

KOVÁCS ENDRE, PARIPÁS BÉLA,

# FIZIKA I.

9



A Műszaki Földtudományi Alapszak tananyagainak kifejlesztése a  
TÁMOP 4.1.2-08/1/A-2009-0033 pályázat keretében valósult meg.

## IX. KÖRFOLYAMATOK, HŐERŐGÉPEK

### 1. BEVEZETÉS

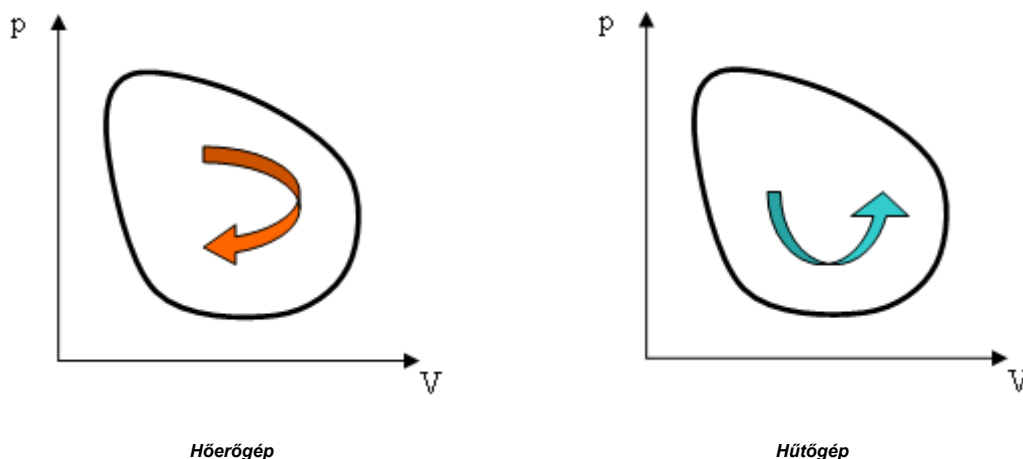
Bármely (*reverzibilis*) körfolyamat végére a rendszer visszakerül abba az állapotba, ahonnan elindult. A részfolyamatok során változhat a hőmérséklete, belső energiája, stb., de az egész körfolyamatra nézve a változás nulla. Ebből persze nem következik, hogy a rendszeren végzett összes munka, ill. a rendszerrel közölt összes hő nulla, csak az, hogy az összegük nulla.

Tehát végeredményben két eset van:

1. a rendszer hőt vesz fel és pozitív munkát végez (**hőerőgép**), vagy
2. a rendszeren munkát végez a környezete és hőt ad le a környezetének (**hűtőgép**).

Meg fogjuk látni, (a II. főtétele miatt) hogy az 1. esetben kell lennie olyan szakasznak is, amikor hőt ad le a gáz, mivel a felvett hőt lehetetlen 100%-ban munkává alakítani.

Ha a  $p$ - $V$  diagramon ábrázoljuk a körfolyamatot, akkor vagy az óramutató járásával megegyező irányban, vagy ellentétesen irányítjuk a görbét. Előbbi esetben nagyobb nyomáson tágul a gáz és kisebb nyomáson húzódik össze, tehát a gáz által végzett munka nagyobb, mint a gázon végzett. Ekkor a fenti 1. eset áll fent.

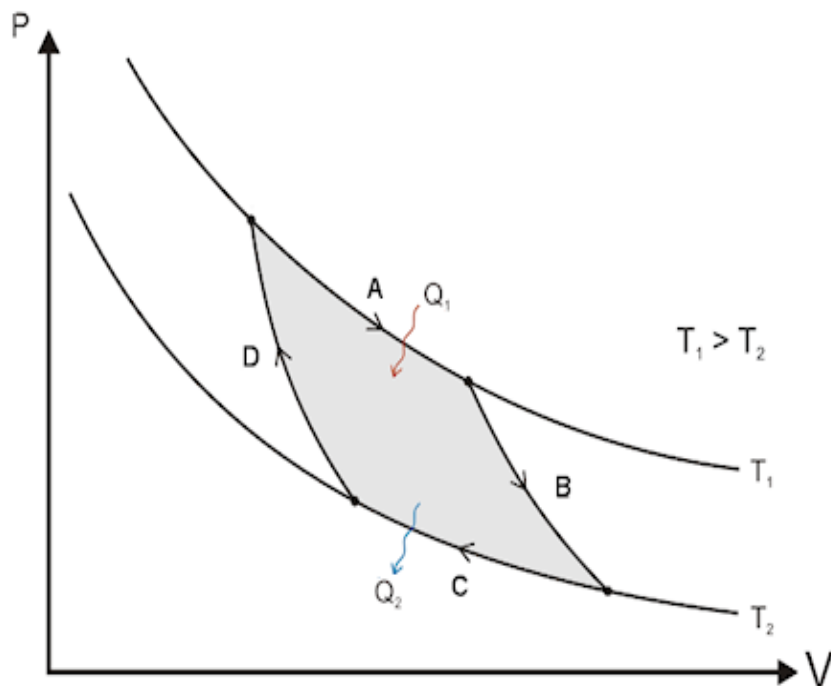


### 2. CARNOT-CIKLUS



Nicolas Léonard Sadi  
Carnot  
(1796–1832) francia  
fizikus, mérnök.

A Carnot-ciklus egy speciális körfolyamat, amely **két izoterm** (legyenek  $A$  és  $C$ ) valamint **két adiabatikus** ( $B$  és  $D$ ) szakaszból áll. Tehát a gáz az  $A$  szakaszban nagyobb nyomáson és hőmérsékleten tágul, aztán a  $B$  szakaszban hőkölés nélkül tovább tágul, és ezért lehűl, a  $C$  szakaszban alacsonyabb hőmérsékleten összenyomódik, a  $D$ -ben pedig a további összenyomás hatására melegszik.



Carnot-körfolyamat a pV diagramon

Számoljuk ki, melyik szakaszon mennyi hőt vett fel a gáz és mennyi munkát végzett.

"A" szakasz:  $\Delta E_{\text{g}} = 0$ ,  $Q_A$ -t felvesz a  $T_1$  hőmérsékletű hőtartályból (kazánból), azt le is adja  $W_A$  munka formájában:  $W_A^* = nRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = Q_A$ .

A "C" szakaszban  $Q_C$ -t lead a  $T_2$  hőtartálynak (hűtő, mert  $T_2 < T_1$ , vagyis  $Q_C$  negatív). Ebben a szakaszban a környezet végez a gázon  $W_C$  munkát, azaz  $W_C^* = nRT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} = Q_C$  (ez negatív, a rendszer "visszaveszi" a korábban elvégzett munka egy részét).

A "B" és "D" szakaszon a hőközlés nulla ( $Q = 0$ ), a hőmérséklet-változásokra  $\Delta T_B = -\Delta T_D$ , ezért  $\Delta E_{\text{g}}(B) = -\Delta E_{\text{g}}(D)$  vagyis  $W_B = -W_D$ . Vagyis amikor az egész folyamatra összegezzük a munkát és a felvett hőt, az adiabatikus szakaszok kiesnek.

A termikus hatásfok a hasznos  $W_A + W_C$  munka és a kazánból ( $T_1$ ) felvett  $Q_A$  hő hányadosa

$$\eta = \frac{W_A^* + W_C^*}{Q_A} = \frac{W_A^* + W_C^*}{W_A^*} = \frac{nR(T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} + T_2 \ln \frac{V_4}{V_3})}{nRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}$$

Használjuk a *Poisson-egyenletet*:  $TV^{\kappa-1} = \text{áll}$ , felírva a "B" és a "D" szakaszra

$$\left(\frac{V_3}{V_2}\right)^{\kappa-1} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{és} \quad \left(\frac{V_4}{V_1}\right)^{\kappa-1} = \frac{T_1}{T_2}$$

ebből  $\frac{V_3}{V_2} = \frac{V_4}{V_1}$ , azaz  $\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$  tehát  $\ln \frac{V_2}{V_1} = -\ln \frac{V_4}{V_3}$ . Ezzel a hatásfok:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

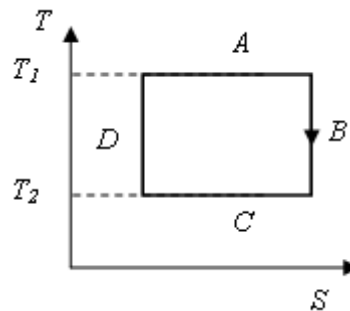
vagyis a veszteséghányad  $\frac{T_2}{T_1}$ . Minél nagyobb a kazán és a hűtőközeg hőmérsékletkülönbsége, annál nagyobb a hatásfok. Ez sohasem lehet 100%, ahhoz  $T_2 = 0K$ -es hőtartály kellene!

A T-S diagramon a Carnot-ciklus egy téglalap, mivel a két adiabatikus szakaszon nincs entrópiaváltozás, a két izotermikus szakaszon pedig  $Q_A = nRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$  és  $Q_C = nRT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} = -nRT_2 \ln \frac{V_2}{V_1}$ , és az

állandó hőmérsékleten érvényes  $\Delta S = \frac{Q}{T}$  összefüggésből

$$\Delta S_A = \frac{Q_A}{T_1} = nR \ln \frac{V_2}{V_1} = -\frac{Q_C}{T_2} = -\Delta S_C$$

vagyis a két entrópiaváltozás nagysága megegyezik.



Megjegyzés: általában is igaz, hogy a TS diagramon a hurok területe megadja a körfolyamatban a gáz által felvett vagy leadott nettóhőt (körüljárástól függően).

Számítsuk ki a Carnot-ciklus hatásfokát most a TS-diagramból:

$$\eta = \frac{W_A^* + W_C^*}{Q_A} = \frac{Q_A + Q_C}{Q_A} = \frac{\Delta S_A T_1 + \Delta S_C T_2}{\Delta S_A T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

vagyis ugyanezt kapjuk, mint fent.

ANIMÁCIÓ

Bebizonyítható, hogy nemcsak ideális gázzal, hanem bármilyen más közeggel végeztetve a Carnot-körfolyamatot, ugyanazt kapjuk a hatásfokra. Azt is be lehet bizonyítani, hogy ez a hatásfok maximális, azaz bármilyen termodinamikai körfolyamattal valósítunk meg egy hőerőgépet, annak hatásfoka nem lehet nagyobb, mint  $T_1 - T_2 / T_1$ , ahol  $T_1$  a legnagyobb,  $T_2$  a legkisebb hőmérséklet, amit a gáz a folyamat során felvesz. Mivel ez a hatásfok kisebb, mint 1, visszakaptuk a II. főtétel állítását: semmilyen periódikusan működő hőerőgép nem tud hőt teljes egészében munkává alakítani. Ezen felül, ha a körfolyamat reverzibilis, a rendszer entrópia-változása nulla, ha irreverzibilis, akkor pozitív.

#### SZÁMOLÁSI FELADAT

##### FELADAT

Ideális Carnot körfolyamatot végző hőerőgép periódusonként  $Q_1=25000\text{J}$  hőt vesz fel a melegebb hőtartályból, mely hőmérséklete  $T_1=300^\circ\text{C}$ . A hűtő hőmérséklete  $T_2=70^\circ\text{C}$ . Számítsa ki az egy periódusban végzett munkát ( $W_p$ ), továbbá a hűtőnek leadott hőt ( $Q_2$ ).

##### Megoldás

Az egy periódusban végzett munka:

$$W_p = (T_1 - T_2) / T_1 \cdot Q_1 = 7497\text{J}$$

A hűtőnek leadott hő nagysága a felvett hő ( $Q_1$ ) és a végzett munka  $W_p$  különbsége, mivel az energia nem vész el:

$$Q_2 = Q_1 - W_p = 17503\text{J}$$

### 3. HŰTŐGÉPEK, HŐSZIVATTYÚK

Ha az előbbieken leírt folyamatot fordítva végeztetjük, akkor a gázon pozitív munkát kell végeznünk, emellett a hűtőből vesz fel hőt a gáz és a felvett hő és a végzett munka összegét leadja a kazánnak. Ez azt jelenti, hogy hűtőgépként működik a berendezés, vagyis hő ment át az alacsonyabb hőmérsékletű hőtartályból a magasabb hőmérsékletűbe, de nem magától (tehát nincs ellentmondás a II. főtétellel), hanem külső munka befektetése árán. A hűtőgép jellemzésére hatásfok helyett ún. jóság tényezőt használnak, amely a hűtendő térből elvont energia (ez a célja a gépnek) és a befektetett munka (ezért fizetünk) hányadosa, azaz

$$\eta = \frac{Q_C}{W_A + W_C} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

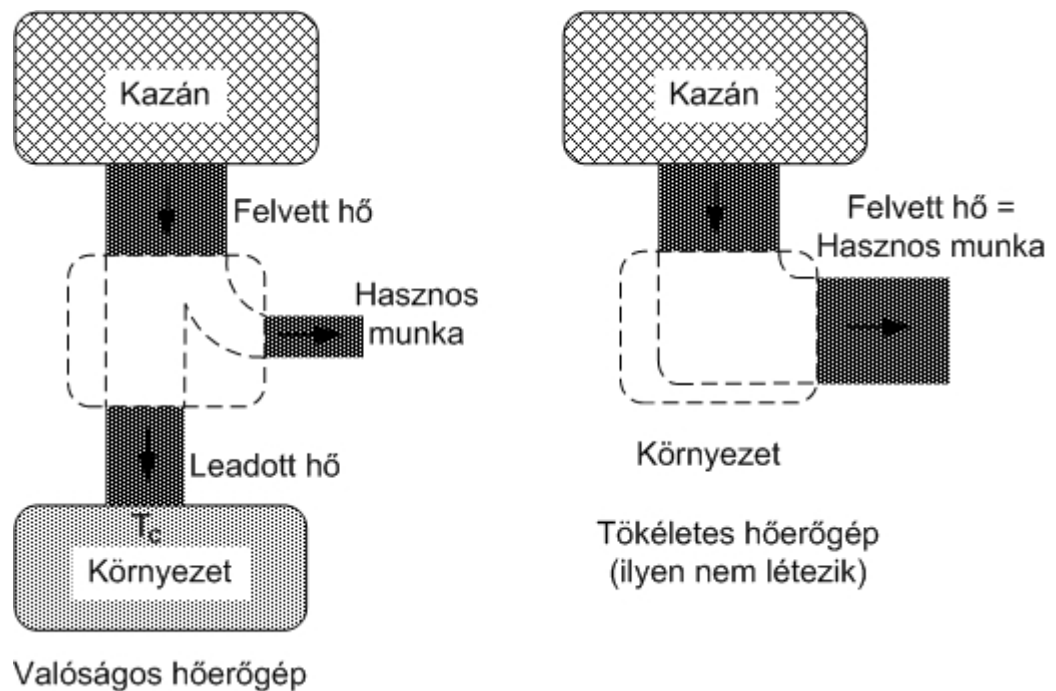
akkor a legnagyobb, ha a hőmérsékletkülönbség kicsi. A valóságos hűtőgépekben természetesen nem pont Carnot-körfolyamatot alkalmaznak.

Ha a hűtőgép lehűtendő tere pl. a föld alatt lévő tartály, akkor a berendezés onnan fogja elvinni a hőt és az (elektromos hálózatról) felvett munkával együtt leadja a fűtendő helyiségben, pl. a lakásban. Ezt a ténylegesen létező és nagyon jó hatásfokú fűtési módszert **hőszivattyúnak** hívják. Jóságát tényezőjét a leadott hő (ez melegíti a szobát) és a felvett munka hányadosaként értelmezhetjük:

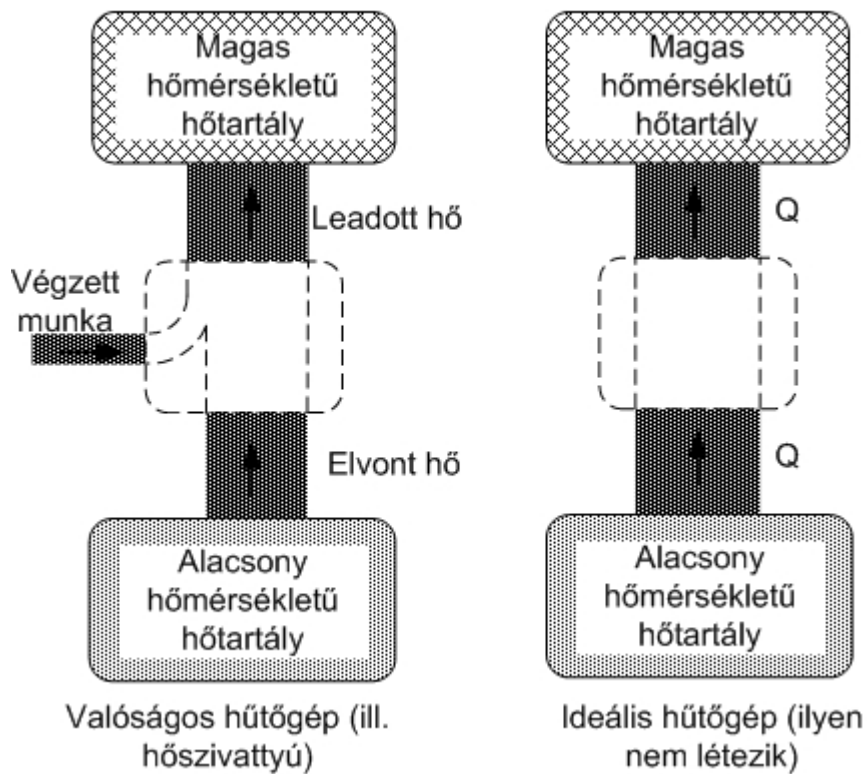
$$\eta = \frac{Q_A}{W_A + W_C} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

Ez is akkor a legnagyobb, ha minimális a hőmérséklet-különbség, ezért szokták a földbe süllyeszteni a  $T_2$  hőtartályt, mert ott télen jóval kevésbé van hideg, mint kint. A módszer elterjedését többek között a szükséges berendezés kiépítésének terjedelmes és költséges módja lassítja.

Az alábbi ábrákon hőerőgép és hűtőgép energetikai folyamatait vázoltuk fel. A bal oldalon valóságos, a jobb oldalon ideális gépeket ábrázoltunk, utóbbiak másodfajú örökmozgók lennének.



Hőerőgép működése



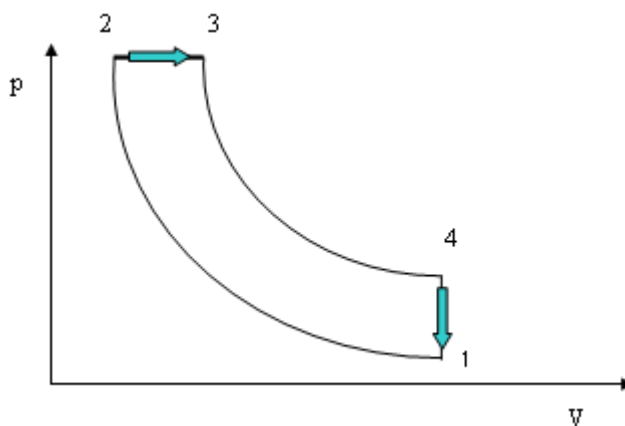
Hűtőgép működése

#### 4. ELLENŐRZŐ KÉRDÉSSOR

##### HŐTAN - KÖRFOLYAMATOK, HŐERŐGÉPEK

Többször megoldható feladat, **elvégzése kötelező**.  
A feladat végső eredményének a mindenkor **legutolsó megoldás** számít.

Az alábbi ábrán egy ideális Diesel-körfolyamat látható, amely izobár, izochor és adiabatikus részfolyamatokból áll. Döntse el, hogy az állítások igazak vagy hamisak!



1. Az 1-2 folyamatban a gáz expandál.

I	H

2. A 2-3 folyamatban növekszik a gáz hőmérséklete. 

I	H
3. A 3-4 folyamatban a gáz hőt ad le a környezetének. 

I	H
4. A 2-3 folyamat adiabatikus expanzió. 

I	H
5. A munkavégzés a 4-1 pontok között történik. 

I	H
6. A tüzelőanyag elégetéséből származó hő bevezetése az 1-2 folyamatban történik. 

I	H
7. A hő bevezetése állandó nyomáson történik. 

I	H
8. Kizárólag a 4-1 szakaszban ad le hőt a gáz. 

I	H
9. A körfolyamatból munka a 3-4 állapotváltozásnál is nyerhető. 

I	H
10. A körfolyamat végeredményben hőerőgéppel felel meg. 

I	H