



### 1.3 Műveletek gázokkal

Az előállítási és felhasználási technológiákban gázokkal végzett műveletek közül leggyakrabban a **kompresszió** (sűrítés, térfogatcsökkentés nyomásnöveléssel) és az **expanzió** (kiterjesztés nyomáscsökkentéssel) fordul elő.

A **kompresszió**, amely mindig munka-befektetéssel jár (így külső energiát igényel), lehet *adiabatikus*, mikor a kompresszor és a környezet között nincs hőforgalom (hőátadás), és *izoterm*, amikor a képződő hő például hűtővízzel elvezetjük. A gyakorlatban általában az adiabatikus vagy izotermet megközelítő átmenet játszódik le.



Kompresszor

Az **adiabatikus kompresszió** minden esetben hőmérsékletemelkedéssel jár, amelynek mértékét a következő egzakt összefüggéssel számíthatjuk:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}},$$

ahol

$T_1$  a kiinduló hőmérséklet (K)

$T_2$  a véghőmérséklet (K)

$P_1$  a kezdőnyomás (abszolút),

$P_2$  a végnyomás (abszolút) és

$k$  az adiabatikus kitevő, amely az állandó nyomáson és az állandó térfogaton mért fajhő hányadosa, azaz:  $c_p/c_v$ . Ennek értéke egyatomos gázokra (mint a hélium és argon) 1,66 körül, kétatomos molekulájukéra (mint a nitrogén, oxigén és hidrogén) 1,4 körül, három vagy többatomos gázokra (mint a szén-dioxid és acetilén) 1,3 körül van.

Amint a képletből következik a hőmérsékletnövekedés nem a nyomáskülönbségtől, hanem a nyomásviszonytól függ, valamint a kezdőhőmérséklettől is, mivel az egyenletben nem hőmérsékletkülönbség, hanem az abszolút hőmérsékletek viszonya szerepel. A véghőmérséklet nagy végnyomás esetén nagyon magas, ezért szükséges a fokozatok utáni hűtés, valamint az izoterm kompresszió megközelítésére, amelynek munkaszüksége kisebb, mint az adiabatikusé.

A nyomásviszonnyal összefüggő abszolút hőmérsékletviszony levegőre vonatkozó néhány tényleges értékét táblázatban adjuk meg, ezek az értékek a fordított folyamatra, az adiabatikus expanszióra is érvényesek.

*A nyomásviszony és hőmérsékletviszony összefüggése adiabatikus expanszió, illetve kompresszió esetén*

$P_1/P_2$	$T_1/T_2$
2	1,219
3	1,369
4	1,487
5	1,583
6	1,668
8	1,811
10	1,931
20	2,354
30	2,643
40	2,869

Adiabatikus kompresszió nemcsak kompresszorban, hanem például úgy is lejátszódhat, hogy egy végén zárt csővezetékbe hirtelen szelepnnyitással nagynyomású gázt engedünk. 200 bar vagy nagyobb nyomás esetén így 1000 °C körüli hőmérséklet is kialakulhat, és ha a gáz oxigén, akkor így még a rozsdamentes acél zárószerelvény is kiéghet. Többek között ezért is fontos a gázokkal való kíméletes, körültekintő munkavégzés.

Az adiabatikus kompresszió fordított folyamata az **adiabatikus expanszió**, amikor a gáz nyomását úgy csökkentjük és ezáltal térfogatát növeljük hőszigetelt körülmények között, hogy az

közben külső munkát végez. Ez az úgynevezett expanziós gépekben történhet, amelyek dugattyúsak vagy turbinásak lehetnek és általában áramot termelnek vissza a hálózatba, vagy újabban kompresszor járókereket hajtanak meg.



Expanziós turbina

Nézzünk egy példát a táblázati értékek segítségével:

Induljunk ki 200 bar nyomású, 20 °C (293,15 K) hőmérsékletű levegőből, amely a tökéletesen hőszigetelt expanziós gépben 5 bar nyomásra expandál.

A nyomásviszony:  $\frac{P_1}{P_2} = \frac{200}{5} = 40$ , amelyhez a táblázat szerint 2,869

hőmérsékletviszony tartozik, vagyis  $\frac{T_1}{T_2} = \frac{293,15}{T_2} = 2,869$ ,

amelyből  $T_2 = \frac{293,15}{2,869} = 102,18 \text{ K} = -170,97 \text{ °C}$ ,

Vagyis a 20 °C hőmérsékletű levegő az expanziós gép után megközelíti a cseppfolyósodási hőmérsékletet.

Ez az egyik hűtési mód a levegő vagy általában a gázok **cseppfolyósításakor**, amely során a lehűlt levegővel hőcserélőben előhűtik a kiinduló levegőt, és így fokozatosan eléri a cseppfolyósodási hőmérsékletet.

Az expanzió másik fajtája a **fojtás**, amikor a gáz nyomáscsökkenéskor (ezáltal térfogat-növekedéskor) nem végez külső munkát, így belső energiataralma változatlan marad. Ideális gáz esetében így nem is következne be hőmérsékletcsökkenés. A valódi, reális gázok esetében azonban van kölcsönhatás a gázmolekulák között, így belső munkavégzés történik, amely például levegő esetében a szokásos körülmények között hőmérsékletcsökkenéssel jár.

Mint a reális gáztörvénnyel kapcsolatban láttuk, a kompresszibilitási tényező negatív és pozitív eltérést is okozhat az ideális gáztörvénytől különböző gázfajták esetén és különböző körülmények (nyomás- és hőmérsékletviszonyok) között. Hasonló a helyzet a fojtáskor bekövetkező hőmérsékletváltozással, a *Joule–Thomson hatással* is, amelynek értékét általános képlet-

tel nem kaphatjuk meg, minden gázra nézve különböző, és a hőmérséklettől, valamint nyomástól is függ.

Így például a normálállapot közelében a levegő hőmérséklete fojtáskor 1 bar nyomáscsökkenéskor 0,27 fokkal, az oxigéné 0,33 fokkal, míg a szén-dioxidé 1,35 fokkal csökken. Ugyanakkor például a hidrogén ilyen körülmények között nem lehűl, hanem felmelegszik, viszont nagyon alacsony hőmérsékletről kiindulva az előbbi gázokhoz hasonlóan lehűlés következik be. Alacsonyabb kezdőhőmérsékletről kiindulva például a levegő hőmérsékletcsökkenése is nagyobb lesz, amit az adiabatikus expanzióhoz hasonlóan úgy hasznosíthatunk, hogy a fojtás előtti gázt hőcserélőben előhűtjük a fojtás után lehűlt gázzal.

A fojtás gyakorlatilag úgy kivitelezhető, hogy az áramló levegő útjába valamilyen ellenállást, általában tűszelepet (fojtószelepet) iktatunk be. Fojtás történik például akkor is, ha egy nagynyomású gázpalack szelepét kinyitva a szabadba áramoltatjuk a gázt. A szén-dioxid viszonylag nagy Joule–Thomson tényezője következtében ilyenkor általában szilárd szén-dioxid (szén-savhó) is képződik.

A levegő és más gázok cseppfolyósításakor általában az adiabatikus expanziót és a fojtást kombinálják. Ez régebben mindenképpen szükségszerű volt, hogy a folyadékúttest elkerüljék az akkor általánosan használt dugattyús expanziós gépekben. A mai modern berendezések már többnyire expanziós turbínákkal működnek, de ezek esetében is kerülendő a turbinán belüli folyadékképződés.

Mint említettük egyes gázok (mint a hidrogén) cseppfolyósításakor kizárólag fojtással nem boldogulunk, ilyen esetben általában a kezdőhőmérsékletet (például cseppfolyós nitrogénes hűtéssel) úgy le kell csökkentenünk, hogy a fojtóhatás megfordulásával lehűlés következzen be.

A cseppfolyósítás fordított művelete az **elpárolgotatás** vagy **elgázosítás**, amely például akkor játszódik le az elpárolgotatókban, mikor a cseppfolyós állapotban tárolt gázt gázalakban kívánjuk felhasználni.

Itt van fontos szerepe az eddig még nem tárgyalt gázjellemzőnek, a párolgáshőnek. A **párolgáshő** az a hőmennyiség, amely egységnyi tömegű folyadék (cseppfolyós állapotú gáz) azonos hőmérsékletű gőzzé (esetünkben gázzá) alakításához szükséges. Használatos SI egysége a **kJ/kg**, amely a ma már nem törvényes, de köztudatban lévő kcal/kg mértékegységet váltotta fel.

$$1 \text{ kcal/kg} = 4,1868 \text{ kJ/kg}$$

Az elpárolgotatáshoz mindig hőt (a párolgáshőt) kell közölni a folyadékkal, amely a felhasználói elpárolgotatók esetében a környezeti levegőből történik, tehát annak lehűlésével jár. Állandó nyomáson a kriogén folyadék hőmérséklete (a nyomásnak megfelelő forráspont) mindaddig nem változik, míg folyadékfázis van jelen.

Ez akkor is érvényes, ha például nyitott edényben van a kriogén folyadék, például cseppfolyós nitrogén, és a külső, sokkal magasabb hőmérséklet következtében felületén forrásban van. A saját magától elvont hő hűti, így a környezetből kapott hő nem



*Külső levegő páratartalmának kifagyása az elpárolgató hőcserélő felületén*

tudja erősebben forrásba hozni (főleg, ha a nyitott edény fala hőszigetelt), viszont tartja az atmoszferikus forráspontnak megfelelő kb.  $-196\text{ °C}$  hőmérsékletet.

A cseppfolyós nitrogénnél maradvánnyal, ha valamely készülékben a folyadék feletti gáztér nyomását például vákuumszivattyú segítségével az atmoszferikus alá csökkentjük, a hőmérséklet tovább csökken, mivel a forráspont kisebb nyomáson alacsonyabb.

A cseppfolyósodás, mint fordított folyamat, ennek megfelelően a kondenzációs hő felszabadulásával jár, amely a párologáshővel azonos, és így melegíti a kondenzált folyadékot, valamint a környezetet, tehát fenntartásához hűtést kell alkalmaznunk. Állandó nyomáson azonban itt sem változik mindaddig a hőmérséklet, míg az összes gáz nem cseppfolyósodott.

A nyomás változásakor vagy változtatásakor a kriogén folyadék hőmérséklete is változik az aktuális forráspontnak megfelelően, így például ha a felhasználói kriogén tartályban a nyomást növeljük, a folyadék hőmérséklete is növekszik, nyomáscsökkenéskor pedig csökken. Ezzel mindig együtt jár a megfelelő részleges elpárolgási vagy kondenzációs folyamat.

Az elpárolgató hőcserélőkben a környezeti levegőből annál több hőt kell átadni a cseppfolyós kriogén gáznak, minél nagyobb a felhasználási teljesítmény, vagyis az időegységnyi gázfelhasználás. Nagyobb teljesítmény ezért nagyobb hőcserélő felületet igényel. A gyakorlatban ez jól érzékelhető, ugyanis ha a maximális felhasználáskor az egész elpárolgató, vagy annak nagy része „kifagy” (külső felületén a levegő nedvességtartalmából jég rakódik le), akkor növelni kell a hőcserélő felületet.

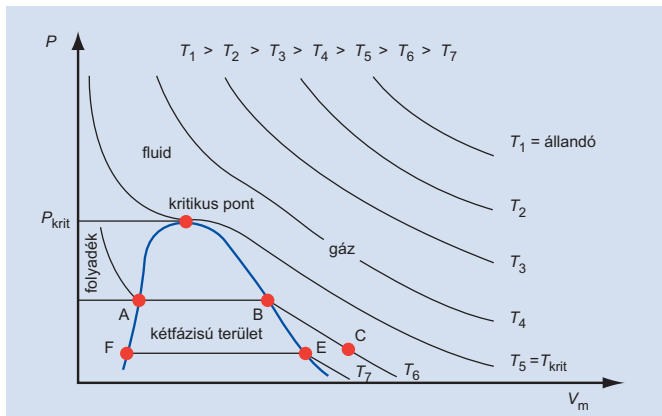
A párologáshő kisebb nyomásokon legalább olyan nagyságrendű, mint a kapott kriogén gáz ( $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ , Ar, stb.) környezeti hőmérsékletre való felmelegítéséhez (illetve cseppfolyósításkor a környezetről a cseppfolyósodási hőmérsékletre való lehűtéshez) szükséges (illetve elvonandó) hő, de a nyomás (és ennek megfelelő forrásponti hőmérséklet) növelésével csökken, mivel a folyadék és gázállapot közeledik egymáshoz. A kritikus ponton, mint az előzőekben már említettük, a fáziskülönbség és fázishatár megszűnik, így a párologáshő is nullává válik.

Jól érzékelhetjük ezt és a fentieket például a gáz  $P$ ,  $V$ -diagramján, amelyet általánosságban ábránk érzékeltet.

A haranggörbétől balra folyadékfázis, jobbra gázfázis van, a görbe alatt pedig egymással egyensúlyban lévő folyadék- és gázfázis. A haranggörbe csúcspontján lévő kritikus pont felett csak az ábrán „fluid” fázisnak jelzett gázfázis lehetséges.

Ha a kritikusnál alacsonyabb  $T_6$  hőmérsékleten (a  $T_6$  izoterma mentén a C pontból a B pont felé) a nyomást növeljük, akkor  $P_6$  nyomáson kezdődik a cseppfolyósodás, amely a  $T_6$  hőmérsékletnek megfelelő gőznyomás. A teljes cseppfolyósodásig („A” pont) a nyomás és hőmérséklet sem változik. Az ennél nagyobb nyomású folyadék nyomásának csökkentésekor az elpárolgáskor hasonló a helyzet.

### Reális gáz sematikus P, V-diagramja.



A haranggörbe szélessége jelzi a párolgáshő nagyságát, és ez érzékelteti, hogy nagyobb nyomáson a párolgáshő kisebb, a kritikus nyomáson pedig meg is szűnik (A–B távolság kisebb, mint F–E). A kritikus hőmérséklet felett csak hűtéssel érhetjük el a kétfázisú, majd folyadék-területet.

A cseppfolyósítás és elpárologtatás tárgyalásakor már szóba kerülő fontos művelet, a **hőcsere**, amelynek számításaiban (a hőcserélők méretezésekor) még két gázjellemzőnek, a fajhőnek és a hővezető képességnek is fontos szerepe van.

A **fajhő** ( $c$ ), vagy **fajlagos hőkapacitás** az a hőmennyiség, amely egységnyi tömegű anyag hőmérsékletét egy fokkal emeli. Mint láttuk ez a definíció a kétfázisú gáz-folyadék területen nem használható, mivel ott a hőmérséklet hő bevezetésekor nem változik.

A fajhő általában használatos SI egysége a  **$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$**  vagy  **$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$** , de mivel a joule helyett még mindig előfordul a kalória használata, a  **$\text{kcal/kg}\cdot\text{K}$**  mértékegységgel is találkozunk.

$$1 \text{ kcal/kg}\cdot\text{K} = 4,1868 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

Az állandó nyomáson mért fajhő ( $c_p$ ) értéke nem egyezik meg az állandó térfogaton mért  $c_v$  értékkel, de a gyakorlati hőközlési folyamatok általában állandó nyomáson történnek, ezért az adattáblázatokban is leginkább ez szerepel.

A fajhő a normálállapot közelében lényeges mértékben nem függ a hőmérséklettől és nyomástól, de folyadékállapotban mindig nagyobb, és a nyomás növelésével – általában egy bizonyos nyomásértékig – is nő, a hőmérséklettől viszont kevésbé függ.

A gáz hővezető képességének a hőcserén kívül a mérés technikában is fontos szerep jut, például a gázkromatográfiás hővezető képességi detektorok esetében.

A **hővezető képesség** ( $\lambda$ ) az egységnyi hőmérsékletgradiens hatására keletkező hőáram, vagyis az a hőmennyiség, amely stacionárius állapotban időegység alatt, egységnyi felületekkel határolt egységnyi vastag rétegen átmegy egy fok hőmérsékletkülönbség esetén.

SI egysége:  **$\text{W/m}\cdot\text{K}$**  vagy  **$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$** , de találkozunk még a kalóriával definiált dimenzióval is, amely  **$\text{cal}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$** .

$$1 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} = 4,1868\cdot 10^2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

A hővezető képesség jellegénél fogva erősen függ a halmazállapottól, így értékei cseppfolyós állapotban minden esetben többszöröse a gázállapotú értékeknek. Gázállapotban kis nyomásokon a hőmérséklet növelésével és általában a nyomás növelésével is nő, cseppfolyós állapotban viszont azonos nyomáson a hőmérséklet növelésével minden esetben csökken.

Nem beszéltünk még a viszkozitásról (belső súrlódásról), mint anyagjellemzőről, amelynek minden olyan folyamatban, műveletben szerepe van, amelyben gázok áramlanak, akár folyadék-, akár gáz-halmazállapotban. Ezek a folyamatok a gyártás és felhasználás majdnem minden műveletét jelentik. Az áramló gázok és folyadékok nyomásesése (nyomásvesztése) egy adott csővezeték-, vagy készülék-szakaszban annál nagyobb, minél nagyobb a viszkozitás és a lineáris áramlási sebesség. A lineáris áramlási sebesség viszont a térfogati áramlási sebességtől, vagyis a gázfelhasználás mértékétől és a cső-, illetve készülék-átmérőtől függ, amelynek méretezésére a fentiek közötti összefüggések alkalmasak.

Az ezekkel kapcsolatos számításokban az úgynevezett **dinamikai viszkozitás** ( $\eta$ ) értékeit használják, amelynek SI egysége a  **$\text{Pa}\cdot\text{s}$  ( $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ )**, de még gyakran találkozunk a cgs-egységgel, a **poise**-zal is, amelynek jele a **P**.

$$1 \text{ P} = 1 \text{ dyn}\cdot\text{s}/\text{cm}^2 = 0,1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

Cseppfolyós állapotban a viszkozitás nagyságrendileg nagyobb, mint gázállapotban, értéke a nyomás növelésével nő, a hőmérséklet növekedésével pedig csökken. Gázállapotban a nyomásfüggés hasonló, viszont a hőmérsékletfüggés fordított, vagyis a hőmérséklet növelésével értéke a növekvő hőmozgás következtében nő.