méretési egyenletek és megfontolások

alapján. Ezt követően az egyedi lefúvatási esetekhez tartozó átfolyási keresztmetszetek ismeretében kiválasztja a meghatározó esetet (amelynél a legnagyobb a szükséges átfolyási keresztmetszet) és ehhez kiválasztja a megfelelő szabványos fúvóka keresztmetszetű biztonsági szerelvényt.

A biztonsági szelepek méretezése és kiválasztása során fontos paraméter az ellennyomás. Ha ellennyomásról beszélünk, akkor megkülönböztetünk saját (felépülő) és idegen ellennyomást:

- *Saját (felépülő) ellennyomás:* Az aktuálisan vizsgált biztonsági szelep lefúvatásakor jön létre. A kifúvató vezeték hossza, könyökdarabok, hangtompítók és egyéb csővezetési elemek határozzák meg az ellennyomás mértékét, az áramlási veszteségeknek megfelelően.
- *Idegen ellennyomás:* Nem az aktuálisan vizsgált biztonsági szelep lefúvatása hozza létre, hanem valamilyen független forrásból akkumulálódik. Megkülönböztetünk állandó és változó idegen ellennyomást.
 - o *Állandó idegen ellennyomás:* A biztonsági szelep kilépő oldalához csatlakozó lefúvató rendszer stacioner (nyugalmi) nyomása.
 - o *Változó idegen ellennyomás:* A biztonsági szelep kilépő oldalához csatlakozó lefúvató rendszerben megváltozik a nyomás valamilyen egyéb befolyásoló tényező hatására (pl.: másik a rendszerhez csatlakozó szerelvény lefúvatásának következtében felépülő nyomás)

Az ellennyomás befolyásolja a biztonsági szelepek működését attól függetlenül, hogy az atmoszférára vagy egy lefúvató rendszerbe vannak bevezetve. A magas ellennyomás okozhat, nyitónyomás változást, kapacitás csökkenést, instabil működést, vagy akár ezek kombinációját is.

Ellennyomás érzékenység szempontjából az alábbi biztonsági szelep típusokat különböztetjük meg:

- *Konvencionális biztonsági szelepek:* Ilyenek a hagyományos közvetlen rugóterhelésű biztonsági szelepek. Ezek általában olyan esetekben alkalmazhatók, ahol a felépülő ellennyomás nem haladja meg a beállítási nyomás 10%-át, azonban vannak speciális esetek (pl.: tűzeseti biztonsági szelepeknél, vagy amikor két szelep kerül betervezésre egy adott lefúvatási feladat ellátásra). Ilyen esetekben az alkalmazhatóság felső korlátja a megengedhető túlnyomás értéke.
- *Csőmembrános biztonsági szelepek:* Ezek annyiban különböznek a hagyományos közvetlen rugóterhelésű biztonsági szelepektől, hogy a záróelem tetején (szárán) található egy speciális membrán, ami csökkenti a szelep ellennyomás érzékenységét. Az ilyen típusú szelepek akkor alkalmazhatók, ha az össze ellennyomás (idegen + saját) nem haladja meg a beállítási nyomás 50%-át.
- *Segédműködtetésű biztonsági szelepek:* A segédműködtetésű biztonsági szelepek működését nem befolyásolja az ellennyomás, azonban ezek alkalmazása esetén

sem ajánlott, hogy az ellennyomás meghaladja a beállítási nyomás 80%-át. Ilyen ellennyomás felett már speciális megoldásokra szükségesek.

Biztonsági szerelvények telepítésénél, illetve kilépő és belépő vezetékének méretezésénél az alábbi fő szempontokat mindenképpen figyelembe kell venni:

- A biztonsági szelepet úgy kell elhelyezni, hogy a kilépő vezetéke lejtson a fáklyagerinc /fáklyacseppfogó irányába, hogy az expanzió során esetlegesen kikondenzálódó folyadék ne csoroghasson vissza a lefúvató szerelvény irányába.
- A biztonsági szelep belépő vezetékének átmérője nem lehet kisebb, mint a biztonsági szerelvény belépő csonkmérete.
- A biztonsági szelep belépő vezetékét úgy kell kialakítani, és méretezni, hogy a lefúvatas során a vezetékszakaszon fellépő nyomásesés ne haladja meg a beállítási nyomás 3%-át.



MAGYAR MÉRNÖK KAMARA
VEGYÉSZMÉRNÖK TAGOZAT

ÁLTALÁNOS VEGYÉSZMÉRNÖKI ISMERETEK
VEGYIPARI MŰVELETEK ÉS TRANSZPORT FOLYAMATOK
Felkészülő Vizsgaanyag Tervezői Jogosultság Megszerzéséhez

Készítette:

Dr. Pethő Dóra

Dr. Kristóf Tamás

Ellenőrizte:

Dr. Chován Tibor

Veszprém, 2022

Tartalom

1. Általános és fizikai kémiai ismeretek	3
1.1. Fizikai kémiai (termodinamikai) alapok	6
1.2. Fázisegyensúlyok	8
1.3. Kémiai és elektrokémiai egyensúlyok, reakciósebesség.....	11
2. Vegyipari műveletek	14
2.1. Abszorpció	14
2.2. Desztilláció, rektifikálás.....	17
2.3. Adszorpció	21
2.4. Kristályosítás.....	24
2.5. Extrakció	27
2.6. Membránszeparáció	29
2.7. Szárítás	32
3. Transzportfolyamatok	36
3.1. Transzportfolyamatok alapjai.....	36
3.1.1. Extenzív és intenzív állapotjelzők.....	36
3.1.2. Extenzív mennyiség sűrűsége	37
3.1.3. Áram, áramsűrűség.....	37
3.1.4. Extenzív mennyiség mozgásának okai.....	38
3.2. Lamináris és turbulens áramlás	39
3.3. Tartózkodási idő	40
Irodalomjegyzék és ajánlott irodalom.....	41

1. Általános és fizikai kémiai ismeretek

Jól ismert, hogy az anyagok lehetnek gőz, folyadék és szilárd halmazállapotban is. Amikor egy anyagi rendszer egyszerre, egymás mellett több halmazállapotban is előfordul, a gőz halmazállapotú anyagi rendszert gyakran röviden gőzfázisnak, a folyadék halmazállapotú folyadékfázisnak, a szilárd halmazállapotú pedig szilárd fázisnak nevezzük. A fázis egyik fontos jellemzője a sűrűsége, amely a fázis anyagának tömegét a fázis térfogatára vonatkoztatja. Ez a kémikus szemszögéből a koncentrációval rokon tulajdonság. A koncentráció a rendszer anyagi összetételének kifejezése: szűkebb értelemben megadja egy kémiaiilag különböző anyagokból álló anyagi rendszer (elegy, keverék, oldat) egyik kémiai összetevőjének, vagy komponensének a rendszer térfogatára vonatkoztatott anyagmennyiségét (mértékegysége lehet pl. mol/dm^3 , kmol/m^3). Az anyagmennyiséget tömegegységben (kg, g), mólszámban (mol), vagy molekulák számában, stb. adjuk meg. A koncentrációt általánosabb értelemben tekintve, a térfogatosztót helyettesíthetjük egy vele arányos mennyiséggel is. Például, definíció szerint, a komponensmólszámot az összes mólszámmal osztva megkapjuk a móltörtet, amelynek az i komponensre megadható leggyakoribb jelölése x_i .

Vizes oldatok kémhatását (savasságát vagy lúgosságát) jellemző dimenzió nélküli mennyiség a pH, amelynek definíciója szintén egyfajta speciális anyagi összetételt fejez ki, kiindulva egy moláris koncentrációadatból (mol oldott anyag per oldattérfogat, jele gyakran c). Híg vizes oldatban a pH közelítőleg a moláris hidrogénion- vagy hidroxóniumion-koncentráció számértéke tízes alapú logaritmusának mínusz egyszerese ($-\lg c_{\text{H}^+}$). A pH jelenlegi egzakt definíciója a moláris koncentráció helyett az oldat hidrogénion- vagy hidroxóniumion-aktivitását veszi alapul (az aktivitás a moláris koncentráció számértékéből az oldatok nemideális viselkedését figyelembe vevő korrekciós tényező, az aktivitási tényező felhasználásával képezhető, jele a).

A tiszta fázisokat alkotó anyagok fizikai sajátosságait hőtechnikai és volumetrikus tulajdonságokkal jellemezzük. A moláris hőkapacitás pl. általánosan az a hőmennyiség, amely hőközléskor 1 mol anyag hőmérsékletét 1°C -kal növeli meg. A fajlagos hőkapacitás hasonló, csak a moláris anyagmennyiség helyett tömegegységre vonatkoztat. A hőtágulási tényező állandó nyomású anyag térfogatváltozási képességét adja meg egységnyi hőmérsékletváltoztatás hatására. A kompresszibilitási tényező az anyag összenyomhatóságára szolgáltat adatot: állandó hőmérsékleten meghatározva megmondja, hogy egységnyi nyomásváltoztatás az anyag milyen mértékű térfogatváltozásával jár.

A gázok tulajdonságainak leírásához egyértelmű referenciapontként az ideális vagy tökéletes gáz fogalmát definiálták. Ideális gázként viselkednek azok a gázhalmazállapotú anyagok, amelyek nyomása elegendően kicsi és hőmérséklete elegendően nagy. Ezt a bizonytalan gyakorlati meghatározást persze pontosíthatjuk: olyan gázzól van szó, amelyből ha rögzített n mol anyagmennyiséget veszünk állandó T hőmérsékleten, akkor p nyomásának és V térfogatának szorzata a $p \rightarrow 0$ határesetben állandóhoz tart. Az atomok/molekulák szintjén ez egyrészt azt jelenti, hogy az ideális gáz molekuláinak saját térfogata elhanyagolhatóan kicsi magának a gáznak a térfogatához képest, másképpen fogalmazva, ezek a molekulák anyagi tömegpontoknak tekinthetők. Másrészt az ideális gázban a molekulák között nincsenek vonzó vagy taszító kölcsönhatások, amelyek a gáz anyagi minőségétől függő mértékben befolyásolhatnák a gáz viselkedését. A tiszta ideális gázra vonatkozó klasszikus gáztörvény a fenti jelölésekkel a következő: $pV=nRT$, ahol R az univerzális (egyetemes) gázállandó, amelynek értéke $8,314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$, ha a változók SI mértékegységben vannak. A gáztörvény értelmében többkomponensű ideális gázelegyek komponenseinek hozzájárulása a gáz nyomásához (p_i parciális nyomás) vagy térfogatához (V_i parciális térfogat) kizárólag a mólarányok figyelembevételével egyszerűen kiszámolható: $p_i=p\cdot x_i$ (Dalton-törvény) és $V_i=V\cdot x_i$ (Amagat-törvény). Mivel a többkomponensű elegy móltörtjeinek összege 1, ezért a parciális nyomások vagy a parciális térfogatok ki kell, hogy adják az elegy teljes p nyomását vagy teljes V térfogatát. A valós gázhalmazállapotú anyagok viselkedése bizonyos mértékig mindig eltér a tökéletes gáz viselkedésétől, mivel molekuláik vonzó és taszító erőkkel hatnak egymásra (ide értve a molekulák saját méretéhez kapcsolódó taszításokat, térfogatkizárási effektusokat is). Ezt a nemideális viselkedést az ideális gáztörvény különböző módosításaival létrehozott, a p - V - T tulajdonságok pontosabb kapcsolatát kifejező állapotegyenletek veszik figyelembe (pl. van der Waals-egyenlet, viriál-egyenlet, Peng-Robinson-egyenlet). A reális gáz állapotegyenletei persze az ideális gáztörvény egyszerű korrekciójánál bonyolultabb alakúak is lehetnek; igen nagy pontosságú, sokparaméteres, igényes technológiai tervezésre alkalmas állapotegyenletek is léteznek, amelyek akár az adott anyag fázisának p - V - T tulajdonságait is bizonyos mértékig jól leírják. Megjegyzendő azonban, hogy a nemideális viselkedés folyadékokra és szilárd anyagokra sokszor az ideális gáztörvénytől való eltérésnél tágabb értelemben értendő, és ezekre az ideális referenciaállapot gyakran mást jelent (pl. tiszta folyadék, ideális oldat, ideális kristály).

Ideális gázzal pl. az ún. Joule-Thomson-effektus (amelyen pl. a levegőcseppfolyósítás technológiája alapul) nem játszódik le. A Joule-Thomson-effektus lényege, hogy ha egy környezetétől elszigetelt rendszerben egy fluidumot porózus hőszigetelő anyagból készült

fojtáson keresztül engedünk kiterjedni, a tapasztalat szerint a fluidum hőmérséklete megváltozik (az anyag többnyire lehül). A jelenség éppen annak a ténynek a következménye, hogy az adott anyag nem tökéletes gáz. A fluidum kiterjedése során ugyanis a nyomás- és térfogatváltozás a fluidummolekulák közötti átlagos távolság és ezáltal a köztük levő kölcsönhatás átlagos erősségének megváltozását, így az anyag belső energiájának megváltozását eredményezi. Ez a kialakított (elméletileg tökéletesen, a gyakorlatban közelítőleg) hőszigetelt rendszerben hőmérsékletváltozást okoz. Ideális gázban azonban a molekulák között definíció szerint nincs kölcsönhatás, tehát ezek változni sem tudnak, így az ideális gáz hőmérséklete eredeti értékén marad.

A különböző anyagok kémia átalakulása a kémiai reakció, amelyben kémiai elemekből vegyületek képződnek, vegyületek alkotóikra bomlanak, vagy többféle vegyületből újfajta vegyületek képződnek. A kémiai reakciók során lezajló kémiai összetételváltozásokat reakcióegyenletekkel, az átalakulás során a kémiai elemek megmaradását feltételező, ún. sztöchiometriai egyenletekkel írjuk le. A kémiai reakciókban töltött részecskék, ionok is részt vehetnek. Pozitív ion a megfelelő semleges részecskéből oxidációval, semleges részecske a megfelelő pozitív ionból redukcióval keletkezik. Általánosabban, atomok, molekulák, ionok töltésének pozitív irányba való változása oxidáció, ami elektronleadást jelent, negatív irányba való változása redukció, ami elektronfelvételt jelent. Ionos reakciók rendezésekor a kémiai elemek megmaradásának feltétele a töltésmegmaradás általános alapelvével is kiegészül.

A kémiai reakció egyik legfontosabb termodinamikai jellemzője a reakciót kísérő hőforgalom, vagy reakcióhő. Exoterm az a reakció, amelyben hő szabadul fel, endoterm pedig az, amelyben hő nyelődik el. Egy vegyület képződéshője annak a kémiai reakciónak a reakcióhője, amellyel az adott vegyületet standard állapotú kémiai elemeiből állítjuk elő. Az elemek képződéshője megállapodás szerint zérus. A reakcióhők kapcsolatára vonatkozó Hess-tétel kimondja, hogy ha valamely reakció sztöchiometriai egyenlete előállítható több részreakció sztöchiometriai egyenletének lineáris algebrai kombinációjával (egyenletek vagy azok többszöröseinek összeadása egymással, egymásból kivonása), akkor az eredő reakcióhő is előállítható a részreakciók reakcióhőiből, mégpedig ugyanazokkal a lineáris algebrai lépésekkel, amelyeket a sztöchiometriai egyenletekkel tettünk. A reakcióhő és a képződéshő szokásos mértékegysége pl. kJ/mol, MJ/kmol.

1.1. Fizikai kémiai (termodinamikai) alapok

A klasszikus termodinamika az anyag makroszkópos sajátságaival foglalkozik. Összefüggéseit két tapasztalati tételből (főtételből) vezeti le. Ezek olyan nem bizonyítható állítások, amelyekkel szembenő megalapozott tapasztalattal nem rendelkezünk. A klasszikus termodinamika I. főtétele szűkebb értelemben az energia megmaradását, általános értelemben az energia, az anyag és az impulzus (ezzel áttételesen a térfogat) megmaradását mondja ki. A kémiai termodinamika I. főtétele közkeletű megfogalmazásaiban az energiamegmaradás elvét fejezi ki, amely szerint a természetben lejátszódó folyamatokban a legfeljebb a kémiai energiák nagyságrendjében forgalomba kerülő energiák adott esetben átalakulnak más energiafajttá, de összértékük nem változik. A termodinamika egyik kulcsmennyisége a vizsgált termodinamikai rendszer belső energiája, amely állapotfüggvény, és a teljes rendszer mozgási és helyzeti energiáján kívül minden, az alkotó részecskéktől származó energiaösszetevőt tartalmaz. Az I. főtétel legismertebb kijelentései a belső energiával a következők: (1) Egy rendszer belső energiája növelhető a rendszeren végzett munka és a rendszernek átadott hő útján. (2) Izolált (környezetétől elszigetelt) rendszer belső energiája állandó. (3) Körfolyamatban a belső energia teljes megváltozása zérus.

A termodinamikában a vizsgált rendszert legtöbbször olyan makroszkópos tulajdonságokkal, ún. termodinamikai állapotfüggvényekkel jellemezzük, amelyek egyértelmű függvényei a rendszer állapotának. Tehát ha a rendszer az egyik állapotából egy másikba jut, akkor az állapotfüggvények megváltozása csak a kiindulási és a végső állapottól függ, és nem függ attól, hogy a változás milyen úton ment végbe. A termodinamikai állapotfüggvény tipikus példája a belső energia. Ezzel szemben az I. főtétel kijelentéseiben emlegetett munkavégzés és a hőforgalom általános esetben útfüggvény, tehát értékük függ attól a számtalan lehetséges termodinamikai úttól, melyeken keresztül a rendszer az adott állapotba jutott. Fontos kitétel vonatkozik az állapotváltozásokhoz tartozó állapotfüggvény jellegű energiaváltozások értékének megállapítására (de egyéb állapotfüggvények változásának megállapítására is): a megállapodás szerint mindig az állapotváltozás végállapotának jellemző értékéből vonjuk ki az állapotváltozás kezdeti állapotának jellemző értékét, és nem fordítva. Ezt a szabályt időnként nevezik delta-konvenciónak is. Az energiaváltozások előjelét mindig a vizsgált termodinamikai rendszer szempontjából állapítjuk meg, így pozitív az a változás, amely a rendszer energiáját növeli és negatív az, amely csökkenti.

Az állapotokat jellemző (röviden állapotjelző) tulajdonságok két gyökeresen eltérő csoportra bonthatók. Azokat az állapotjelző tulajdonságokat, amelyek függenek a rendszer tömegétől,

extenzív állapotjelzőknek nevezzük. Ha pl. egy rendszerből kétszer, háromszor akkora veszünk, ahhoz pl. a belső energiának, a térfogatnak vagy a természetesen tömegben is megadható anyagmennyiségnek kétszer, háromszor akkora értéke tartozik. Ez egyúttal additivitásukat is jelenti. Azokat az állapotjelző tulajdonságokat, amelyek függetlenek a rendszer tömegétől, intenzív állapotjelzőknek nevezzük. Ilyenek a nyomás, a hőmérséklet, a kémiai potenciál, a felületi feszültség vagy az elektromos potenciál.

A termodinamikai rendszer lehetséges állapotai közül kitüntetett szerepe van az egyensúlyi állapotnak. Egy rendszer termodinamikai egyensúlyban van, ha intenzív állapotjelzői függetlenek az időtől, és környezetével nem cserél sem anyagot, sem energiát. Az egyensúlynak függetlennek kell lennie a rendszer pozíciójától is a térben, és az olyan tulajdonságok, mint a hőmérséklet vagy a kémiai potenciál az egyensúlyi rendszer belsejében mindenütt ugyanolyan értékűek. Ha csak az időfüggetlenség feltétele teljesül, akkor a rendszert stacionárius állapotban lévőnek nevezzük.

A klasszikus kémiai termodinamika II. főtétele az energiaelértéktelenedés vagy energiaszétzóródás elvét fejezi ki. Eszerint minden energiatípus teljes egészében termikus energiává alakítható, de a termikus energia nem alakítható teljes egészében pl. munkává. A valóságos folyamatok mindig a termikus energia javára játszódnak le. Tehát ha egy energiatípust átalakítunk egy másik energiatípussá, akkor az átalakítást termikus energia keletkezése is kíséri, más szóval az átalakítás veszteséggel jár. Ez a veszteség, akkor a legkisebb, ha az átalakítás reverzibilis úton történik. A reverzibilitás itt azt jelenti, hogy a folyamat során bármely pillanatban bármilyen kis ellenhatással (ellenerővel) a folyamatot ellenkező irányba tudnánk fordítani. Ez egyúttal azt is jelenti, hogy a folyamat során a rendszer végig egyensúlyi állapotban van. A természetben önként (spontán módon) lejátszódó valóságos folyamatok azonban mindig irreverzibilisek (mechanikai munkavégzés során súrlódási veszteség lép fel, környezeténél melegebb test lehűl, eltérő koncentrációk kiegyenlítődnek, elektromos vezetőben az elektromos áram egy része hővé alakul). Ezekre a folyamatokra legfeljebb azt jelenthetjük ki, hogy a spontán változás a rendszert az egyensúlyi állapota felé hajtja.

A termodinamika II. főtétele szerint továbbá minden homogén fázisra létezik egy extenzív tulajdonság, amelynek változása mutatja a spontán folyamatok irányát, és ezt a tulajdonságot entrópiának nevezzük. A rendszer entrópiája definíciójából következően függvénye a belső energiának, a térfogatnak, az anyagmennyiségeknek, stb. A II. főtételeből és a természetben lejátszódó spontán folyamatok jellegéből következik, hogy minden ilyen folyamatban a rendszer és környezetének együttes entrópiája növekszik, és amikor a folyamat az egyensúly

elérésével befejeződik, a rendszer entrópiája az elérhető legnagyobb értékű lesz (az entrópiamaximum elve). Az entrópia definíciójából a jól ismert energiaminimum-elv is következik: környezetétől elszigetelt (izolált) rendszer belső energiája a rendszer egyensúlyi állapotában minimumot vesz fel. Az energiaminimum elve a környezetének hatásaitól nem teljesen elszigetelt rendszerekre is megfogalmazható, csak más-más állapotfüggvény jellegű energiafüggvényekkel (pl. entalpia, szabadenergia, szabadentalpia).

Ha két, hőátteresztő (diaterm) falon keresztül érintkező, de egyéb módon környezetétől elszigetelt anyagi rendszer eltérő hőmérsékletű, akkor közöttük a tapasztalat szerint hőcsere játszódik le: a nagyobb hőmérsékletű (al)rendszer spontán módon hőt ad át a kisebb hőmérsékletű (al)rendszernek. Ez a folyamat a II. főtétel értelmében addig tart, amíg a két rendszer egymással termikus egyensúlyba nem kerül. Ilyenkor a hőmérsékleteik azonossá válnak, és az előzőekből következően a két rendszer között makroszkópos szinten megszűnik a hőátadás. Hasonló folyamat következik be két, hőátteresztő és elmozdítható (flexibilis) falon keresztül érintkező, de egyéb módon környezetétől elszigetelt anyagi rendszer esetén. Ha kezdetben nyomásaik eltérőek, akkor térfogataik egymás rovására addig változnak, amíg nyomásaik azonossá nem válnak. Ha az előző, elmozdítható fal helyett anyagáteresztő falunk van, az alrendszerek között anyagcsere zajlik, egészen addig, amíg a rendszerhatáron átlépő anyagokra azonos nem lesz a kémiai potenciál a két rendszerben. Amennyiben ezen egyensúlyi fogalmakat együtt kezeljük, el is jutunk a fázisegyensúlyok kérdéséhez. Két, ugyanazon kémiai komponens(ek)ből álló, de különböző halmazállapotú, egymással szabadon érintkező makroszkopikus fázis egymással termodinamikai egyensúlyban van, ha a két fázis hőmérséklete, nyomása és $a(z)$ (egy) kémiai potenciál(ok) a két fázisban rendre azonos(ak). Ez a fázisegyensúly általános feltételrendszere.

1.2. Fázisegyensúlyok

Tiszta, egykomponensű anyagi rendszer fázisainak egymásba való átalakulásakor a fenti intenzív tulajdonságok (hőmérséklet, nyomás, kémia potenciál) a teljes átalakulás alatt állandó értéken maradnak, miközben az anyag olyan extenzív tulajdonságainak, mint a térfogat, az entalpia, az entrópia, vagy a belső energia, ugrásszerű változása következik be (ez a megállapítás szigorúan csak az ún. elsőrendű fázisátalakulásra igaz, de a továbbiakban csak ezzel a leggyakoribb esettel foglalkozunk). Az entrópia és az entalpia növekszik az olyan fázisátalakulások során, ahol rendezettebb fázisból rendezetlenebb fázis jön létre (szilárdból folyadék vagy gőz, folyadékból gőz), mivel a rendezetlenebb fázisok nagyobb entrópiájúak,

illetve az ezekbe való átalakítás hőenergia befektetését igényli. Egykomponensű anyagi rendszer fázisátalakulásakor az egyik jellemző fázisegyensúlyi mennyiség a fázisátalakulási hő. Ez az adott tiszta anyag egységnyi mennyiségének (pl. 1 mol vagy 1 kg) fázisátalakulása során felszabaduló vagy befektetett hőmennyiség. Mivel az elsőrendű fázisátalakulás állandó hőmérséklet mellett állandó nyomáson játszódik le, a fázisátalakulási hő a fázisátalakulás entalpiaváltozásával egyenlő. Belátható ugyanis, hogy állandó nyomáson a hőforgalom entalpiaváltozással helyettesíthető, és mivel az entalpia termodinamikai állapotfüggvény, ennek a helyettesítésnek esetenként előnye, hogy így a hőforgalom értéke megadható kizárólag a folyamat végállapotának és kezdeti állapotának entalpiakülönbségével. Az egykomponensű folyadék→gőz és szilárd→gőz fázisátalakulások az anyag nagy térfogatnövekedésével járnak együtt, míg a szilárd→folyadék fázisátalakulások jóval kisebbel, de a térfogatváltozás általában itt is pozitív. Az elenyésző kivételek közé tartozik a víz viselkedése olvadáskor, amikor a moláris vagy fajlagos térfogat csökken. Állandó hőmérséklet és nyomás mellett adott mennyiségű (víz)jég elolvadásakor az anyagban hő nyelődik el, de csökken az anyag térfogata, mivel a víz sűrűsége speciális hőmérsékletfüggést mutat: légköri nyomáson a 4°C hőmérsékletű víznek van a legnagyobb sűrűsége. Az egykomponensű fázisátalakulások extenzív mennyiségeinek jellemzése mellett érdemes megemlíteni, hogy e fázisátalakulások intenzív tulajdonságai egymás függvényében jellegzetesen változnak. Ezekből a legismertebb és legfontosabb a fázisegyensúly nyomásának hőmérsékletfüggése: szilárd anyag vagy folyadék p^* egyensúlyi gőznyomása (gőztenziója) exponenciálisan nő a hőmérséklet növekedésével, és ugyanúgy exponenciális jellegű a szilárd-folyadék fázisátalakulási nyomás hőmérsékletfüggése is. Az egykomponensű gőz-folyadék egyensúly sajátossága, hogy létezik ún. kritikus pontja: az e pont hőmérsékleténél nagyobb hőmérsékleten vagy nyomásánál nagyobb nyomáson az adott anyagnak csak gázfázisa létezik, vagyis az anyag nem tud kialakítani gőz és folyadék halmazállapotú fázisokból álló fázisegyensúlyt.

Többkomponensű anyagi rendszerek rendkívül gazdag fázisegyensúlyi viselkedést mutatnak. A fázisegyensúlyi feltételrendszer mellett leírásuknak tekintetbe kell vennie az elegyedési folyamatok sajátosságait is. Két vagy több komponens elegyedése során a kiindulási anyagok térfogata, entrópiája vagy entalpiája összegéhez képest változás állhat be az elegytérfogatban, -entrópiában, vagy -entalpiában. Állandó hőmérsékleten és nyomáson az elegyedés, mint spontán folyamat entrópiaváltozása kötelezően pozitív (ld. II. főtétele). Ugyanilyen körülmények között az elegyedési térfogatváltozás és az elegyedési entalpiaváltozás (ld. elegyedési hő) lehet pozitív és negatív, illetve zérus is. Ez utóbbi eset ún. ideális elegyedéskor következik be. Ilyenkor az eltérő típusú molekulák mérete azonos, és a közöttük kialakuló

vegyes kölcsönhatások nem lesznek sem erősebbek sem gyengébbek, mint az azonos típusú molekulák közötti kölcsönhatások. Ideális elegyedés a valóságban csak közelítőleg valósul meg, de ezt az egyszerűsítő feltevést több jelenség leírásakor használják.

A többkomponensű fázisegyensúlyok közül a gőz-folyadék egyensúlyoknak kiemelt elméleti és gyakorlati jelentősége van. Adott hőmérsékleten egy ideálisnak tekinthető illékony folyadékelegy fölötti ideális gőztérben egy i komponens p_i parciális nyomása egyenlő a komponens folyadékbeli x_i móltörtjének és p_i^* egyensúlyi gőznyomásának szorzatával (Raoult-Dalton törvény: $p_i = p_i^* \cdot x_i$). Ez egyúttal azt jelenti, hogy a folyadékelegy fölött a teljes egyensúlyi gőznyomás (röviden a p teljes nyomás) az alkotó tiszta folyadékkomponensekre vett ezen szorzatok összege lesz. Tehát a folyadékelegyet alkotó komponensek gőztenziói a p teljes nyomástól szükségszerűen eltérőek, amiből az is következik, hogy a folyadékelegy és a vele egyensúlyt tartó gőzelegy összetétele eltér egymástól. Ez a folyadékelegyek komponenseinek desztillációs elválasztásának az alapja. A Raoult-Dalton-törvény egymással nem elegyedő folyadékkomponensek esetén is formálisan használható (minden folyadékmóltört értékét 1-nek véve): a folyadékok feletti gőztér nyomása ekkor az egyedi tiszta komponensek gőztenzióinak összege lesz.

Az azeotrópia jelensége nemideális gőz-folyadék egyensúlyi rendszerekben fordul elő, amikor egy folyadékeleggyel egy vele azonos összetételű gőzelegy tart termodinamikai egyensúlyt (ez csak akkor lehetséges, ha a nemideális korrekciók, vagyis az aktivitási tényezők értékei éppen megfelelően alakulnak). Ez az elválasztási szempontból kedvezőtlen állapot a rendszer nyomásának vagy hőmérsékletének megváltoztatásával, illetve további komponensnek (só, oldószer) a rendszerbe adagolásával bontható meg. Az állapot megfelelő szilárd adszorbens hozzáadásával is megbontható. Ilyenkor az adszorpció jelenségét használják ki. Az adszorpció anyagmegkötést jelent szilárd anyag vagy folyadék felületén, de a felületet pórusos szilárd adszorbensek esetén tágran értelmezik. Az adszorpció folyamatával szemben megkülönböztetjük az abszorpció folyamatát, ahol gázok vagy gőzök molekulái folyadékban vagy szilárd anyagban nyelődnek el, tehát az anyagmegkötés a fázis belsejében valósul meg.

Folyadékban az egyensúlyi gázoldódás vagy abszorpció más megfogalmazásban többkomponensű gáz-folyadék egyensúlyt eredményez. Ekkor a gáztér komponensei kritikus pontjuknál nagyobb hőmérsékletűek, így elvileg nem tudnak folyadékfázist alkotni. Ilyenkor azt mondjuk, hogy a gáztér komponensei az alatta levő folyadékban oldhatók, e komponensek két fázisbeli előfordulásaik között áll fenn az egyensúly, és a folyadék eredeti komponensei nem lesznek feltétlenül jelen a gáztérben. A gáz komponensei a parciális nyomásaiknak megfelelő mértékben oldhatók a folyadékban, és az arányossági tényező a Henry-állandó. A

különböző gázok oldószerre megadott Henry-állandói jelentős hőmérsékletfüggést mutatnak. Megjegyzendő, hogy egykomponensű gáztérre is érvényesek ezek a megfontolások, illetve szubkritikus komponensekre is hasonlóan értelmezhető ez a fázisegyensúly.

Amikor többkomponensű, egymással nem elegyedő két folyadékunk van, és a folyadékfázisok azonos komponensekből állnak, többkomponensű folyadék-folyadék egyensúlyról beszélünk. Az egyensúlyi fázisszétválás itt azért valósulhat meg, mert a komponensek csak korlátozottan tudnak elegyedni egymással, vagyis az adott folyadékelegynek van olyan összetétel-tartománya, ahol nincs elegyedés. A gőz-folyadék egyensúly analógiájára gondolva, ez a fázisegyensúly is kihasználható komponensek elválasztására. Egymással nem elegyedő kétféle folyadékban rendre oldható lehet egy harmadik komponens is (harmadik komponens akkor, ha a két folyadék tiszta anyag). A fázisegyensúly olyan módon áll be, hogy a fázishatárt csak ez a harmadik komponens lépi át, és a komponens egyensúly feltétele csak erre teljesül. A fázisegyensúlyi feltételből következik, hogy állandó hőmérsékleten a rendszerre definiálható az ún. Nernst-féle megoszlási állandó. Az adott komponens ennek az állandónak megfelelően oszlik meg a két folyadék között. Ez azt jelenti, hogy – a két folyadékfázis intenzív érintkeztetése után – kialakuló egyensúlyban az adott komponensnek a két fázisban érvényes aktivitásai hányadosát (közelítőleg koncentrációi hányadosát) a Nernst-állandó rögzíti, függetlenül a komponens bemérési mennyiségétől. Amennyiben az oldatok nemideális viselkedését figyelembe vevő, a koncentrációkat szorzó aktivitási tényezők nem ismertek, a megfelelő koncentrációk hányadosa, a Nernst-féle megoszlási hányados is felhasználható ezen megoszlási egyensúlyon alapuló extrakciós elválasztási feladatok tervezésére.

Az előző többkomponensű fázisegyensúlyok közül azok voltak egyfajta korlátozott fázisegyensúlyok, amelyekben a fázishatárt az anyagmennyiségére nézve többnyire domináns folyadékfázis molekulái nem lépik át. Ennek fordítottja az, amikor nemillékony anyagot tartalmazó oldataink vannak. Ezek termodinamikai jellemzői elsősorban az oldószer minőségétől és az oldott anyag mennyiségétől függenek. Egy ilyen oldat dermedéspontjának hőmérséklete mindig kisebb az eredeti oldószer dermedésponti hőmérsékleténél (azonos külső nyomás mellett), vagy forráspontjának hőmérséklete mindig nagyobb az eredeti oldószer forrásponti hőmérsékleténél (azonos külső nyomás mellett).

1.3. Kémiai és elektrokémiai egyensúlyok, reakciósebesség

A kémiai egyensúly a reaktív elegyekben kialakuló egyensúlyi állapot. Egy kémiai reakció legfontosabb egyensúlyi jellemzője a kémiai egyensúlyi állandó. Adott hőmérsékleten vezetett

reakció kémiai egyensúlyi állandója egész pontosan az egyensúlyi reakcióelegy komponenseinek aktivitásából határozható meg. Újra megállapíthatjuk, hogy az aktivitás olyan mérhető adatokkal arányos, mint a komponensek koncentrációi, parciális nyomásai, stb., és sok esetben elegendő közelítőleg ezeket az adatokat használni az állandó kiszámításához. A kémiai egyensúlyi állandót, ún. tömeghatástört-függvényt képezve, ezen adatok megfelelő hatványainak szorzataként kapjuk, ahol a hatványkitevők a kérdéses reakcióegyenlet előjelesen értelmezett sztöchiometriai tényezői (a reakcióegyenletben szereplő vegyületképletek előtti szorzótényezők). Az előjelkonvenció a delta-konvenció logikája szerint a keletkező anyagok sztöchiometriai tényezőit veszi pozitív értékkel, és a kiindulási anyagokét negatívval.

Egy egyensúlyi reakcióelegy komponensösszetételét tervezetten eltolhatjuk a hőmérséklet vagy a nyomás megváltoztatásával, de pl. a termékkomponensek eltávolításával is. Ezek a változtatások a Le Chatelier-Braun-elv alapján működnek, amelynek lényege az, hogy a kémiai egyensúlyi rendszer a külső hatásra a hatás csökkentésével reagál. Az elv tételiesen megfogalmazva pl. az jelenti, hogy egy hőelnyelő reakció egyensúlya nagyobb hőmérsékleten, vagy egy nagy mólszámcsökkenéssel járó gázfázisú reakció egyensúlya nagyobb nyomáson a termékképződés irányába tolódik el, illetve egy termékkomponens reakcióelegyből való elvétele a reakció egyensúlyát a termékképződés irányába tolja el. A reakcióelegyhez adagolt olyan anyagot, amely végeredményben nem vesz részt a kémiai reakcióban (inert anyag), de a reakció sebességét adszorpciós vagy egyéb hatások révén meg tudja változtatni, katalizátornak vagy inhibitornak nevezzük. Fontos, hogy ezek az anyagok a kémiai reakciók egyensúlyát nem befolyásolják. A katalizátor a reakció sebességét növeli, az inhibitor pedig csökkenti.

Ha egy kémiai reakciót állandó hőmérsékleten és állandó nyomáson vezetünk, a reakcióhő a reakció standard reakcióentalpia-változásával lesz egyenlő (ld. fent: állandó nyomáson a hőforgalom entalpiaváltozással helyettesíthető). A nevezetes Hess-tétel az entalpiával automatikusan teljesül, hiszen egy termodinamikai állapotfüggvény esetében lényegtelen, hogy adott kiindulási anyagokból milyen köztes lépéseken keresztül jutunk az adott végtermékekig.

A kémiai reakciók egyensúlyi állapotának jellemzői mellett igen fontos a reakció sebessége. Ezt úgy definiáljuk, hogy egy adott reakció minden résztvevő komponensével célszerűen ugyanazt az értéket kapjuk, figyelembe véve az átalakulások mólarányait: a reakciósebesség a reakcióban átalakuló bármely komponensnek az előjelesen értelmezett sztöchiometriai tényezőjével osztott koncentrációja idő szerinti deriváltja. Mértékegysége pl. $\text{mol}/(\text{dm}^3\text{s})$, $\text{kmol}/(\text{m}^3\text{h})$. A tapasztalat szerint ez a sebesség megadható egy koncentrációfüggő és egy hőmérsékletfüggő tényező szorzataként. A fenomenologikus reakciókinetika az egyes reakciók sebességének koncentrációfüggésére szigorúan tapasztalati összefüggést ír elő, amely a

részvevő komponensek valamilyen, adott reakcióra jellemző empirikus hatványértéken vett koncentrációinak szorzataként áll elő (a hatványkitevő egyes komponensekre lehet zérus is, ami azt jelenti, hogy az adott komponens a reakció sebességét nem befolyásolja). A hőmérsékletfüggő tényező nagysága a hőmérséklet növelésével általában nő, ezért adott reakció nagyobb hőmérsékleten általában gyorsul.

Speciális kémiai egyensúlyok az oldatokban létrejövő elektrokémiai egyensúlyok. Az e rendszerekben felírható reakciók a részecskék között elektronátlépéssel (oxidációval és redukcióval) járnak, a résztvevők egy része töltéshordozó részecske. Az elektromos áramot ezekben az oldatokban elsősorban az ionok vezetik. Ha egy ilyen oldatot elektronvezető szilárd fázissal (legtöbbször fémmel) hozunk érintkezésbe, elektródot tudunk kialakítani. Szűkebb értelemben magát az elektrolitoldatba merülő fémet is hívják elektródnak. Az fémelektrodon oxidáció és redukció is lejátszódhat, és a forgalomba kerülő elektron a fémes fázisba kiléphet vagy onnan az oldatba léphet. Ha két különböző elektródtér oldatának fizikai keveredését egy elektromos átvezetést biztosító „fal” (általában diafragma) segítségével megakadályozzuk, akkor a két fémet elektromosan vezető huzallal összekötve a fémbe kilépő vagy onnan az oldatba lépő elektronokkal irányított elektronáramlást tudunk előidézni. Ezzel galvánelemlát hoztunk létre. A galvánelemlában tehát önként végbemenő kémiai reakció energiáját megfelelő módszerrel elektromos energiává alakítunk (elektromos áramot termelünk). Ezzel szemben elektrolizáló celláról akkor beszélünk, ha külső elektromos energiával a cellában (elektro)kémiai reakció(ka)t idézünk elő. Tisztán galvánelemla pl. egy nem újratölthető ceruzaeleml, elektrolizáló cella pl. egy autóakkumulátor a feltöltésekor.

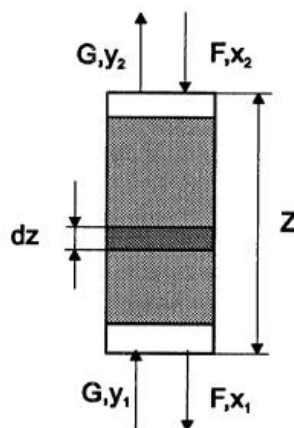
Az elektródok legfontosabb jellemzője az elektródpotenciál. A hagyományos definíció szerint ez egy olyan galvánelemla cellapotenciáljának nulla áramra extrapolált határértéke (elektromotoros ereje), amelynek egyik elektródja az adott elektród, a másik elektródja egy standard hidrogénelektrod, és ez utóbbi potenciálja a definíció szerint zérus. A standard hidrogénelektrod referenciaként való használata egyúttal vizes oldatokat feltételez. Az elektródpotenciál két tagból áll: egy adott hőmérsékleten vett állandó standardpotenciálból és egy, az adott félcella-reakció oxidált állapotú résztvevője és redukált állapotú résztvevője aktivitásainak hányadosával kifejezett tagból ($(RT/zF) \cdot \ln(a_{ox}/a_{red})$, ahol z a félcella-reakció töltésszám-változása, F pedig a Faraday-állandó). A résztvevő ionok aktivitása koncentrációjukkal, az esetleg oldott gázok aktivitása a parciális nyomásukkal arányos (sokszor elegendő ezekkel közelíteni), de ha pl. a redukált forma a kivált fémmre vonatkozik, annak aktivitása az összefüggésben automatikusan egységnyi lesz. Mivel az elektródpotenciál az elektronhoz való vonzódás erősségével kapcsolatos, a definícióból az is következik, hogy

mindig egy pozitívabb standard elektródpotenciálú elektrokémiai rendszer bír oxidáló hatással a negatívabb elektródpotenciálú rendszerre, és nem fordítva (az előbbi megfelelő speciesze redukálódik, az utóbbié oxidálódik).

2. Vegyipari műveletek

2.1. Abszorpció

Az abszorpció az a folyamat, amelynek során a gáz a határfelületen keresztül a folyadékba hatol, és ebben a folyadékban oldódik. Az **2.1. ábrán** egy ellenáramú abszorber vázlatos rajza látható. G térfogatáramú gázt vezetünk időegység alatt az oszlopon keresztül alulról felfelé. A gázban y_1 az abszorbeálandó komponens koncentrációja a belépésnél és ez y_2 értékre csökken az abszorpció során. A folyadékfázis mennyisége F és a benne az abszorbeált komponens koncentrációja x_2 értékről x_1 értékre nő. Az oszlop hossza Z , az oszlop hossza irányába mutató helykoordináta z .



2.1. ábra: Ellenáramú abszorber

Tekintsük azt az esetet, amikor a gáz az abszorbeált komponens kis mennyiségben tartalmazza, így feltételezhetjük, hogy a G és az F térfogatáram a z koordináta mentén állandó. Jelöljük dM -mel a komponensnek azt a mennyiségét, amely az oszlop dz hosszúságú szakaszában a gázfázisból a folyadékfázisba oldódik. Ez a mennyiség kifejezhető a dz hosszúságú oszlopban bekövetkező koncentráció változással (1-1.).

$$dM = G dy \quad 1-1.$$

A komponensmegmaradás elvének érvényesülése miatt:

$$14 \quad 1-2.$$

$$dM = G dy = F dx$$

A 1-2. egyenletből a munkavonal egyenlete (1-2.-1-3.) megállapítható, ha integráljuk az egyenlet mindkét oldalát az oszlop tetején uralkodó (x_2, y_2) és az adott z helyen lévő (x, y) koncentrációk között:

$$G \int_{y_2}^y dy = F \int_{x_2}^x dx \quad 1-3.$$

$$G (y - y_2) = F (x - x_2) \quad 1-4.$$

A szokásos alakban írva (1-5.):

$$y = \frac{F}{G} (x - x_2) + y_2 \quad 1-5.$$

A munkavonal kifejezi az oszlop adott helyén (z) a folyadék- és gázfázisban uralkodó koncentrációk (x, y) közötti kapcsolatot. Az 1-5. egyenlet megmutatja, hogy egy olyan koordinátarendszerben ahol x tengely a folyadékfázisbeli koncentráció, míg az y tengely a gázfázisbeli koncentráció a munkavonal egyenes (ha F és G állandó) és meredekségét az F/G arány határozza meg.

A gázfázisból a folyadékfázisba átadott komponens mennyisége az átadás kinetikai egyenletével is kifejezhető. Az átadott komponens mennyisége arányos az átadási tényezővel (β_G és β_F), az oszloprészben rendelkezésre álló érintkezési felülettel és a hajtóerővel (Δx vagy Δy). A dz hosszúságú oszlopban az érintkezési felület (1-6.):

$$A = \omega \frac{D^2 \pi}{4} dz \quad 1-6.$$

Ahol:

ω : fajlagos felület [m^2/m^3]

$\frac{D^2 \pi}{4} dz$: az oszloprész térfogata [m^3]

A hajtóerő és az átadási tényező folyadék-és gázkoncentrációval egyaránt kifejezhető. Írjuk fel gázkoncentrációval kifejezve a komponensmérleget (1-7.):

$$G dy = \beta_G \omega \frac{D^2 \pi}{4} \Delta y dz \quad 1-7.$$

Rendezzük át a 1-7. egyenletet és integráljuk (0, z) intervallumban, ha z helyen a koncentráció y:

$$\int_{y_2}^y \frac{dy}{\Delta y} = \frac{\beta_G \omega D^2 \pi}{4 G} \int_0^z dz = \frac{\beta_G \omega D^2 \pi}{4 G} z \quad 1-8.$$

Ha az 1-7. egyenletet teljes Z oszlop hosszúságúra integráljuk, akkor:

$$\int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{\Delta y} = \frac{\beta_G \omega D^2 \pi}{4 G} Z \quad 1-9.$$

1-9. egyenletet átrendezve kapjuk, az oszlop teljes magasságát (Z):

$$Z = \frac{4 G}{\beta_G \omega D^2 \pi} \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{\Delta y} = \frac{v_G^0}{\beta_G \omega} \int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{\Delta y} \quad 1-10.$$

Ahol:

$\frac{v_0}{\beta_G \omega} = H_G$: az átviteli egység magasság [m]

$\int_{y_2}^{y_1} \frac{dy}{\Delta y} = N_G$: átviteli egységyszám [db]

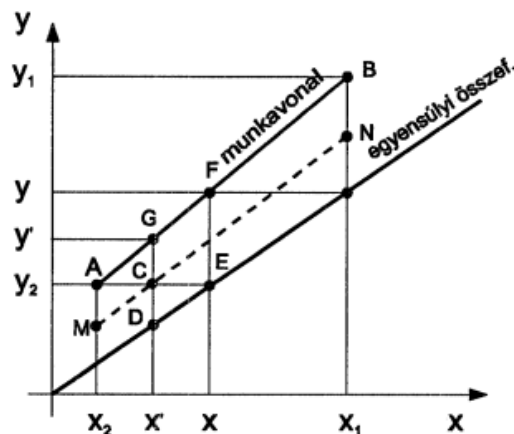
v_G^0 : üreskeresztmetszeti gázsebesség [m/s]

Az átviteli egység (N_G) a készülék azon része, ahol valamely fázis koncentrációváltozása éppen az átlagos hajtóerővel egyezik meg.

Az átviteli egységyszám meghatározható grafikus integrálással, analitikus integrálással és Baker-módszerrel grafikusán. A Baker-módszerrel az átviteli egységyszám meghatározása az **2.2. ábra** alapján a következőképpen történik.

Az AB szakasz a munkavonal. Először MN segédvonalat megrajzoljuk oly módon, hogy a munkavonal és az egyensúlyi görbe közötti y értékeket megfelezzük. Majd a szerkesztésnél úgy járunk el, hogy az A pontból kiindulva vízszintes irányba egyenest rajzolunk. Ezen az egyenesen felmérjük az AC szakasz kétszeresét és így kapjuk az E pontot. Az E pontból függőleges egyenest rajzolunk a munkavonalig, így kapjuk az FE szakaszt. Az oszlopnak az AEF háromszöggel jellemzett szakaszán a létrejövő koncentrációváltozás megegyezik az átlagos hajtóerővel, tehát az oszlopnak ezen szakaszát egy átviteli egységnek nevezzük. Az AB szakasz végpontjai között az előbb ismertetett módon megrajzolható

háromszögek száma az átviteli egységek száma. Ez a módszer csak akkor alkalmazható elfogadható pontossággal, ha az egyensúlyi görbe és a munkavonal közel egyenes.



2.2. ábra: Átviteli egységyszám meghatározás Baker-módszerrel

2.2. Desztilláció, rektifikálás

A desztilláció két vagy több illékony komponest tartalmazó homogén folyadékelegye elválasztása. Az elválasztás alapja, hogy az elegy komponenseinek azonos hőmérsékleten eltérő az egyensúlyi gőznyomása. Így ha az elegyet részlegesen elpárologtatjuk és a keletkező gőzöket kondenzáltatjuk, akkor a kiindulási elegytől eltérő összetételű folyadékot kapunk.

A rektifikálás folyadékelegyek szétválasztása ismételt desztilláció útján, melyet úgy valósítunk meg, hogy a folyadék és gőz ellenáramban közvetlenül érintkeznek egymással és közben a nem egyensúlyban lévő gőz és folyadék fázis között kétirányú komponens és hőátadás megy végbe. A továbbiakban kétkomponensű elegyek rektifikálásával foglalkozunk, ahol A az illékonyabb, B a nehezebb komponens.

Kétkomponensű elegy rektifikálása esetén a szétválaszthatóságra a relatív illékonyság jellemző (2-1.). Minél nagyobb α annál jobban elválasztható az elegy.

$$\alpha = \frac{p_A^0}{p_B^0} = \frac{y(1-x)}{x(1-y)} \quad 2-1.$$

Ahol:

p_A^0 : az A komponens egyensúlyi gőznyomása [bar]

p_B^0 : a B komponens egyensúlyi gőznyomása [bar]

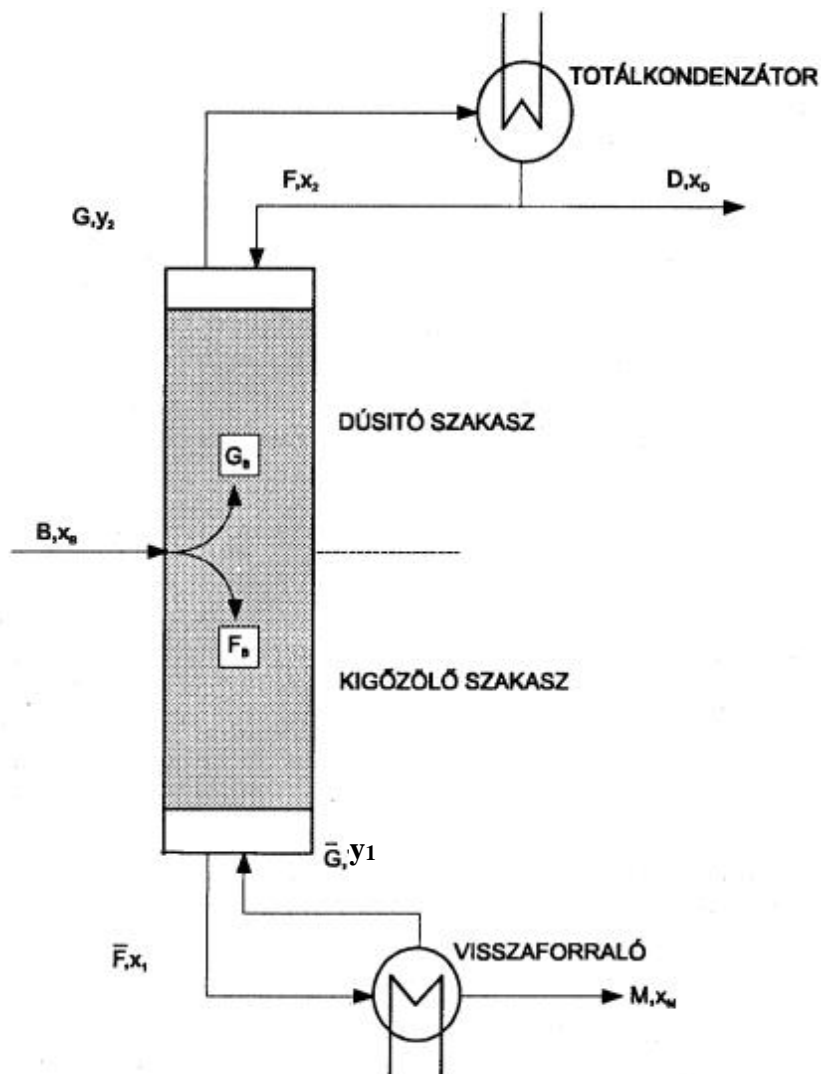
x: az A komponens molfrakciója a folyadékfázisban [-]

y: az A komponens molfrakciója a gázfázisban [-]

Kétkomponensű elegy rektifikálásának számításánál a következő egyszerűsítő feltételezéseket tesszük:

- A szétválasztandó elegy komponenseinek elegyedési hője zérus.
- Az elegy komponenseinek moláris párolgáshője ill. kondenzációs hője azonos (állandó moláris túlfolyás feltétele).
- Az oszlop tetejéről a kondenzátorba jutó gőz összetétele megegyezik a desztillátum összetételével (totálkondenzáció feltétele).
- A forralóból távozó gőz összetétele megegyezik a fenéktermék összetételével.

A rektifikáló oszlop anyagáramait a **2.3. ábrán** láthatjuk. B a betáplálás, D a desztillátum, M a maradék mólárama, az illékonyabb komponensre nézve az egyes fázis összetétele móltörtben kifejezve rendre x_B , x_D , x_M .



2.3. ábra: A rektifikáló oszlop anyagáramai

A teljes oszlop bruttó tömegmérlege:

$$B = D + M \quad 2-2.$$

Az illékonyabb komponensre vonatkozó fajlagos tömegmérleg:

$$B x_B = D x_D + M x_M \quad 2-3.$$

A rektifikáló oszlopot a betáplálás helye a számítások szempontjából két részre osztja. A két oszloprészben, a felső (dúsító) és az alsó (kigőzölő) szakaszban a fázisok tömegárama és aránya is eltérő. A rektifikáló oszlopra két munkavonal írható fel.

Felső munkavonal:

$$y = \frac{R}{R+1}x + \frac{1}{R+1}x_D \quad 2-4.$$

Ahol:

x: folyadékfázis összetétele [-]

y: gőzfázis összetétele [-]

x_D : desztillátum összetétele [-]

$R = \frac{F}{D}$: refluxarány, amely az oszlop tetején visszavezetett folyadék (F) mennyiségének és az elvett desztillátum (D) mennyiségének aránya [-]

Alsó munkavonal:

$$y = \frac{R_r + 1}{R_r}x - \frac{1}{R_r}x_M \quad 2-5.$$

Ahol:

x: folyadékfázis összetétele [-]

y: gőzfázis összetétele [-]

x_M : maradék összetétele [-]

$R_r = \frac{\bar{G}}{M}$: visszaforralási arány, amely az oszlop alján visszavezetett gőz (\bar{G}) mennyiségének és az elvett maradék (M) mennyiségének aránya [-]

A rektifikáló oszlop dúsító és kigőzőlő szakaszának találkozási pontjában, tehát a betáplálási tányéron a felső és alsó munkavonal egyenlete egyidejűleg érvényes.

Jellemezzük a betáplálás hőállapotát q -val:

$$q = \frac{F_B}{B} = \frac{Q}{\Delta H} \quad 2-6.$$

Ahol:

F_B : a betáplálás folyadék részének mólárama [kmol/h]

B : a teljes betáplálás mólárama [kmol/h]

Q : a betáplálás folyadék részének elpárologatásához szükséges hőmennyiség [kJ/kmol]

ΔH : a betáplált elegy párolgáshője [kJ/kmol]

A betáplálás helyére a q -vonal egyenlete adható meg:

$$y = \frac{q}{q-1}x - \frac{1}{q-1}x_B \quad 2-7.$$

Ahol:

x : folyadékfázis összetétele [-]

y : gőzfázis összetétele [-]

x_B : betáplálás összetétele [-]

Az egyensúlyi egység vagy elméleti tányérszám (N_{elm}) a készülék azon része, amelyről a távozó fázisok egymással termodinamikai egyensúlyban vannak. Az egyensúlyi egység szám McCabe-Thiele módszerrel meghatározható szerkesztéssel.

A minimális tányérszám (egyensúlyi egységének száma, N_{min}) adott elegy esetén az oszlop minőségi teljesítőképességét jellemzi. Ekkor az oszlop tetején elvett gőzöket lekondenzáltatjuk és teljes egészében visszavezetjük az oszlopba (nincs desztillátum elvétel), azaz a készüléket teljes reflux mellett üzemeltetjük. Ezen túl nincs betáplálás és maradék elvétel sem.

Teljes reflux esetén a számításra alkalmas a Fenske-egyenlet, ha az α relatív illékonyság értéke állandó.

$$N_{min} = \frac{\left[\frac{1-x_M}{1-x_D} \frac{x_D}{x_M} \right]}{\lg \alpha} - 1 \quad 2-8.$$

A minimális tányérszám meghatározható a McCabe-Thiele szerkesztéssel is.

2.3. Adszorpció

Az adszorpció olyan diffúziós folyamat, melynek során szilárd anyag (adszorbens) felületén gáz- vagy folyadékelegyből egy vagy több komponenst megkötünk. A megkötött komponenst adszorptívumnak nevezzük. Az adszorptívumot és az adszorbenst együtt adszorbeátumnak hívjuk. Az alkalmazott berendezés az adszorber.

Kétféle adszorpciót különböztetünk meg. Reverzibilis (fizikai) az adszorpció, ha minden hőmérséklethez, nyomáshoz, koncentrációhoz adott adszorbeált mennyiség tartozik. Irreverzibilis (kémiai) az adszorpció, ha a szilárd felületen kémiai reakció játszódik le, melynek következtében az adszorpció egyensúly nem megfordítható. Az adszorpció egyensúlyokat gázok (gőzök) adszorpciójakor a hőmérséklet, nyomás, koncentráció jelentősen befolyásolja, míg folyadékfázisból történő adszorpció esetén a nyomás hatása gyakorlatilag elhanyagolható, viszont a koncentráció és hőmérséklet hatása jelentős.

Az adszorpció egyensúly a szilárd fázis (adszorbens) és a fluidum komponenseinek hosszan tartó érintkezése után alakul ki és dinamikus jellegű. Ez azt jelenti, hogy időegység alatt ugyanannyi molekula deszorbeálódik a felületről, mint amennyi adszorbeálódik. Az adszorpció során hő szabadul fel, melyet adszorpció hőnek nevezünk.

A leggyakrabban alkalmazott adszorpció egyensúlyi izoterma a Langmuir-izoterma, amely monomolekuláris borítottságot, dinamikus adszorpció egyensúlyt tételezett fel, továbbá egyensúlyi állapotban egyenlőnek tekintette az adszorpció és a deszorpció sebességét. Tekintsünk egy egykomponensű adszorpciót, az i -edik komponens megkötődését gázfázisból a szilárd anyag felületén, melyre az alábbi Langmuir-féle adszorpció egyensúlyi izoterma érvényes.

$$q_i = \frac{a_i c_i}{1 + b_i c_i} \quad 3-1.$$

Ahol:

q_i : az i -edik komponens koncentrációja az adszorbensfázisban, [mol i komponens /kg adszorbens]

c_i : az i -edik komponens koncentrációja a folyadékfázisban, [mol i komponens /m³ folyadék]

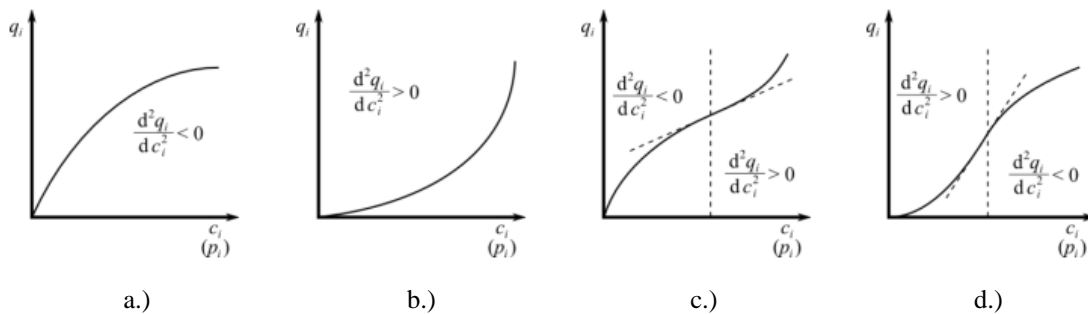
a_i : a Langmuir-egyenlet állandói, [m³ folyadék/kg adszorbens]

b_i : a Langmuir-egyenlet állandói, [m³ folyadék/mol i komponens]

Langmuir adszorpciós egyensúlyi izoterma több komponens esetén az alábbi általános egyenlettel írható le.

$$q_i = \frac{a_i c_i}{1 + \sum b_i c_i} \quad 3-2.$$

Az adszorpciós izoterma típusa lehet kedvező vagy kedvezőtlen vagy ezek együttesen (**2.4. ábra**). Az elnevezés abból ered, hogy a lépcsős koncentrációfüggvény alakja, az adszorpciós front a nyugvóréteges adszorpciós oszlopban történő elmozdulás során állandó alakú marad-e (kedvező), vagy elnyúlik (kedvezőtlen).



2.4. ábra: adszorpciós izotermák, ahol a.) kedvező, b.) kedvezőtlen, c.) kedvező-kedvezőtlen, d.) kedvezőtlen-kedvező

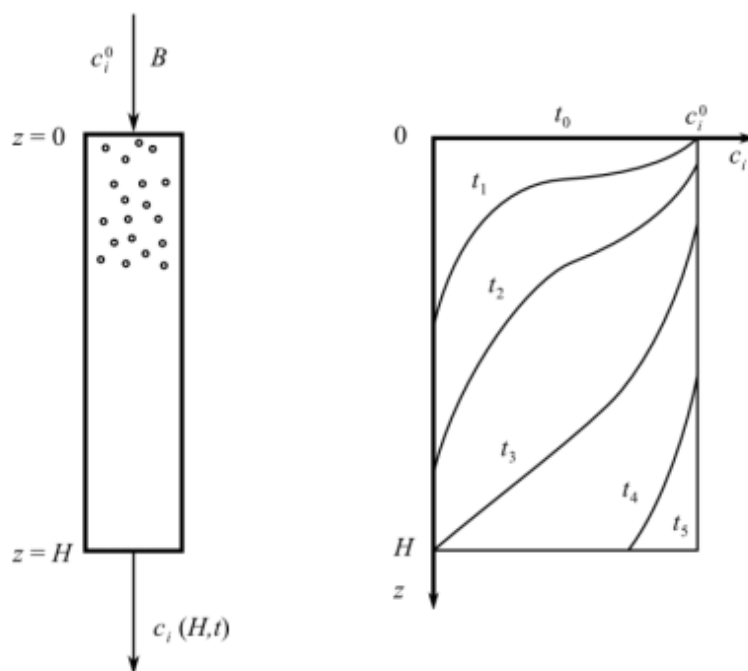
Az adszorpciós folyamatok egy komponens adszorpciója esetén is több egymást követő részfolyamatból állnak:

- külső diffúzió a Nernst-féle határrétegben,
- belső diffúzió a makro-, mezo-, mikropórusokban.
- adszorpciós megkötődés a szilárd fázis felületen van der Waals erővel.

Ezek közül a leglassúbb részfolyamat határozza meg a folyamat sebességét. Ennek megfelelően beszélhetünk külső diffúziós gátlású, illetve belső diffúziós gátlású adszorpcióról.

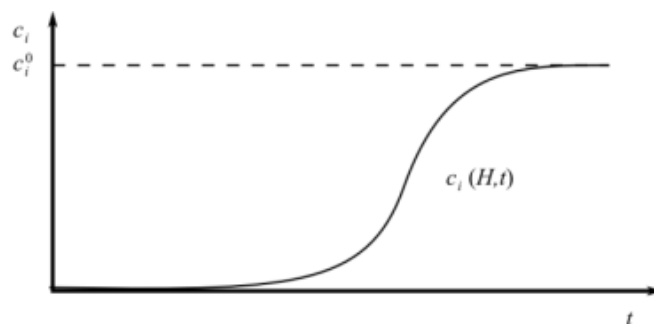
A komponens deszorpciója a fentiekkel ellentétes irányban, illetve sorrendben megy végbe.

A frontális adszorpció nyugvóréteges, differenciális fázisérítkeztesű művelet (**2.5. ábra**). Félfolyamatos üzemvitelű és koncentrációváltoztatást alkalmazunk lépcsős függvény szerint a műveleti egység belépő felületén.



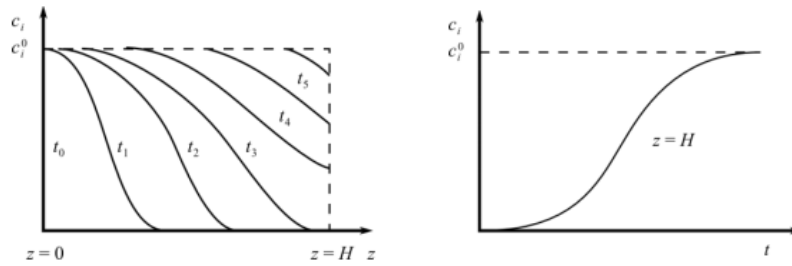
2.5. ábra: Nyugvórétegű adszorpció elvi folyamatábrája és az adszorpció front időbeli alakulása

Tételezzük fel, hogy az „i” komponenszt gázból távolítjuk el adszorpcióval, izoterm körülmények mellett. Az adszorbenst előzetesen tökéletesen regeneráltuk. Az „i” komponens, végighaladva az adszorbens tölteten, megkötődik, majd az adszorbens kapacitásának kimerülése után áttör az adszorpció oszlopon. Az áttörési görbe a $z = H$ helyen felvett koncentráció-idő görbe (2.6. ábra).



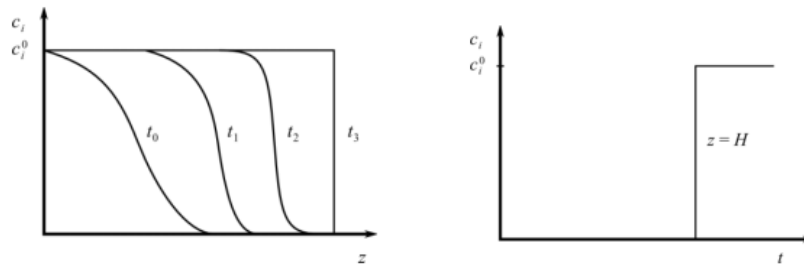
2.6. ábra: Áttörési görbe

Ha „i” komponens adszorpció egyensúlya kedvezőtlen, akkor a kis c_i koncentrációjú fluidumelemek az adszorbenstöltetben gyorsabban haladnak, mint a nagyobb c_i összetételű fluidumelemek. Tehát az adszorpció front elnyúlik az adszorbenstöltet hossza mentén és az áttörési görbe sem éles (2.7. ábra). Arányos alakú adszorpció frontok alakulnak ki.



2.7. ábra: Arányos alakú adszorpciós front, elnyúlt áttörési görbe

Kedvező adszorpciós egyensúly esetén a nagyobb c_i koncentrációjú folyadékelemek haladnak gyorsabban, mint a kis c_i összetételű folyadékelemek. Ennek következtében egy kezdeti, tetszőlegesen koncentrációeloszlásból lépcsős függvény alakul ki megfelelően hosszú adszorpciós oszlopban. Ezeket a frontokat állandó alakú adszorpciós frontoknak nevezzük. Az áttörési görbe alakja ebben az esetben lépcsős függvény lehet (2.8. ábra).



2.8. ábra: Állandó alakú adszorpciós front, éles áttörési görbe

2.4. Kristályosítás

A kristály olyan szilárd test, amelynek elemei (ionjai, atomjai, molekulái) bizonyos rendezettséget, ún. térrács alakzatot mutatnak. Az amorf anyagok teljesen rendezetlen és rendszertelen felépítésű szilárd anyagok (pl. üveg, viasz, szurok).

Kristályosítás az a folyamat, melynek során folyadék halmazállapotú komponenselegyből szilárd halmazállapotú anyagot választunk el.

A kristályosítás célja:

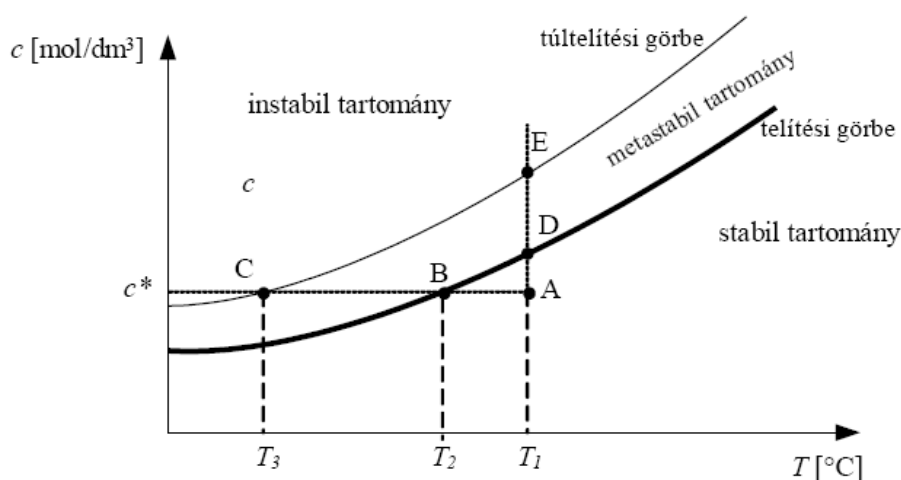
- segédanyagból történő kinyerés
- elválasztás más anyagoktól
- tisztítás
- formaadás

A kristályosítás történhet folyadékfázisból (oldatból vagy olvadékból) és gázfázisból. Továbbiakban az oldatból való kristályosítást tárgyaljuk.

Az az anyagmennyiség, amelyet adott körülmények között az adott oldószer feloldani képes oldhatóságnak nevezünk. Leggyakrabban g oldott anyag/100 g oldószer egységben adjuk meg. A hőmérséklet függvényében ábrázolva az oldhatóságot az oldhatósági görbét kapjuk.

Ha adott hőmérsékleten, adott mennyiségű oldószerben egy bizonyos anyagból a maximális mennyiségű anyagot oldunk (az oldatóság szerint), akkor telített oldatot kapunk. Ha maximálisnál kevesebb anyagot oldunk akkor telítetlen oldat. Sok anyag képes túltelített oldatot képezni, amikor a telítettnél több anyag van oldva az oldószerben. Az oldat instabil, nincs egyensúlyban.

Ahhoz, hogy a kristályképződés meginduljon egyrészt az oldat túltelítettsége szükséges, másrészt igen apró „kristálymagokra”, „gócokra” van szükség. A kristálymagképződés megindítható az oldat túlhűtésével, keveréssel, rázással, de legegyszerűbben néhány szem apró kristály beszórásával (oltókristály). A **2.9. ábrán** a túltelítési és telítési görbe látható.



2.9. ábra: A túltelítési és telítési görbe

A **2.9. ábrán** látható, hogy a telítési görbe feletti rész két tartományra a metastabil és az instabil tartományra osztható fel. Az egyensúlyi telítési görbe alatti stabil tartomány a telítetlen oldat mezeje. Itt sem kristályképződés, sem kristálynövekedés nincs.

A metastabil tartományban, amelyet a telítési és a túltelítési görbe határol, a kristályképződés nem valószínű, de a meglévő szemcsék növekednek.

Az instabil tartományban spontán kristályképződés van, itt a magképződés sebessége hirtelen növekszik.

A kristályosítás elvileg kétlépcsős folyamat, első lépésben a kristálymagok, kristálygócok keletkeznek, a második lépcsőben a kristályok növekednek. A gyakorlatban e folyamatok egyidejűleg mennek végbe.

A gócképződés az a jelenség, amelynek során valamely metastabilis, vagy instabil állapotú egyfázisú rendszerben az anyafázistól elkülönülnek a már stabilis új fázis parányi részecskéi. Lehet primer és szekunder gócképződés. Akkor beszélünk elsődleges vagy primer gócképződésről amikor a szilárd komponensmentes rendszerben indul meg a kristálykiválás. Homogén gócképződésről akkor beszélünk, ha a rendszerben heterogén katalitikus hatású idegen komponens nincs jelen. Heterogén gócképződés idegen anyag jelenlétében megy végbe.

Szekunder vagy másodlagos gócképződésről akkor beszélünk, ha az oldatban már van jelen kristály. Az elsődlegesen keletkezett kristálymag felületének környezetében a felületaktív erők hatására a kristályrácsba még be nem épült, kisméretű molekulacsoportok helyezkednek el. Kevert folyadékrendszerekben a változó helyi turbulencia okozta nyíróerő elég a kisméretű részecskék leszakítására, amelyek túltelített környezetbe jutva nagy valószínűséggel kristálygóccá válnak. Kimutatták, hogy a másodlagos gócképződés sebessége függ a keverés intenzitásától, a hűtés sebességétől és túlhűtés (túltelítés) mértékétől, de független a primer kristálymagok számától, méretétől, kémiai karakterétől és felületi tulajdonságaitól.

A gócképződés indukálására legáltalánosabban bevált módszer a túltelített folyadék beoltása. Az oltókristályt a finoman bolygatott folyadékban egyenletesen kell elszórni, a rendszer hűtését pedig ezzel egyidejűleg óvatosan kell szabályozni. Az oltókristály mennyiségét az oldat túltelítettsége, a várt termék mennyisége és a termék kívánt kristálymérete határozza meg. Az oltókristály leggyakrabban maga a finom porrá aprított késztermék. Gyakran az oltókristály a késztermékkel izomorf anyag. Az oltókristály akkor hatásos, ha az oltókristály rácsadata 15 %-on belül egyezik a kristályosítandó termék rácsadatával. Természetesen, ha az oltókristály összetétele kristályosítandó komponensével azonos, ilyen probléma nincs.

A kristályok növekedése a magok körül indul meg. Ha sok mag van az oldatban, akkor rendszerint aprószemcsés (lemez vagy tű alakú) kristály képződik. A kristályok alakja és nagysága lényegesen befolyásolja további feldolgozásukat. Ha pl. szűrési művelet következik a kristályosítás után, akkor célszerű, hogy kifejlett, határozott alakú, nagyszemcsés kristályok képződjenek. Ezeket ugyanis könnyebb leszűrni.

2.5. Extrakció

Extrakciónak nevezzük egy vagy több komponens folyadékból vagy szilárd anyagból való eltávolítását szelektív oldószer segítségével. A szelektív oldószert úgy válasszuk meg, hogy abban csupán az eltávolítandó komponensek oldódjanak jól és lényegesen kevésbé (gyakorlatilag ne) oldódjanak a kiindulási anyag egyéb komponensei.

Beszélhetünk:

- folyadék-folyadék extrakcióról
- szilárd-folyadék extrakcióról
- szuperkritikus extrakcióról

Folyadék- folyadék extrakció célja, valamely folyadékelegy komponenseinek szétválasztása olyan oldószerezrel, amely bizonyos komponenseket nem old, illetve azokkal nem elegyedik, másokat viszont jól old. Előnyösen alkalmazható ha:

- a folyadékelegy desztillációval vagy rektifikálással nem választható szét
- a desztillációs vagy más eljárás gazdaságtalan
- kinyerendő komponens hőre érzékeny, magasabb hőmérsékleten bomlik
- az oldószer könnyen visszanyerhető legyen (rektifikálással, bepárlással)

Az oldószer megválasztásakor a fő törekvés, hogy olyan oldószert („S”) találjunk, mely a szétválasztandó „A” (tömbfázis) és „B” (kinyerendő komponens) kétkomponensű folyadékelegy „B” komponensét lehetőleg korlátlanul oldja és legyen szelektív a „B” komponensre nézve. Az „A” és „S” fő fázisok sűrűsége egymástól legalább 20 %-kal eltérjen, a kölcsönös oldhatóságuk gyakorlatilag elhanyagolható legyen. Ez esetben a „B” komponenstől megtisztított visszamaradt „A” folyadékfázis a raffinátum („R”), míg a komponenssel szennyezett „S” oldószer az extraktum („E”). Az extraktum közvetlenül hasznosítható vagy a „B” komponens az extraktumból egyszerű eljárással kinyerhető. A visszanyert (regenerált) oldószert az extrakcióban újra felhasználják.

A folyadék-folyadék extrakció során tehát két nem elegyedő folyadék között történik anyagátadás. Használata elterjedt a kőolajfeldolgozó és petrokémiai iparban és a gyógyszeriparban.

Egy egyszerű háromkomponensű rendszerre a Nernst-féle megoszlási hányados (m) definíciója (5-1.):

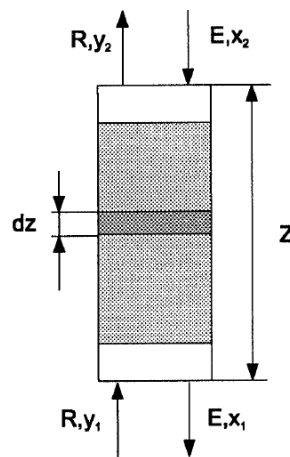
$$m = \frac{y}{x} \quad 5-1.$$

Ahol:

y : a megoszló anyag egyensúlyi koncentrációja az extraktumban (tömegtört) [-]

x : a megoszló anyag egyensúlyi koncentrációja a raffinátumban (tömegtört) [-]

Folyamatos fázisérítkeztetésű extrakció a többi kétfázisú művelethez hasonlóan tárgyalható. Az ellenáramú extrakciós oszlop áramait az **2.10. ábra** szemlélteti.



2.10. ábra: Ellenáramú extrakciós oszlop

A szilárd-folyadék extrakció egy olyan vegyipari művelet, amelynek során szilárd anyagot intenzív érintkeztetésbe hozunk egy olyan oldószerrel, amely bizonyos komponenseket (kulcskomponens) a szilárd anyagból kiold, de másokat nem (mátrix).

Az extrakció kezdetén az előkészített szilárd anyagot érintkeztetik a kiválasztott oldószerrel. A folyadék kitölti a vázanyag pórusait. A célkomponens feloldódik az oldószerben. Ennek eredményeként koncentrációkülönbség alakul ki a vázanyagban levő folyadék és a külső folyadék között, amelynek hatására diffúziós anyagáram jön létre. Az oldott anyag tehát diffúzióval, a szilárd vázanyagon keresztül jut a külső oldószerbe. Mivel a vázanyagban és azon kívül ugyanaz a folyadék van, elegendő hosszú érintkeztetési idő múlva koncentrációkiegyenlítés jön létre. Az oldható komponensek kivonása után az oldószer visszanyerik a kilúgozott vázanyagból (raffinátum). Az extraktorból távozó oldatból (extraktum) is

elválasztják az oldószert. A visszanyert (regenerált) oldószert az extrakcióban újra felhasználják.

A folyamatos szilár-folyadék extraktorokat működésük alapján két csoportba sorolhatjuk. Az egyik az immerziós eljárások, amikor a szilárd anyagot belemerítik az oldószerbe és szállítócsigával vagy keverő-szerkezettel, az oldószerrel ellenáramban mozgatják. A szilárd anyag mozog, ezért nincs különös követelmény a töltet szerkezetével kapcsolatban. Hátránya, hogy az apró, finom részecskéket az extraktum magával viszi. Az extraktumban a szilárdanyag-tartalom elérheti az 5%-ot is. Ezért az oldatot feldolgozás előtt gondosan meg kell szűrni. A másik eset a perkolációs eljárások, amikor az oldószert átfolyatják a nyugvó szilárd rétegen. Mivel a töltetnek jelentős az áramlási ellenállása, a réteg vastagsága nem lehet tetszőlegesen nagy. A részecskék egymáshoz képest nem mozognak, így nincs mechanikai kopás, aprózódás. A töltet réteg megszűri az oldatot, az extraktum nem tartalmaz szilárd részecskéket.

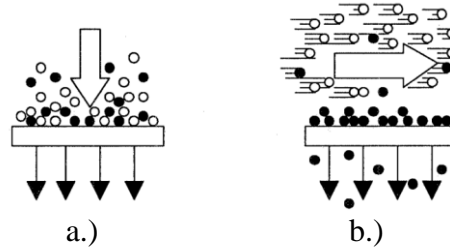
A szuperkritikus extrakciónál az oldószer van szuperkritikus állapotban (a szuperkritikus nyomás és szuperkritikus hőmérséklet felett). A szuperkritikus állapotú oldószer fizikai-kémiai tulajdonságai a gáz és folyadék állapot között átmenetet mutatják. A viszkozitása egy nagyságrenddel kisebb, a diffúziós állandója egy nagyságrenddel nagyobb mint folyadékfázisban. Az anyagátadás kedvezőbb lesz a folyadéknál, oldóképessége nagyságrendekkel nő. A nyomás és a hőmérséklet megfelelő változtatásával a fluidum oldóképessége szabályozható. Így, ha az oldószer nyomása és a hőmérséklete lecsökken, akkor az oldott anyag kiválik az oldószerből, azaz az oldott anyag elválasztása az oldószertől egyszerű. Az extrakt elválasztása után az oldószer újra felhasználható. Ezáltal kevesebb hulladék képződik és a kapott extraktum oldószertmentes. Az oldószer veszteség minimális. Növényi olajok kivonására, alkoholmentes italok és koffeinmentes kávé előállítására alkalmazzák.

2.6. Membránszeparáció

A membrán szó latin eredetű („*membrana*”), eredeti jelentése hártya, héj. A műszaki életben membránnak valamilyen külső erővel kifeszített rugalmas válaszfalat nevezünk. A vegyiparban a membrán technológiai fogalom. Olyan technológiai válaszfalat jelöl, amely szelektív átteresztő képességénél fogva a feldolgozandó anyagok alkotórészeinek szétválasztását többnyire kémiai átalakulás nélkül teszi lehetővé. Lényegében a membrán olyan közeg,

amelyen a feldolgozandó fázis komponensei, vagy részecskéi nem, illetve különböző sebességgel jutnak át.

A membránszeparációs folyamatokat igen élesen el kell különíteni a hozzájuk igen hasonlító szűréstől (**2.11. ábra**). Szűrőkor a szűrőre feladott anyag a nyomáskülönbség hatására a szűrő felületére merőleges irányban mozog, az elválasztandó keverékek legalább egy komponense a szűrőközeg belsejében vagy felületén gyűlik össze, ezért a szűrő fokozatosan eltömődik, és teljesítménye egyre csökken.



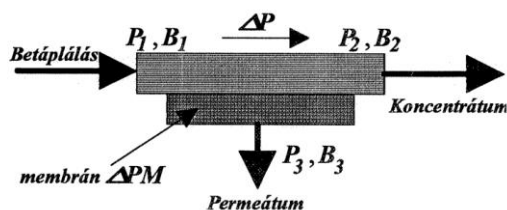
2.11. ábra: A szűrés és a membrános elválasztás összehasonlítása, ahol a.) klasszikus szűrés, b.) membránszűrés

A membránszűrés eljáráásokban a szűrendő oldat eláramlik a féligáteresztő membrán mellett, miközben a membrán két oldala között fennálló nyomáskülönbség hatására az oldószer illetve a membrán pórusméretétől függően az oldott molekulák egy része is átszivárog a membrán alacsonyabb nyomású oldalára. A membrán az eredeti anyagáramot két részre osztja: a permeátum az a fázis, amely áthatol a membránon és a koncentrátum (v. retentátum), vagyis az az oldat, amely megmarad a membrán betáplálási oldalán.

A membránnak azt a tulajdonságát, hogy a különböző anyagokat különböző mértékben engedik át, permszelektivitásnak nevezzük. A membrán szelektivitása folytán mindkét anyagáram összetételét megváltoztatja. Az elválasztásra felhasználhatjuk a nyomásgradiensén kívül a kémiai potenciál, a hőmérséklet és az elektromos potenciálkülönbség gradiensét is.

A membrán két oldala közötti nyomáskülönbség hatására végbemenő finomkémiai szűrés vagy membrán-szeparációs technikákat a következőképpen csoportosíthatjuk: mikroszűrés, ultraszűrés, nanoszűrés és fordított ozmózis.

Jelöljük a szűrőegységre feladott anyalúg mennyiségét B_1 -gyel, nyomását p_1 -gyel, a koncentrátum mennyiségét B_2 -vel, nyomását p_2 -vel, a permeátum mennyiségét B_3 -mal, nyomását pedig p_3 -mal, ahogy ezt a **2.12. ábrán** láthatjuk.



2.12. ábra: Membrán szűrőegység nyomás és áramlási viszonyai

Egy finomkémiai szűrőegység által produkált permeátum és koncentrátum mennyiségét, vagyis a szűrő teljesítményét és elválasztó képességét két egymással konkuráló folyamat szabja meg, úgymint a membrán áteresztő képessége, vagyis az idő és felületegységen átszivárgó permeátum mennyisége (fluxus) a membrán-pórus és molekula méreten túl elsősorban a membrán két oldala közötti ΔP_M átlagos nyomáskülönbségtől függ, melyet transzmembrán nyomás-különbségnek (6-1.) neveznek.

$$\Delta P_M = \frac{p_1 + p_3}{2} - p_2 \quad 6-1.$$

Ahol:

p_1 : a belépő áram nyomása [bar]

p_2 : a koncentrátum áram nyomása [bar]

p_3 : a permeátum áram nyomása [bar]

A berendezés átbocsájító képességét viszont az anyalúg belépési pontján és a koncentrátum kilépési pontján mért nyomások ΔP különbsége szabja meg. Nagy ΔP nagy B_2 áramot, és ezzel jó tisztító hatást eredményez, de a kisebb ΔP_M miatt kisebb lesz a B_3 permeátum mennyisége. Ha ΔP_M nagy, kezdetben nagy lesz a membránon átszivárgó B_3 permeátum fluxusa is. A kis ΔP azonban alacsony B_2 áramot eredményez, amely nem tisztítja megfelelő mértékben a membrán felületét, ezért a permeátum fluxus gyorsan egy csökkent értékre áll be.

A szűrőegység optimális nyomás- és áramlási viszonyai természetesen a feldolgozandó oldatok koncentrációjától is függenek. Minél kisebb a feldolgozandó oldat koncentrációja, annál nagyobb permeátum fluxus érhető el egy adott ΔP_M érték mellett.

Általában egy komponens kiszűrésénél a membrán használhatóságát a visszatartással (R) fejezik ki. A visszatartás komponens specifikus, mértékét a kiindulási és a permeátumkoncentráció ismeretében az alábbi képlettel számoljuk (6-2.).

6-2.

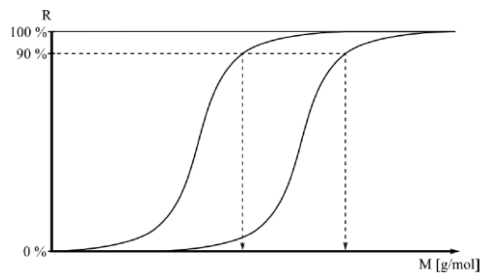
$$R = \frac{C_F - C_P}{C_F}$$

Ahol:

c_P : a permeátum koncentrációja [mol/dm³, g/dm³]

c_F : a betáplálás koncentrációja [mol/dm³, g/dm³]

A vágási érték az a molekulatömeg, amelyet a membrán 90%-ban visszatart. A vágási értéket célszerű fenntartásokkal kezelni, hiszen ha megnézzük a **2.13. ábrát**, arról jól látható, hogy egy membrán visszatartása egy adott molekulatömeg-tartományban mozog. Léteznek éles vágási értékkel rendelkező membránok, amelyeknél a visszatartott molekulák tömege egy szűk tartományon belül mozog, azonban léteznek „diffúz” vágási értékkel rendelkező membránok, amelyeknél ez a tartomány kiszélesedik.



2.13. ábra: Membrán szűrőegység nyomás és áramlási viszonyai

2.7. Szárítás

A szárítás szűkebb értelemben az a művelet, melynek során valamilyen szilárd anyag nedvességtartalmát csökkentjük oly módon, hogy a nedvességet energiaráfordítással elpárologtatjuk, ezzel az a gázfázisba kerül, majd a gázzal együtt elhagyja a berendezést. Bővebb értelemben beszélhetünk folyadékok és gázok szárításáról is. A szárítás ez esetben is úgy történik, hogy a nedvesség a szárítandó anyagból fázisváltozás mellett egy segédfázisba kerül, majd azzal együtt elhagyja a szárító egységet. Mivel a szárítás minden esetben a nedvesség fázisváltozásával jár együtt, ezért a szárítási művelet során jelentős energia szükséglettel vagy felszabadulással kell számolnunk.

A szárítás lényegében hő transzporttal indukált nedvesség transzport, ezért a művelet megtervezésénél a hő és a nedvesség mozgását együttesen kell figyelembe venni.

A továbbiakban a szilárd anyagok szárítását tárgyaljuk részletesebben. A szárítandó anyagban lévő folyadék elpárologtatásához hőt kell befektetni. A hőközlés módja szerint a szárítási eljárások két legfontosabb csoportja:

- konvekciós szárítás: a szárító berendezésbe folyamatosan gázáramot vezetünk be, melynek szerepe kettős. Egyfelől biztosítja a nedvesség elpárologtatásához szükséges energiát, másfelől segédfázisként magával viszi a szárítandó anyagból elpárolgó vízgőzt. A szárítandó anyagot tálcákra helyezik el. A szárítandó anyag fölött áramlik az alacsony nedvességtartalmú szárító gáz, amely az esetek többségében levegő vagy füstgáz.
- kontakt szárítás: a szárítandó anyagot fűthető tálcákra helyezik el. A hő a tartószerkezeten keresztül jut a szemcsés rétegbe. A szilárd fázisból elpárolgó nedvesség a gáztérbe kerül. A szárítón folyamatosan kis térfogatáramban levegőt vezetnek át abból a célból, hogy a gázfázisba került nedvesség az öblítő levegővel együtt elhagyhassa a berendezést.

A száraz levegő és vízgőz keverékét nedves levegőnek nevezzük. A nedves levegő nedvességtartalmának megállapításánál abszolút és relatív nedvesség-tartalmat különböztetünk meg. A levegő x abszolút nedvességtartalma alatt 1 kg száraz levegőben lévő kilogrammban kifejezett vízgőz mennyiséget értünk (7-1.).

$$x = \frac{18}{29} \frac{p_w}{P - p_w} \quad 7-1.$$

Ahol:

P : össznyomás (bar)

p_w : a vízgőz parciális nyomása (bar)

A relatív nedvességtartalom (φ) alatt a vízgőz parciális nyomásának és az adott hőmérsékleten a vízgőz tenziójának (p_w^0) hányadosa (7-2.).

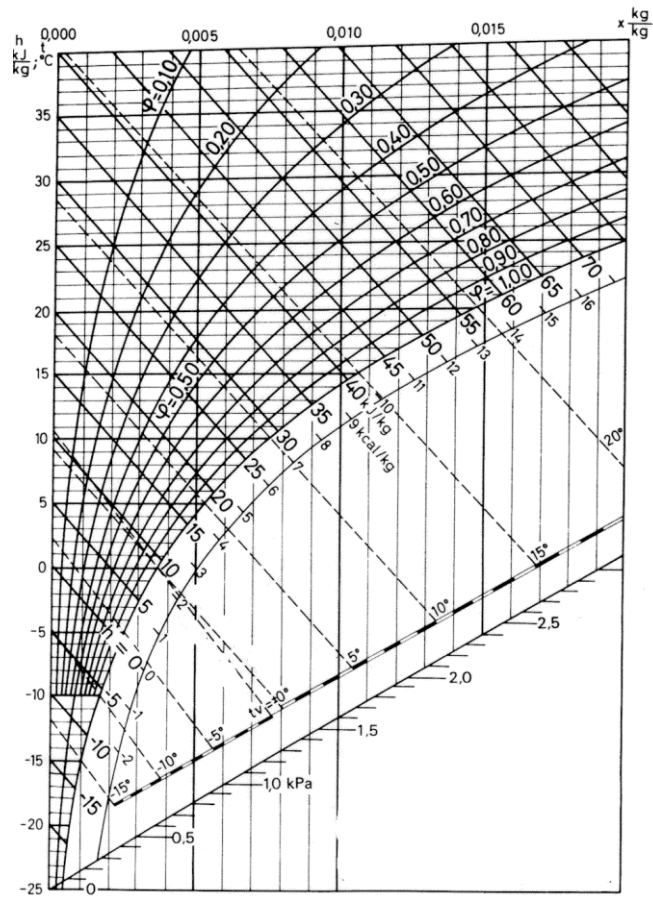
$$\varphi = \frac{p_w}{p_w^0} \quad 7-2.$$

A nedvességtartalmon kívül a nedves levegő fontos jellemzője a hőmérséklet. A mérés technikától függően a nedves levegő hőmérsékletével kapcsolatban három féle hőmérsékletről szokás beszélni. A T_{sz} száraz hőmérséklet alatt a levegő közönséges hőmérsékletével

mérhető $^{\circ}\text{C}$ -ban kifejezett hőmérsékletét értjük. A T_H harmatponti hőmérséklet, ez az a hőmérséklet ameddig a nedves levegőt konstans abszolút nedvesség tartalom mellett hűteni kell, hogy az a vízgőzre nézve telítetté váljon. Harmatpont alatti hőmérsékleteken a vízgőz a levegőből kikondenzálódik. A T_N nedves hőmérséklet az a hőmérséklet, amelyen valamely nedves felület – legtöbbször vízfelület – egyensúlyba kerül a nedves levegővel, oly módon, hogy a felületről eltávozó anyagáramlással elvitt hő egyenlővé válik a felületre érkező hőárammal. Az így bekövetkező telítődési folyamatban a levegő entalpiája nem változik.

A nedves levegő h fajlagos (1kg száraz levegőre vonatkozó) entalpiája nem közvetlenül mérhető mennyiség. A nedves levegő entalpiája a levegő és a levegőben lévő vízgőz entalpiájából tevődik össze.

A nedves levegő hőtartalom diagramja vagy megalkotója alapján Mollier-diagramnak látható a **2.14. ábrán**. A diagram ferdeszögű koordinátarendszerben készül, az ordinátatengelyen az entalpia (kJ/kg), az abszcisszán pedig a levegő abszolút nedvességtartalmát (kg/kg) jelöljük. Az állandó hőmérsékleten végbemenő állapotváltozást jelző vonalak (izotermavonalak) a hőmérséklet emelkedésével legyezőszerűen szétnyílnak és nem párhuzamosak. A diagrammon megtaláljuk még a különböző relatív nedvességtartalomhoz (φ) tartozó görbéket is. A nedves levegő állapot diagrammján a jellemző paraméterek változása rendkívül szemléletesen ábrázolható, víz-levegő rendszerre vonatkozik.



2.14. ábra: Mollier diagram

3. Transzportfolyamatok

3.1. Transzportfolyamatok alapjai

A transzportfolyamatok tárgya a vegyipari berendezésekben, műveleti egységekben lezajló folyamatok értelmezése és kvantitatív leírása.

3.1.1. Extenzív és intenzív állapotjelzők

A vegyipari rendszerek leírására olyan tulajdonságok használhatóak fel, amelyek egyértelmű függvényei a rendszernek. Ezeket állapotjelzőknek nevezzük. Az állapotjelzők lehetnek:

- extenzív állapotjelzők függenek a rendszer méretétől, additívak; pl.: tömeg, anyagmennyiség, töltés, entrópi, impulzus, energia...stb.
- intenzív állapotjelzők: nem függenek a rendszer méretétől, nem additívak; pl.: nyomás, hőmérséklet, koncentráció, sűrűség... stb.

A vegyiparban termelésben alapanyagból terméket állítunk elő. A termelés folyamán az összetétel megváltozik. Az összetétel változása bekövetkezhet kémiai reakció által – ilyenkor új anyagi minőségek jelennek meg – vagy valamilyen szeparációs technika következtében. A vegyiparban előforduló anyagokat fázisoknak nevezzük. A fázis a tér azon része, ahol az anyagot jellemző intenzív állapotjelző a tér folytonos függvénye (pl. a levegőben, mint fázisban ha mérjük a helykoordináta mentén a hőmérsékletet egy folytonos függvényt kapunk). Ha több fázis van jelen a rendszerben a fázishatáron a jellemző tulajdonságfüggvénynek szakadása van (pl. egy zagyban, ahol szilárd szemcsék vannak folyadékban diszpergálva, ha mérjük a sűrűséget a helykoordináta mentén, akkor a folyadék-szilár fázis határfelületen a sűrűségfüggvénynek szakadása van.)

Vegyipari műveleti egységbe bevitt fázison fizikai vagy kémiai változást szeretnénk előidézni. Változás csak úgy következhet be, ha a fázishoz anyagot, komponenst, energiát vagy mozgásmennyiséget adunk. E mennyiségek extenzív mennyiségek, ami azt jelenti, hogy e mennyiségekre, vagyis a tömegre, komponensre, energiára, impulzusra megmaradási tételek vonatkoznak, így a fázis tömegére, energiataralmára, valamely kémiai anyagtartalmára és mozgásmennyiségére mérleget lehet felírni. A transzportfolyamatok feladata e négy extenzív mennyiség mozgásának elemzése. A lényeges elemek kiemelése, a kevésbé lényeges elemek

elhanyagolása után lehetőség nyílik az extenzív mennyiségek térbeli és időbeli eloszlásának kvantitatív leírására.

3.1.2. Extenzív mennyiség sűrűsége

Egy fázisban bekövetkező változások jól nyomon követhetők, ha pontról pontra megadjuk az extenzív mennyiségek sűrűségét a fázisban. Egy adott $P(x,y,z)$ pontban, adott t időpillanatban bármely extenzív mennyiség sűrűségét megállapíthatjuk úgy, hogy veszünk egy, a P pontot körülölelő kontrolltérfogatot, meghatározzuk a kontrolltérfogatban lévő extenzív mennyiséget, osztjuk a mennyiséget a kontrolltérfogattal és képezzük a hányados határértékét, midőn a kontrolltérfogat rázsugorodik a P pontra.

A térfogategységre jutó tömeg, a sűrűség (ρ); az i -edik kémiai komponens mólokban kifejezett sűrűsége a c_i mól koncentráció; a térfogategységre jutó entalpiát megkapjuk, ha a tömegegységre jutó, h fajlagos entalpiát szorozzuk a sűrűséggel; a térfogategységre jutó mozgásmennyiség a sűrűség és sebesség szorzataként adódik. Tehát általánosan valamennyi extenzív mennyiség sűrűsége előállítható, ha az extenzív mennyiség tömegfajlagosát megszorozzuk a tömeg sűrűséggel.

Az előzőek alapján adott időpillanatban egy készülékben lévő anyag jellemzésére elég megadni a készüléktérfogatban a ρ sűrűség, a c_i koncentráció, a h entalpia értékét és a sebességet. Ez utóbbi állapotjellemzők intenzív paraméterek, értékük nem függ a fázis kiterjedésétől.

A készülékben lévő anyag, komponens, entalpia vagy a mozgásmennyiség az előzőekben definiált, térfogatra vonatkozó intenzív állapotjellemzők térfogati integráljaként számíthatók ki.

3.1.3. Áram, áramsűrűség

Ha a készülék képzeletbeli burkán egy A felületen valamilyen extenzív mennyiséget, rendszerint anyagot viszünk be a berendezésbe (az extenzív mennyiség mozog), akkor az extenzív mennyiség áramáról (J) beszélünk. Áram ezek szerint egy adott felületen időegység alatt áthaladt extenzív mennyiség. Az áram definíciója kapcsán elsősorban az foglalkoztatott bennünket, hogy egy adott, esetenként elég nagy felületen összességében mennyi anyag, energia, impulzus megy át, de nem foglalkozhatunk azzal a kérdéssel, hogy az illető extenzív mennyiség vajon egyenletes intenzitással megy át a felületen, vagy az áram intenzitásának valamilyen eloszlása van. Az áramintenzitás részletesebb elemzése az áramsűrűség (j) definiálásával válik lehetővé. Áramsűrűsége az áram irányára merőleges egységnyi

keresztmetszeten átáramló extenzív mennyiséget értjük. Az áramsűrűség vektoriális jellegű mennyiség, iránya a mozgás irányával esik egybe.

Az áram és az áramsűrűség között úgy teremthetünk könnyen kapcsolatot, ha a kérdéses A felületet dA elemi felületdarabokra bontjuk, és a felületelemeket vektoriális mennyiségként kezeljük. A dA felületelemet jellemző vektor iránya a felületelem normálisának irányába mutat, nagysága pedig a felületelem nagyságával arányos. Egy dA felületelemen átáramló dJ extenzív mennyiség $dJ = j \cdot dA$. Így a J áram ezek után:

$$J = \int_A \mathbf{j} \cdot d\mathbf{A}$$

3.1.4. Extenzív mennyiség mozgásának okai

Most már csak az a kérdés milyen mechanizmussal megy át egy extenzív mennyiség egy adott felületen. Extenzív mennyiségek mozgásának okai a következők:

- konvektív: az extenzív mennyiségek mozgásának azt a részét, amely az anyag makroszkopikus mozgásából ered, konvektív áramnak nevezzük. A konvektív áram létezésének oka a közeg mozgása, a közeg mozgásának oka pedig az, hogy azt valamikor mozgásba hoztuk, és a mozgás lassulásához illetve megszűnéséhez vezető, áramlási veszteségeket, sebesség csökkenést okozó erőket pedig folyamatosan, valamilyen külső erővel kompenzáljuk.
- vezetések (konduktív): az extenzív mennyiség egy nyugvó közegen keresztül jutott el a egyik helyről a másikra. Az ilyen típusú mozgás oka a fázist alkotó molekulák hő mozgásában (Brown mozgás) keresendő. A fázisban lévő energia- komponens- és impulzussűrűség inhomogenitása révén a rendszer kiegyenlítő folyamatokat indít el ennek következtében az extenzív mennyiség mozog. Az extenzív mennyiségek ezt az inhomogenitások kiegyenlítésre irányuló áramát vezetések áramának nevezzük.
- átadásos: két fázis határfelületén keresztül megy végbe. A határfelülethez extenzív mennyiség csak sűrűség gradiens hatására vezetések árammal érkezik, és ugyancsak vezetések árammal távozik a határfelületről a másik fázisban. Az átszármaztatott extenzív mennyiség valahogyan mindkét fázisbeli vezetési együtthatóktól, és a fázisokban kialakult sűrűség-gradiensektől függ. A két vezetések áram helyett a változók számának csökkentése érdekében használjuk az átadásos áramokat.

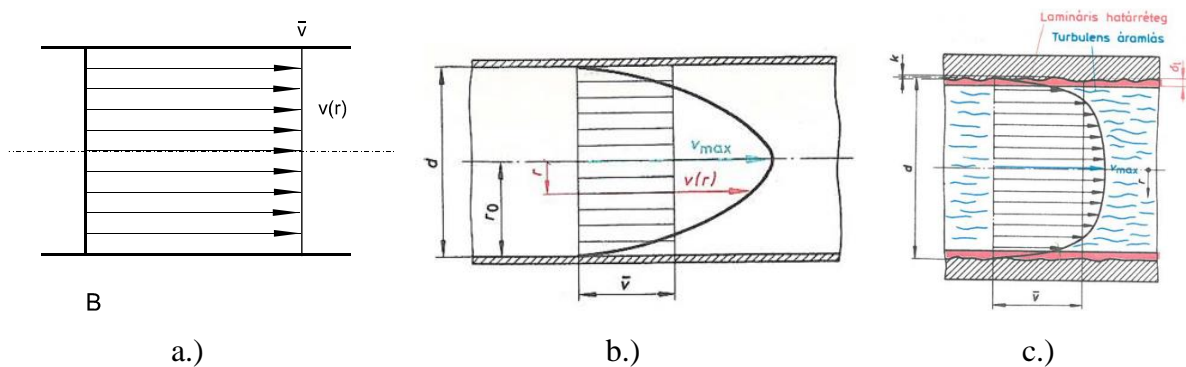
3.2. Lamináris és turbulens áramlás

A kis sebességeknél észlelhető zavartalan áramlást lamináris, réteges áramlásnak nevezzük. Réteges áramlás esetén az egymás mellett áramló folyadékrétegek anyaga csak a hőmozgás miatti molekulamozgások eredményeképpen keveredik egymással. Ha a kiömlő folyadék térfogatárama az időben nem változik, akkor a sebességvektor a cső bármely pontján az időben állandó, az áramlás stacionárius.

Nagy sebességeknél az áramlási tér egy adott pontján a sebességvektor ingadozása az egymás után áthaladó különböző méretű és intenzitású örvényekkel magyarázható. Ezt az örvényekre bomló igen bonyolult szerkezetű áramlást turbulens, gomolygó áramlásnak nevezik.

Az áramlás lamináris vagy turbulens jellegét nem csak az áramlási sebesség szabja meg, hanem a ν kinematikai viszkozitás és az áramlási tér geometriája is. A viszkozitás lényegében az áramlás irányára merőleges irányban szállított impulzusáramból eredő fékező, torlasztó erőhatásokat veszi figyelembe, míg a geometriai méret a teret határoló fal rendező szerepét hivatott reprezentálni. Az itt említett tényezők együttes hatását egy vd/ν dimenziómentes komplexben, az úgynevezett a Reynolds (Re) számban foglalhatjuk össze. Rezgéseknek, környezeti hatásoknak kitett, simafalú, üres cső esetében az áramlás jellegének megváltozása ~ 2300 -as Re szám körül megy végbe.

Tekintsünk egy csövet, és tegyük fel, hogy a cső teljes keresztmetszetében azonos a sebesség (3.1. ábra a.). A cső egyenes, így minden folyadékelem ugyanakkora sebességgel ugyanakkora utat tesz meg. Az ily módon idealizált áramlási képet dugószerű (plug flow) áramlásnak nevezik. Lamináris áramlás esetén parabolikus sebességprofil alakul ki (3.1. ábra b.).



3.1. ábra: Dugószerű áramlás (a.), lamináris áramlás (b.) és turbulens áramlás (c.) csőben

3.3. Tartózkodási idő

A nagyüzemi folyamatos vegyipari termelés egymás után szervezett fázisérintkeztetéseken keresztül valósul meg. Ehhez a fázisokat be kell vinni a berendezésbe, időt kell biztosítani a megfelelő változás bekövetkezéséhez, majd a fázist illetve fázisokat el kell távolítani a berendezésből. Folyamatos művelet esetén a fázisok az esetek zömében egyenletesen, azonos tömegáramban lépnek be a berendezésbe, és természetesen egyenletes áramban is távoznak onnan. A változáshoz annyi idő áll rendelkezésre, amennyit a fázis a berendezésben eltölt.

Szakaszos termelés esetén a fázisokat bemérik a berendezésbe, segédfázisok alkalmazásával (fűtés, hűtés, stb.) változásra alkalmas állapotba hozzák, majd megfelelő idő eltelte után a változásokat rögzítik (reakció befagyasztás) és a fázisokat a készülékből kiürítik. Szakaszos reaktorokban a változásra szánt idő jól tervezhető, míg a folyamatos technológiákban, illetve a szakaszos berendezés előkészítő vagy segéd műveleteiben az időt a mozgó fluidum sebességéből és a készülékben megtett útból lehet meghatározni.

Ennek megfelelően a szakaszos berendezésekben a tartózkodási idő könnyen definiálható. Egy szakaszos berendezésben minden molekula vagy fáziselem azonos ideig tartózkodik, mivel a töltés és ürítés időtartama általában elhanyagolható a művelet időtartamához képest.

Ezzel ellentétben a folyamatos működésű műveleti egységek intenzív állapotjelzői stacioner állapotban nem függenek az időtől. Geometriáját tekintve egy folyamatos műveleti egység lehet üstszerű, vagy csőszerű. Azonban bármilyen geometriájú is a berendezés nem lehet pontosan megmondani, mennyi időt tölt el egy molekula a készülékben, hiszen a fluidumelemek különböző utakat bejárva más-más tartózkodási idővel rendelkeznek. Csak azt tudjuk megmondani, hogy a fluidum elem milyen valószínűséggel lép ki egy adott időintervallumban. A készülékbe belépő, kilépő vagy a készülékben tartózkodó fluidum elemek a tartózkodási idő szempontjából statisztikus sokaságot képeznek, így a fluidum elemek koreloszlását valószínűségi függvények segítségével írhatjuk le. Ezek a függvények kísérleti technikák segítségével is meghatározhatók.

A tartózkodási idő tehát egy valószínűségi változó, amelynek van várható értéke, szórása, eloszlása és sűrűségfüggvénye.

Irodalomjegyzék és ajánlott irodalom

Dr. Szolcsányi Pál, Dr. Szánya Tibor: Vegyipari Műveletek I. kézirat, Veszprémi Vegyipari Egyetem, Vegyipari Műveletek Tanszék, Veszprém, 1983

Rippelné Dr. Pethő Dóra: Vegyipari műveleti laboratóriumi gyakorlatok, Pannon Egyetem, online jegyzet, 2021

Fonyó Zsolt, Fábry György: Vegyipari művelettani alapismeretek, Nemzeti tankönyvkiadó, Budapest, 2004

Dr. Argyelán János: Transzportfolyamatok, Pannon Egyetem Kiadó, 2009