

Hőtan főtételei

(vázlat)

1. Belső energia oka, a hőtan I. főtétele
2. Ideális gázok belső energiája
3. Az ekvipartíció elve
4. Hőközlés és térfogati munka, a hőtan I. főtétele ideális gázokra
5. A hőtan I. főtételenek alkalmazása különleges állapotváltozásokra
6. A testek hőkapacitása és fajhője
7. Ideális gázok kétféle fajhője
8. Körfolyamatok hatásfoka
 - Carnot-ciklus
 - Hőerőgép
 - Hűtőgép
9. A hőtan II. főtétele
10. Fizikatörténeti vonatkozások
 - Robert Mayer
 - Joule

A hőtan I. főtétele az energiamegmaradás törvényének egy általánosabb megfogalmazása, míg a II. főétel a termodinamikai folyamatok irányával foglalkozik.

Belső energia oka, a hőtan I. főtétele

Minden test, melynek hőmérséklete magasabb, mint az abszolút nulla fok, rendelkezik belső energiával.

A testek belső energiája a testet alkotó részecskék

- hőmozgásából, és
- a részecskék közötti molekuláris kölcsönhatásból származik.

A testek belső energiáját

- termikus úton, és
- mechanikai munkavégzéssel változtathatjuk meg.

Így felírható az energia-megmaradást kifejező hőtan I. főtétele:

$$\Delta E_b = Q + W$$

A testek belső energiájának megváltozása egyenlő a testtel közölt hőmennyiség és a testen végzett mechanikai munka előjeles összegével.

A hőtan I. főtétele az energia-megmaradásnak egy általánosabb megfogalmazása, mint az energia mechanikai megmaradásának törvénye, mert figyelembe veszi a súrlódás belső energiát növelő szerepét is.

A munka és a hő közötti kapcsolatot először Robert Mayer fedezte fel. Ezt Joule bizonyította kísérletileg.

A hőtan I. főételéből kiolvasható, hogy nem készíthető elsőfajú perpetuum mobile, vagyis olyan berendezés, amely munkát végezne anélkül, hogy ne kellene befektetni energiát.

(Pl. Ha egy rendszer belső energiája állandó és közben munkát is végez, akkor pl. termikus úton kell pótolni a hiányt.)

Ideális gázok belső energiája

A hőtan I. főtétele alkalmazható gázhalmazállapotú anyagokra is. Ideális gázok belső energiája csak a részecskék mozgási energiájából származik, mivel a molekuláris kölcsönhatásból származó energia elhanyagolható.

Így egyetlen molekula belső energiája a következő összefüggéssel határozható meg:

$$E_{b_0} = \frac{1}{2} m_0 \bar{v}^2, \text{ ahol } m_0 \text{ egy molekula tömege,}$$

\bar{v} a molekulák átlagos sebessége.

Ha N darab azonos molekulánk van, akkor ezek együttes belső energiája:

$$E_b = N \cdot \frac{1}{2} \cdot m_0 \cdot \bar{v}^2 = N \cdot \bar{E}_{m_0} \quad (\text{Tehát a belső energia a molekulák átlagos mozgási energiájának összege.})$$

A molekulák átlagos mozgási energiája meghatározható a gáz nyomásából is.

A nyomás kinetikai értelmezésénél megállapítottuk, hogy állandó mennyiségű ideális gáz nyomása egyenesen arányos a molekulák átlagos mozgási energiájával, az arányossági tényező $\frac{2 \cdot N}{3 \cdot V}$. Képlettel ez a következőképpen fejezhető ki:

$$p = \frac{2 \cdot N}{3 \cdot V} \cdot \bar{E}_{m_0} = \frac{2}{3 \cdot V} \cdot E_b$$



$$E_b = \frac{3}{2} \cdot p \cdot V = \frac{3}{2} \cdot N \cdot k \cdot T$$



Ebből látható:

Állandó mennyiségű ideális gáz belső energiája egyenesen arányos a kelvinben kifejezett hőmérséklettel, az arányossági tényező $\frac{3}{2} \cdot N \cdot k$.

Az ekvipartíció elve

N molekulából álló ideális gáz belső energiáját az alábbi összefüggéssel határoztuk meg:

$$E_b = \frac{3}{2} \cdot p \cdot V = \frac{3}{2} \cdot N \cdot k \cdot T$$



A kifejezésből látható, hogy egyetlen molekula $\frac{3}{2} \cdot k \cdot T$ -vel járul hozzá a rendszer belső energiájához.

Az ideális gáz molekulái csak haladó mozgást végeznek. Sebességük három, egymástól független komponensre bontható (x, y, z irány). Ezért megállapíthatjuk, hogy minden egymástól független mozgásirány $\frac{1}{2} \cdot k \cdot T$ -vel növeli a rendszer belső energiáját.

Kéttomos molekulák a haladó mozgáson kívül még két egymásra merőleges forgástengely körül forgómozgást is végezhetnek. Így ezeknek a molekuláknak 5 lehetséges egymástól független mozgásuk van.

Az ekvipartíció-elve szerint a molekulák egymástól független mozgásirányai $\frac{1}{2} \cdot k \cdot T$ -vel növelik a gáz belső energiáját. Az egymástól független mozgásirányokat a rendszer szabadsági fokának nevezzük, és f -fel jelöljük. Egyatomos molekulák esetében $f=3$. Kéttomos molekulák esetében $f=5$.

A hőtán I. főtétele ideális gázokra

Ideális gázok **belső energiája** egyenesen arányos a kelvinben kifejezett hőmérséklettel.

Ebből következik, hogy állandó mennyiségű ideális gáz **belső energiájának megváltozása** egyenesen arányos a kelvinben kifejezett hőmérséklet-változással.

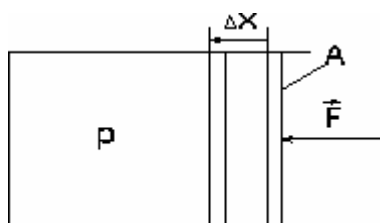
$$\Delta E_b = \frac{3}{2} \cdot N \cdot k \cdot \Delta T$$



De mi változtathatja meg a gáz **belső energiáját**?

- A termikus úton közölt hő,
- A gázon végzett mechanika munka, amelyet térfogati munkának nevezünk.

Térfogati munka



A gáz állandó nyomáson történő állapotváltozásakor a külső erő által végzett munka a következőképpen határozható meg:

$$|W| = F \cdot \Delta x = p \cdot A \cdot \Delta X = p \cdot \Delta V$$

Ha a gázt összenyomjuk, akkor a külső erő munkája pozitív, de $\Delta V < 0$.

Ezt figyelembe véve a térfogati munka képlete:

$$W = -p \cdot \Delta V$$

Így a hőtán I. főtétele ideális gázokra:

A gáz **belső energiájának megváltozása egyenlő a gázzal termikus úton közölt hőmennyiség és a térfogati munka előjeles összegével.**

$$\Delta E_b = Q + W$$

A hőtan I. főtétele különböző állapotváltozásokra

Izoterm állapotváltozás

Izoterm állapotváltozáskor a gáz hőmérséklete állandó. Így a gáz belső energiája nem változik. Ezt figyelembe véve a hőtan I. főtétele a következőképpen írható fel:

$$W = -Q$$

$$-W = Q$$

Állandó mennyiségű ideális gáz izoterm állapotváltozásakor, az általunk végzett munka megegyezik a gáz által leadott hőenergiával, illetve a gáz által felvett hőenergia megegyezik a gáz által végzett térfogati munkával.

Izochor állapotváltozás

Izochor állapotváltozáskor a térfogat állandóságából adódóan nincs térfogati munka. Ezért a hőtan I. főtétele így írható fel:

$$\Delta E_b = Q$$

$$-\Delta E_b = -Q$$

Állandó mennyiségű ideális gáz izochor állapotváltozásakor a gáz által felvett hőenergia a gáz belső energiáját növeli, illetve a gáz által leadott hőenergia a gáz belső energiáját csökkenti.

Izobár állapotváltozás

Izobár állapotváltozáskor a gáz belső energiájának változását a gázzal közölt hőenergia és a térfogati munka együttesen idézi elő.

$$\Delta E_b = Q + W$$

Adiabatikus állapotváltozás

Adiabatikus állapotváltozáskor a rendszer és a környezet között nincs hőcsere.

($Q=0$)

Ezért:

$$\Delta E_b = W$$

$$-\Delta E_b = -W$$

Állandó mennyiségű ideális gáz adiabatikus állapotváltozásakor az általunk végzett munka a gáz belső energiáját növeli, illetve a gáz általa végzett munka a gáz belső energiáját csökkenti.

A testek hőkapacitása és fajhője

Hőkapacitás

A testek közötti hőcsere nagysága egyenesen arányos a test hőmérsékletének megváltozásával:

$$Q \sim \Delta T$$

Mivel a két mennyiség egymással egyenesen arányos, a kettő hányadosa egy állandót határoz meg. Ez az állandó az adott test hőbefogadó képességére jellemző, és **hőkapacitás**nak nevezzük.

Jele: C

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

A hőkapacitás egysége: $\frac{\text{J}}{\text{K}}$ vagy $\frac{\text{J}}{^{\circ}\text{C}}$

A hőkapacitás számértéke kifejezi, hogy az adott test hőmérsékletének 1 kelvinnel való megváltoztatásához mekkora hőmennyiség szükséges.

Fajhő

Ha különböző anyagi minőségű testek hőkapacitását szeretnék összehasonlítani, akkor célszerű mindegyikből azonos mennyiség hőkapacitását megvizsgálni.

Egységnyi mennyiségű anyag hőkapacitását **fajlagos hőkapacitásnak**, másképp **fajhőnek** nevezzük.

Jele: c

$$c = \frac{C}{m} = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}$$

A fajhő egysége: $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ vagy $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}$

A fajhő számértéke kifejezi, hogy 1 kg tömegű test hőmérsékletének 1 kelvinnel való megváltoztatásához mekkora hőmennyiség szükséges.

Ideális gázok kétféle fajhője

Gázok fajhőjének a mértéke függ a hőcsere módjától.

Ha a hőcsere állandó térfogaton történik, akkor

- nincs munkavégzés,
- a hőcsere mértéke megegyezik a belső energia megváltozásával.
 $\Delta E_B = Q + W$, de $W=0$, ezért $\rightarrow Q = \Delta E_B$

$$c_v = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} = \frac{\Delta E_B}{m \cdot \Delta T} = \frac{\frac{f}{2} \cdot \frac{m}{M} \cdot R \cdot \Delta T}{m \cdot \Delta T} = \frac{f}{2} \cdot \frac{R}{M}$$

Ha a hőcsere állandó nyomáson történik, akkor

- 1 K hőmérsékletnövekedéshez több hőmennyiségre van szükség, mint állandó térfogaton, mert a gáz által végzett térfogati munkát is fedezni kell.
- Tehát, $Q = \Delta E_B - W = \Delta E_b + p\Delta V$

$$c_p = \frac{\Delta E_B - W}{m \cdot \Delta T} = \frac{\Delta E_B + p\Delta V}{m \cdot \Delta T}$$

- Az állandó nyomáson mért fajhő képlete tovább módosítható, ha felírjuk, hogy

$$p \cdot \Delta V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot \Delta T$$

- Így:

$$c_p = \frac{\Delta E_B - W}{m \cdot \Delta T} = \frac{\Delta E_B + p\Delta V}{m \cdot \Delta T} = \frac{\frac{f}{2} \cdot \frac{m}{M} \cdot R \cdot \Delta T + \frac{m}{M} \cdot R \cdot \Delta T}{m \cdot \Delta T} = \frac{f}{2} \cdot \frac{R}{M} + \frac{R}{M} = \frac{R}{M} \left(\frac{f}{2} + 1 \right)$$

- Tehát $c_p = \frac{R}{M} \left(\frac{f}{2} + 1 \right)$

Gázok esetében az állandó nyomáson és állandó térfogaton mért fajhők különbsége:

$$c_p - c_v = \frac{R}{M} \cdot \left(\frac{f}{2} + 1 \right) - \frac{f}{2} \cdot \frac{R}{M}$$

Tehát:

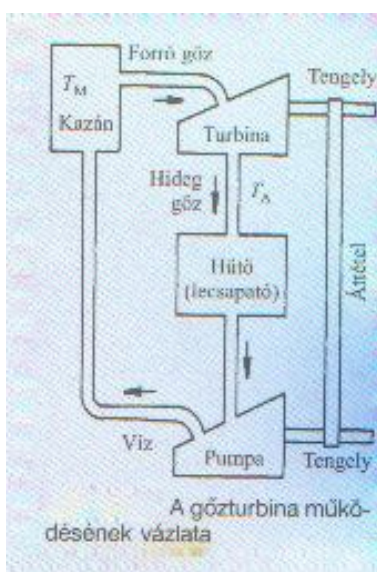
$$c_p - c_v = \frac{R}{M}$$

A hőerőgép működése

A hőerőgépek energia-átalakító berendezések, a termikus energiát alakítják át mechanikai energiává. Hatásfokuk attól függ, hogy a bemenő energia hányad része válik hasznosíthatóvá.

$$\eta = \frac{\text{kimenő hasznos munka}}{\text{bemenő energia}}$$

Nézzük meg a gőzturbina működésének elvét!



- A kazánból nagy nyomású, forró gőz áramlik a turbinába. Ennek következtében a turbina forgásba jön.
- Tehát a gőz mechanikai munkát végez.
- Ennek következtében csökken a belső energiája. Ez a gőz nyomásának és hőmérsékletének csökkenésével jár.
- A kazánból T_M magas hőmérsékletű gőz érkezik a turbinára és T_A alacsonyabb hőmérsékletű gőz távozik.

Az alacsonyabb hőmérsékletű gőzt vissza kell juttatni a kazánba. Erre két lehetőség van.

1. Kompresszor segítségével össze kell nyomni. Ez ugyanannyi munkát igényelne, mint amennyit a gőz végzett a turbina megforgatásakor.
2. A gőzt egy hűtőben lecsapják, és így a gőzhöz képest sokkal kisebb térfogatú vizet állítanak elő. Ezt a kisebb térfogatú vizet egy pumpa sokkal könnyebben visszajuttatja a kazánba. A hűtőben azonban a gőznek hőt kell leadnia, hogy vízzé váljon. A gyakorlatban ezt leggyakrabban a közeli folyó vizével vagy léghűtéssel oldják meg.

Nézzük az energia-átalakulás folyamatát!

A bemenő energia

- hasznos munkára,
 - súrlódási veszteségekre,
 - pumpa munkájára,
 - hűtőbe áramló hőre
- } fordítódik.

A víz útja a gőzturbinában (ideális esetben, amikor nincs veszteség):

A víz Q_M hőt vesz fel a kazánból és Q_A hőt ad la a hűtőnek.

A végzett hasznos munka:

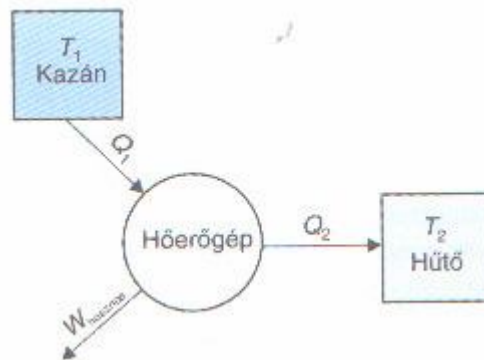
$$W = Q_M - Q_A$$

A hatásfok tehát így adható meg:

$$\eta = \frac{\text{kimenő hasznos munka}}{\text{bemenő energia}} = \frac{W}{Q_M} = \frac{Q_M - Q_A}{Q_M} = 1 - \frac{Q_A}{Q_M}$$

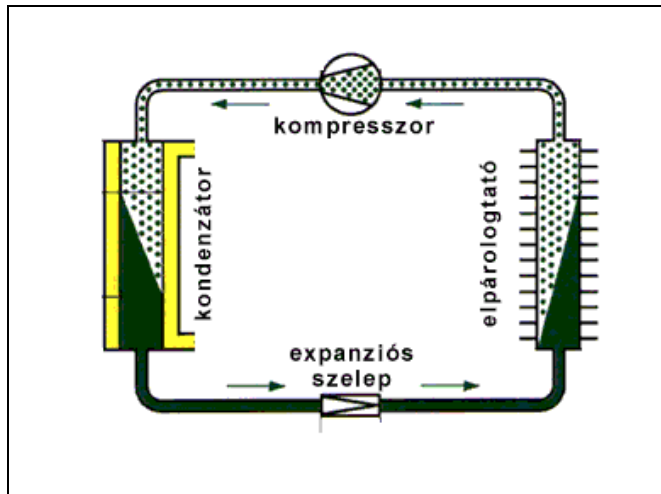
$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_A}{T_M}$$

Az összefüggés minden hőerőgépre igaz. Látható, hogy periodikus folyamatban a hőenergiát nem lehet maradéktalanul mechanikai munkává alakítani.



Hűtőgép működése

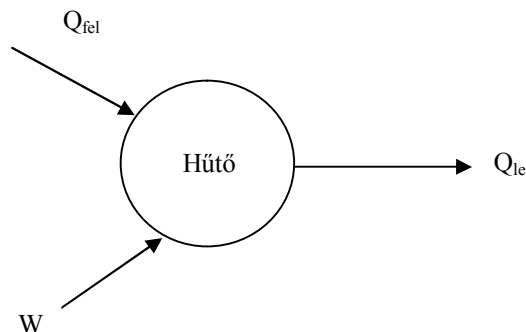
Két hőcserélőt egy körvezeték köt össze.



Ebben a körvezetékben olyan anyag van, melynek igen alacsony a forráspontja, és nagy nyomás hatására könnyen cseppfolyósodik. Ilyen anyag például az ammónia.

- Egy szelep segítségével juttatják a folyékony ammóniát egy nagyobb tartályba.
 - A nyomáscsökkenés következtében a folyadék gyorsan párolog.
- Ehhez hőre van szükség.
 - Ezt a hőt a környezetéből vonja el. Így a környezete, pl. a hűtőszekrényben lévő élelmiszerek lehűlnek.
 - A hőcsere következtében az ammónia felmelegszik.
 - Egy kompresszor összesűríti a gázt.
 - Ennek következtében felszabaduló hőt a rendszer leadja a környezetében lévő közegnek.
 - Így az ammónia ismét folyékonyá válik.

Hűtőgép működésének sematikus ábrája



A hőtán második főtétele

A hőtán I. főtétele nem zárja ki, hogy ha két különböző hőmérsékletű rendszer érintkezik, akkor hőcsere során a hidegebb hőenergiát adjon át a melegebbnek. Ebből az következne, hogy a melegebb hőmérséklete nőne, a hidegebbé csökkenne.

Ez hasonlítana ahhoz a vicchez, hogy

- Jean, hány fok van itt benn?
- 18 fok, uram.
- És ott kinn?
- 2 fok uram.
- Jean, legyen szíves nyissa ki az ablakot, és engedje be azt a két fokot!

A természet nem így működik.

A termodinamikai folyamatok irányára a hőtán II. főtétele ad felvilágosítást. Ez egy alaptörvény, axióma, amelyet nem lehet levezetés útján bizonyítani. Ez a törvény akkor dőlné meg, ha találnánk egy olyan jelenséget, amely a törvény állításával ellentétes módon játszódna le.

A termodinamika II. főtételét tapasztalati úton állapították meg.

A hőtán II. főtételének több megfogalmazása is van. Ezek közül néhány:

- A környezetüktől elszigetelt rendszerben önmaguktól csak olyan irányú folyamatok játszódhatnak le, hogy az intenzív állapotjelzők kiegyenlítődjenek.
 - Például, ha egy hidegebb és egy melegebb rendszer érintkezik, akkor olyan irányú hőcsere indul meg, hogy a hőmérséklet kiegyenlítődjön.
 - Ha egy kisebb és egy nagyobb nyomású gáz érintkezik, akkor olyan irányú folyamat indul meg, hogy a nyomás kiegyenlítődjön.
- Másodfajú perpetuum mobile nem készíthető, vagyis nincs olyan periodikusan működő hőerőgép, amely hőt von el egy hőtartályból, és azt teljes egészében mechanikai munkává alakítaná.
 - Felvetődött régen egy olyan hajó készítése, amely a tengerben lévő hőenergiát használná fel a hajócsavarok működtetéséhez. Közben a hajó mozgása során súrlódna a vízzel. Az ekkor keletkező hőenergia melegítené a tengert, azaz a korábban felvett hőenergia visszajutna a vízbe. Ezt az elképzelést soha nem lehetett megvalósítani, hiszen a tenger és a benne lévő hajócsavar termikus egyensúlyban van, így közöttük nem léphet fel hőcsere.
- A magukra hagyott rendszerekben olyan irányú folyamatok játszódhatnak le, hogy növekedjen a rendszer rendezetlensége.
 - Gondoljunk végig egy kísérletet. Egy tartályt egy válaszfalal két részre osztunk. Az egyik térrészben N számú molekula van, a másik

üres. Ha a válaszfalat eltávolítjuk, a gázcsepscék egyenletesen kitöltik a rendelkezésükre álló teret. Soha többé nem fog megvalósulni az a rendezett állapot, hogy a részecskék ismét az egyik térrészbe rendeződjenek.

- A termikus kölcsönhatás során lejátszódó valóságos folyamatok mindig irreverzibilisek (visszafordíthatatlanok).

Témakörrel kapcsolatos fizikusok

Robert Mayer (1814-1878)



Német hajóorvos, a hő és a mechanikai munka közötti kapcsolat felismerője.

Robert Mayer hajóorvosként megfigyelte, hogy az emberi vér színe a trópusokon vörösebb, több oxigént tartalmaz, mert a trópusokon az ember szervezetének kevesebb munkavégzésre van szüksége a testhőmérséklet fenntartásához.

James Prescott Joule (1818-1889)



1818. december 24-én született Angliában. Megállapította, hogy az energia különféle formái, a mechanikai -, az elektromos - és a hőenergia lényegében azonosak, egyik a másikba átalakítható. Ilyenformán megalkotta az energiamegmaradás törvényének, a termodinamika első főtételének az alapjait.

A „Joule-effektus” kimondja, hogy egy huzalban az elektromos áram által keltett hő arányos a huzal ellenállásának és az áramerősség négyzetének a szorzatával. Különböző anyagokkal kísérletezve azt is megállapította, hogy a hő, az energia egyik formája, független attól, hogy milyen anyagot hevítenek. 1852-ben Joule és William Thomson felfedezte, hogy ha valamely gáz külső munkavégzés nélkül kitágul, a hőmérséklete akkor is csökken.

A munka és az energia egyik egysége a joule nevet viseli.

1889. október 11-én halt meg.