

2. A termodinamika I. főtétele

A termodinamika I. főtétele az energia megmaradásának elvét fejezi ki. A termodinamikai folyamatokban különböző energiaformák szerepelnek, mint pl. mechanikai munka, belső energia, kinetikus energia, stb., speciális esetekben pedig számításba jön ezeken kívül pl. a kémiai, vagy a nukleáris energia is. Ilyenképpen az I. főtétel általános energia-megmaradási törvénynek tekinthető.

2.1. Energiaformák

2.1.1. A mechanikai munka

Mechanikai munka alatt a termodinamikában a termodinamikai rendszer határán működő erő hatására létrejövő energiaközlést (vagy energiaelvonást) értjük, amely tehát a rendszer és a környezet kölcsönhatásának eredménye. A munka nagysága az erő és az erő irányába eső elmozdulás szorzata.

Megállapodás szerint valamely rendszerrel közölt energiát pozitívnak tekintünk; így a mechanikai munkát is akkor tekintjük pozitívnak, ha az a környezetből kerül be a rendszerbe, és a rendszer által a környezet felé teljesített munka negatív.

Jellegzetessége ennek az energiának, hogy a rendszer határain áthatol.

2.1.2. Térfogatváltozási munka

A térfogatváltozási munka a rendszer határainak elmozdulásával kapcsolatos. A 6. ábrán látható termodinamikai rendszer végezzen olyan kvázisztatikus állapotváltozást, amelynek során a rendszer térfogata megváltozik. Elemi expanzió esetén a térfogat dV értékkel megnövekszik,

a rendszer határai kitágulnak. A környezeti p nyomásból a rendszert határoló A felületen ébredő erő

$$F = -pA.$$

Ennek az erőnek a térfogatváltozási munkája elemi ds elmozdulás esetén

$$dW' = -pAds = -pdV, \quad 2.1$$

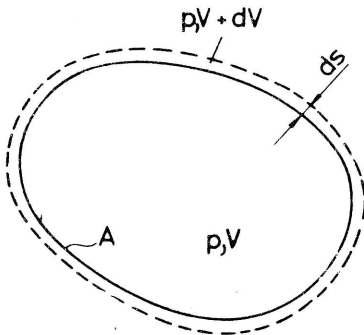
ahol

$$dV = Ads$$

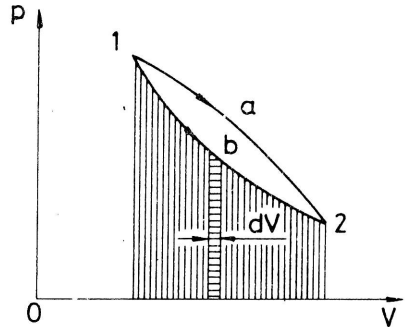
az elemi térfogatváltozás munkavégzés közben. 1 és 2 állapotok közötti véges változás során ez a munka

$$W'_{12} = - \int_1^2 pdV \quad 2.2$$

A kvázistatikus állapotváltozást az állapotfelület vetületén, a p, V síkon a 6. ábra mutatja. Az elemi térfogatváltozási munkát a vízszintesen vonalkázott terület, a véges állapotváltozás munkáját pedig az 1-2 görbe alatti terület ábrázolja.



6. ábra

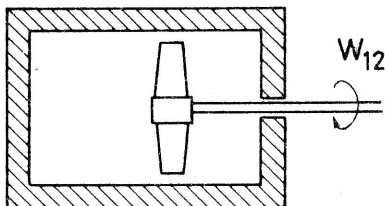


Közvetlenül belátható, hogy a térfogatváltozási munka meghatározásához nem elegendő az állapotváltozás kezdő- és végállapotának az ismerete, hanem az állapotváltozás lefolyását is ismernünk kell. Így pl. a 6. ábrán a-val jelölt esetben a térfogatváltozási munka abszolút értékben nagyobb, mint a b állapotváltozás esetében. A munka nem független az állapotváltozástól, nem állapotjelző.

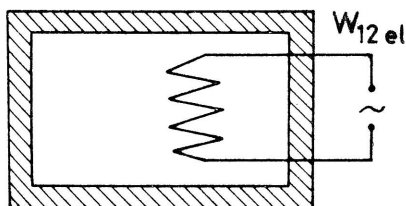
2.1.3. Súrlódási munka

A 7. ábrán látható zárt adiabatikus rendszerben egy keverőlapátos kerék van elhelyezve. Kivülről betáplált munka segítségével a kerék forgásba hozható; a munkát a rendszerben fellépő surlódás emészti fel.

Ezt a folyamatot disszipációnak szokás nevezni. Elektromos munkát vezetünk a 8. ábrán feltüntetett adiabatikus zárt rendszerbe az elektromos vezetőkön keresztül. Mindkét esetben munkavégzés történt anélkül, hogy a rendszer térfogata megváltozott volna. A tapasztalat szerint egy zárt rendszer térfogatváltozás nélkül munkát csak felvenni tud, a környezet felé teljesíteni ezzel szem-



7. ábra



8. ábra

ben nem képes. Az ilyen típusu munkát, megkülönböztetésül a térfogatváltozási munkától, surlódási munkának nevezzük. A surlódási munkát egy rendszerrel csak közölni lehet, a rendszerből elvonni nem. Az összes munka a térfogatváltozási és a surlódási munka összege:

$$W_{12} = W'_{12} + W_{12 \text{ surl.}} \quad 2.3$$

A 6. ábrán p, V diagramban ábrázolt állapotváltozási görbe alatti terület a fentiek szerint a W_{12} összmunka és a $W_{12 \text{ surl.}}$ surlódási munka különbsége. Expanzió esetén tehát a rendszerből a surlódási munkával kevesebb munka nyerhető; kompresszió esetén viszont a befektetendő munka ennek megfelelő értékkel nagyobb.

Abban az esetben, ha a rendszerben nem lép fel súrlódás, azaz a folyamat reverzibilis, az összmunkát a térfogatváltozási munka adja

$$(W_{12})_{\text{rev}} = W'_{12} = - \int_1^2 p \, dV \quad 2.4$$

A termodinamikában igen gyakran számolnak fajlagos mennyiségekkel. Ez úgy adódik, hogy a tényleges mennyiségeket a folyamatban résztvevő közeg m tömegével osztjuk. Ilyen módon a munka fajlagos értéke

$$w_{12} = \frac{W_{12}}{m} = w'_{12} + w_{12 \text{ surl}}, \quad 2.5$$

ahol

$$w'_{12} = \frac{W'_{12}}{m} = - \int_1^2 p \, dv \text{ és}$$

$$w_{12 \text{ surl}} = \frac{W_{12 \text{ surl}}}{m}$$

a fajlagos térfogatváltozási, ill. a fajlagos surlódási munka.

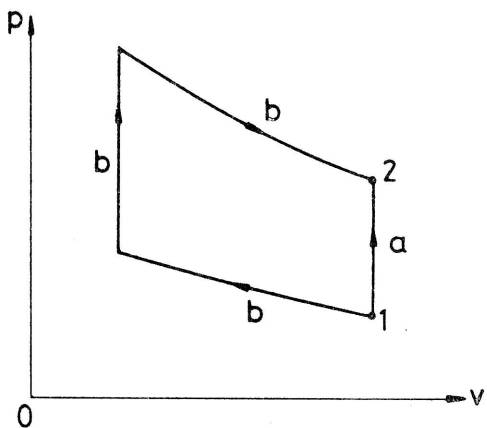
2.1.4. Belső energia

Vizsgáljunk egy nyugalomban levő zárt adiabatikus rendszert. A rendszer egyensúlyi állapotát csak a kívülről betáplált (vagy elvont) munka segítségével tudjuk megváltoztatni. Bár a munka általában a folyamat minőségétől függ (a munka általában nem állapotjelző), a tapasztalat azt mutatja, hogy adiabatikus rendszerrel különböző folyamatok során közölt (elvont) munka mindig ugyanaz, feltéve, hogy a rendszer a különböző folyamatok során azonos kezdőállapotból azonos végső állapotba kerül (9. ábra). Ebben az egyedüli esetben a munka tehát állapotjelző. A rendszerbe betáplált munka a rendszer energiáját növeli, amelyet belső energiának nevezünk. A fentiek szerint tehát a rendszer U belső energiájának változása éppen a betáplált (elvont) munkával egyenlő:

$$U_2 - U_1 = (W_{12})_{\text{adiab.}} \quad 2.6$$

A belső energia az elmondottak alapján egy tetszőleges konstans értékig a mechanika módszereivel meghatározható. A belső energia a rendszer tulajdonsága. Egyszerű rendszerek esetében a belső energia a molekulák rendezetlen mozgásának megfelelő kinetikus energiából és a molekulák potenciális energiájából áll. Nem egyszerű rendszerek

esetében azonban más energiát (pl. kémiai energiát) is a rendszer belső energiájához lehet sorolni.



9. ábra

2.1.5. A hő

A gyakorlatban többnyire előforduló nem adiabatikus rendszerekre nem érvényes az előbbi megállapításunk; nem adiabatikus rendszerek folyamatai során közölt (v. elvont) munka nem állapotjelző:

$$W_{12} \neq U_2 - U_1.$$

Az ilyen folyamatoknál egy másféle, a munkától különböző energiának is szerepe van, amelyet hőnek nevezünk és amelyet a

$$Q_{12} = U_2 - U_1 - W_{12} \tag{2.7}$$

egyenlettel definiálunk. Eszerint egy tetszőleges folyamat során a hőként közölt energia a belső energia változásának és a rendszerrel munka formájában közölt (elvont) energiának a különbségével egyenlő. A hő olyan energia, amely a nem adiabatikus rendszer határain keresztülhalad, de a munkától különbözik. Ha egy folyamat során sem közlés, sem hőelvonás nincs, akkor egyenletünk megegyezik az adiabatikus rendszerre érvényes egyenlettel. Ennek alapján mondhatjuk, hogy egy adiabatikus rendszer határain keresztül sem hőelvonás, sem hőközlés nem történhet.

Miután a munka nem állapotjelző, következésképpen a segítségével definiált hő sem az.

Egy ilyen, adiabatikus fallal elhatárolt rendszerben végbemenő folyamatot adiabatikus folyamatnak nevezünk. A hővel kapcsolatban mondottakat figyelembe véve olyan nyitott rendszer is adiabatikusnak tekintendő, amelyet oldalról adiabatikus falak határolnak, a be- és kiáramló keresztmetszetekben belépő és eltávozó energia ui. nem hőjellegű energia.

A hő a tapasztalat szerint hőmérsékletkülönbség hatására hatol át a rendszer határain. Ugy fogalmazhatunk, hogy a hő két különböző hőmérsékletű rendszer határán fellépő energia, amely kizárólag a fennálló hőmérsékletkülönbség következtében cserélődik két rendszer között, ha ezek diatermikus falon keresztül egymással kölcsönhatásban állnak. A tapasztalat szerint ennél a folyamatnál mindig az történik, hogy a hő a magasabb hőmérsékletű rendszerből az alacsonyabb hőmérsékletű rendszerbe megy át.

Az eddigieknek megfelelően ezt a hőként jelentkező energiát is akkor tekintjük pozitívnak, ha az a rendszerrel kívülről van közölve.

2.2. Az I. főtétel különböző formái

2.2.1. Az I. főtétel zárt nyugvó rendszerekre

A hő definíciós egyenletét a

$$Q_{12} + W_{12} = U_2 - U_1 \quad 2.8$$

formába írva át, előttünk áll a termodinamika I. főtételének egy, főként zárt rendszerekre használható alakja. A (2.8) egyenlet mennyiségi összefüggést teremt a három energiaforma, úgymint a hő, a munka és a belső energia között. Egy folyamat során a rendszer belső energiájának változásából azonban csupán a hő és a munka összege együttesen számítható. Ha ezeket külön-külön is meg kívánjuk határozni, a folyamatról további adatokra van szükségünk.

Fajlagos mennyiségeket használva az I. főtétel zárt rendszerekre a

$$q_{12} + w_{12} = u_2 - u_1 \quad 2.8a$$

formát ölti, amely tetszőleges folyamatra érvényes. Ha azonban csak egyszerű rendszerekben végbemenő reverzibilis folyamatokat vizsgálunk, akkor a munka a térfogatváltozási munkával egyenlő, tehát

$$(w_{12})_{\text{rev}} = - \int_1^2 p \, dv, \quad 2.9$$

és az I. főtétel a

$$(q_{12})_{\text{rev}} = u_2 - u_1 + \int_1^2 p \, dv \quad 2.10$$

alakban írható. Ilyen módon a $(w_{12})_{\text{rev}}$ munka és a $(q_{12})_{\text{rev}}$ hő külön-külön is meghatározható a rendszer állapotjelzőinek segítségével.

2.2.2. Az I. főtétel mozgó zárt rendszerekre

A mozgó rendszerben tárolt energia a belső energiának, a kinetikus és a potenciális energiának az összege. Fajlagos mennyiségekkel az m tömegű rendszer energiája:

$$E = m \left(u + \frac{c^2}{2} + gz \right) \quad 2.11$$

Az összenergia változását a rendszer határain áthatoló hő és munka idézi elő. Így tehát egy mozgó zárt rendszerre az I. főtétel a

$$Q_{12} + W_{12}^* = E_2 - E_1 = U_2 - U_1 + \frac{m}{2} (c_2^2 - c_1^2) + mg (z_2 - z_1),$$

ill. fajlagos mennyiségekkel a

$$q_{12} + w_{12}^* = u_2 - u_1 + \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) + g (z_2 - z_1) \quad 2.12$$

alakban írható fel. Ebben W_{12}^* , ill. w_{12}^* az ún. összmunka, amely a mozgó zárt rendszer állapotát befolyásolja. A nyugvó zárt rendszerre felírható (2.8a), ill. a mozgó zárt rendszerre előbb felírt (2.12) egyenletek összevetéséből látható, hogy az összmunka a kinetikus és potenciális energiák változásának megfelelő mértékben különbözik a nyugvó zárt rendszer munkájától:

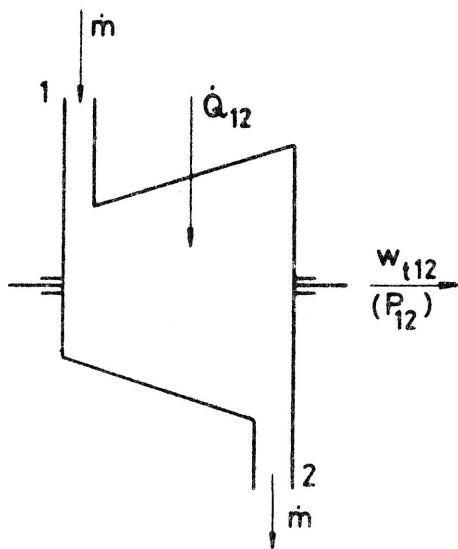
$$w_{12}^* = w_{12} + \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) + g (z_2 - z_1).$$

2.13

2.2.3. Az I. főtétel nyitott rendszerekre

A technikai munka

A műszaki gyakorlatban sokszor adódnak termodinamikai problémák gépekkel vagy berendezésekkel kapcsolatban, amelyekben folytonosan



10. ábra

anyag áramlik keresztül. Az esetek nagy részében ez a folyamat az időben stacionáriusnak vehető. Egy ilyen nyitott rendszernek tekinthető gép vázlatosan a 10. ábrán látható. A beömlő csonton keresztül folytonosan érkezik a géphez az 1 állapotú közeg, majd a gépben különböző folyamatokat végezve a kiömlő csonton át 2 állapotban távozik. Az áramlást stacionáriusnak tekintve a nyitott rendszerre felírható az I. főtételnek olyan alakja, amelyben csak a rendszer határán érvényes állapotjelzők szerepelnek. A nyitott rendszer energiaviszonyairól tehát anélkül kapunk számszerű eredményt, hogy a rendszer (gép) belsejében végbemenő folyamatokat közelebbről ismernénk.

A 10. ábrán bemutatott gép tengelyén folyamatosan rendelkezésre álló munkát a műszaki alkalmazásokban betöltött fontos szerepe miatt a technikai munkának nevezzük, és W_t -val jelöljük. Stacionárius esetben, miközben $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ idő alatt Δm tömegű közeg halad át a gépen, a gép tengelyéről levehető teljesítmény

$$P_{12} = \frac{W_{t12}}{\Delta\tau}$$

Ez a teljesítmény a