

Nehéz elképzelni bármilyen elfogadható választ arra kérdésre, hogy ezek a párhuzamok a véletlen eredményei-e. Azt azonban tudjuk, hogy az antik görög gondolkodók kíváncsisága és lelkesedése az érzékeinkkel elérhető jelenségek iránt Európában olyan lavinát indított el, amelynek nincs keleti párja. Az ennek eredményeképp kifejlődő természettudományok pedig a megfigyelések, tapasztalatok olyan tárházát fedték fel, amely életünket sok-sok szempontból gazdagította. Ugyanakkor a Szókratész előtti képet megtörte, és egy színes, a részletekben gazdag leírásmozaikkal helyettesítette. Azonban a mikroszkopikus szint megdöbbentő tulajdonságainak felfedezése megingatta az addigi naiv bizalmunkat az érzékeink által közvetített világban, és egy olyan új világgép kialakítását sürgeti, amely – meglepő módon – a fenntartásosabban haladó keleti gondolkodók in-

tuíciójára emlékeztet. Ezen a ponton fontos annak elismerése, hogy „egzakt” tudományaink nem csak a fizikai világról szólnak, ugyanúgy az emberi gondolkodást is tükrözik [9], mint ahogy egy másik civilizáció világképe.

Irodalom

4. E. P. Wigner: The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in Natural Sciences. *Communication on Pure and Applied Mathematics XIII* (1960) 1.
5. J. A. Wheeler: Law without law. In *Quantum Theory and Measurement*. Princeton Univ. Press, Princeton, NJ (1983).
6. V. Jacques et al.: Experimental Realization of Wheeler's Delayed Choice Experiment. *Science* 315 (2007) 966.
7. S. S. Schweber: Feynman's visualization of space-time processes. *Rev. Mod. Phys.* 58 (1986) 449.
8. N. David Mermin: Hidden variables and the two theorems of John Bell. *Rev. Mod. Phys.* 65 (1993) 803.
9. E. Schrödinger: *Mind and Matter*. Cambridge University Press (1958).

A FIZIKA TANÍTÁSA

A HŐSZIVATTYÚ

Tasnádi Anikó Márta

Karinthy Frigyes Gimnázium, Budapest

A 21. század legnagyobb problémái közé tartozik a fenntartható fejlődés megoldása, az egyre növekvő energiaigények kielégítése, miközben a földtörténeti korok alatt fölhalmozódott fosszilis energiaforrásaink kiapadóban vannak. Egyre sürgetőbbé válik, hogy a fosszilis tüzelőanyagok égetését mérsékeljük, és más alternatívákat találjunk mind az épületek fűtésére, mind az energiaszükséglet fedezésére.

William Thomson (Lord Kelvin) már a 19. században felismerte, hogy az épületek fűtésére gazdaságosabb megoldás lenne – a fosszilis energiahordozók direkt égetése helyett – a hőszivattyú, vagy ahogyan ő nevezte a „hősokszorozó” alkalmazása. (Tervei alapján, állítólag, Svájcban meg is építettek egy működő hőszivattyút [1].)

A tanulmány elkészítését a Magyar Tudományos Akadémia Tanszék-pedagógiai Kutatási Programja támogatta.



Tasnádi Anikó az ELTE-n matematika–fizika, a Közgazdaságtudományi Egyetemen angol szakos tanári diplomát szerzett. Az egyetem elvégzése után egy évig Angliában oktatott. Jelenleg a Karinthy Frigyes Kéttannyelvű gimnáziumban matematikát és fizikát tanít. Kutatómunkát az MTA ELTE Fizikatanítása Kutatócsoportban végezt. Témája a termodinamika gyakorlati és légkörfizikai (klímaváltozás) alkalmazásainak tanítása. Eredményeit nemzetközi konferenciákon és szakfolyóiratokban ismertette.

Mint tudjuk, a hőszivattyú vagy hőpumpa, „fordítva” járatott hőerőgép, amely munka befektetése árán, hőt szállít a hidegebb helyről a melegebb helyre. Ebben az értelemben a mára már minden otthonban megtalálható hűtőszekrény, illetve fagyasztó és az egyre gyakoribb klímaberendezés is hőszivattyú, hiszen a hűtendő térből hőt von el, azonban a köznapi értelemben a hőszivattyú kifejezés inkább a csak fűtésre használt berendezésekre használatos.

A hűtés igénye már századokkal ezelőtt megfogalmazódott, s a hűtőszekrény történetének kezdete az 1800-as évekre vezethető vissza. Elterjedésében az igazi áttörés a 20. századra tehető, a du-Pont cég által kifejlesztett (és azóta már betiltott) freongázzal üzemeltetett hűtőszekrények elterjedésével.

Már a 20. század első felétől is építettek egész épületeket fűtő hőpumpákat, a nagy beruházási költség – és az alacsony energiaárak – miatt azonban azt nem mindenütt tekintették gazdaságos megoldásnak. Az energiahordozók drágulása, a szén-dioxid-kibocsátás mérséklésének igénye fellendítette a hőpumpák iránti keresletet és egyre több helyen alkalmazzák. (Ma Magyarországon az új építésű épületekbe kötelező valamilyen korszerű vagy megújuló energiaforrás használatán alapuló fűtési megoldást is beszerezni. Ebbe a kategóriába a napkollektorok és napelemek mellett beletartoznak a hőszivattyúk is. Ez utóbbiról szinte semmit nem tanítunk a diákoknak, s valószínűleg az idősebb korosztály sem tudja mi is az és milyen fajtái léteznek.)

A jósági tényező

A középiskolás diákoknak megtanítjuk a hőerőgépek hatásfokát, s azt is, hogy ez a hatásfok mindig kisebb mint 1. Emelt szinten megtanítandó, hogy a hűtőgép „fordítva járó” hőerőgép, de nem kell definiálni a hűtőgépek és hőpumpák jósági tényezőjét. Ezek hatékonyságára semmilyen fogalom sincs bevezetve, s így jutunk el oda, hogy amikor a klímaberendezést vásárolunk és a hatékonyságára az eladó 4 vagy akár 6 körüli értéket mond, az átlagember – ha emlékszik a fizikaórára – megállapítja, hogy nem volt igaz, amit tanult. (A klímaberendezéseket hirdető honlapokon is gyakran összemoszák a jósági tényező és a hatásfok fogalmát, s bár általában megemlítik, hogy a klímaberendezés hatékonyságát a jósági tényezővel jellemezzük, pár sorral lejjebb már esetleg az szerepel, hogy a berendezések hatásfoka akár a 6-ot is elérheti.) Tegyük tehát rendet, nézzük, mit is jelentenek a fogalmak.

A középiskolás diákokkal nem nehéz megértetni, hogy egy eszköz (hőerőgép, hűtőgép vagy fűtőgép) „hatékonyságára” olyan mérőszámot kell bevezetni, ami a számunkra hasznos energia és a befektetett energia hányadosa. Ez mind a hőerőgép, mind pedig a hűtő- és fűtőgépeknél különbözőképpen definiált hányados. A jósági tényező jelölésére nincs egységes terminológia, a szakirodalom nagyon sokszor az angolszász jelölésből átvett COP (coefficient of performance) rövidítést használja. (A klímaberendezéseknél a hűtésre használt esetben időnként a COP helyett az EER rövidítés szerepel, ami az „energy efficiency ratio” rövidítéséből származik.)

A hőerőgép (fölül) és a hőpumpa (alul) sematikus vázlat az 1. ábrán látható, s a hatásfok- és COP-definíciók az alábbiakban olvashatók [2]. A hőerőgépek hatásfoka:

$$\eta = \frac{W}{Q_{\text{meleg}}} = 1 - \frac{Q_{\text{hideg}}}{Q_{\text{meleg}}}, \quad (1)$$

ahol W a hőerőgép által végzett munka, Q_{meleg} a hőerőgép által a meleg hőtartályból felvett hő, Q_{hideg} pedig a hideg hőtartálynak leadott hő.

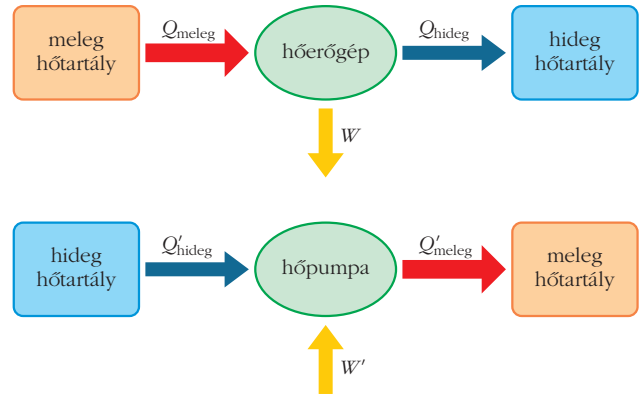
A fűtőgép jósági tényezője:

$$\begin{aligned} COP_f &= \frac{Q'_{\text{meleg}}}{W'} = \frac{Q'_{\text{meleg}}}{Q'_{\text{meleg}} - Q'_{\text{hideg}}} = \\ &= 1 + \frac{Q'_{\text{hideg}}}{Q'_{\text{meleg}} - Q'_{\text{hideg}}}; \end{aligned} \quad (2)$$

a hűtőgép jósági tényezője:

$$COP_h = \frac{Q'_{\text{hideg}}}{W'} = \frac{Q'_{\text{hideg}}}{Q'_{\text{meleg}} - Q'_{\text{hideg}}}, \quad (3)$$

ahol a Q'_{meleg} a meleg hőtartálynak leadott hő, Q'_{hideg} a hideg hőtartályból felvett hő, W' a befektetett munka. (Mind a hőerőgép mind a hőpumpák esetében úgy tekintjük, hogy a körfolyamat elegendően lassú



1. ábra. A hőerőgép (fölül) és a hőpumpa (alul) sematikus rajza.

ahhoz, hogy kvázisztatikusnak vegyük. Ily módon, értelemszerűen, a hőmennyiségértékek az egy körfolyamat során a munkaközeg által leadott és felvett hőt, a munka pedig az egy ciklus alatt végzett munkát jelenti.) Jól látható, ha egy hőerőgépet tökéletesen ugyanazon a körfolyamon sikerülne „visszafelé járatni” (ami az irreverzibilis folyamatok miatt nem lehetséges), akkor az így üzemeltetett fűtőgép jósági tényezője éppen a reciproka lenne az ugyanilyen csak „ellentétes irányban járó” hőerőgép hatásfokának. (Ebben az esetben a hőerőgépnél definiált mennyiségeknek a fűtőgép esetében az ugyanolyan betűjelű és indexű, vesszővel jelölt mennyiségek felelnek meg.) A fűtőgép jósági tényezőjének definíciójából az is látszik, hogy értéke mindig nagyobb mint 1, hiszen a hasznos energia a meleg hőtartálynak leadott hő, ami a befektetett munka és a hideg hőtartályból elvont hő összege. A két jósági tényezőt összehasonlítva – kis matematikai rendezés után – könnyen megállapítható, ha ugyanazt a hőpumpát (ugyanolyan körülmények között) egyszer fűtésre, máskor hűtésre használjuk, a jósági tényezőjük közötti különbség éppen 1. (Vagyis például a hűtőszekrény a konyhában éppen 1-gyel nagyobb jósági tényezőjű fűtőgépként fűti a konyhát, mint amilyen jósági tényezőjű hűtőgépként hűti a benne levő élelmiszert. Természetesen a konyha fűtése általában nem cél.)

Ezeket az összefüggéseket a középiskolás diákok könnyen felismerik, megértik, és az is jól látható, hogy a fűtés a leghatékonyabb. Fontos megértetni, hogy a hőszivattyú alkalmazásakor sem nyerünk energiát, munka befektetésével hőt tudunk a hideg hőtartályból a meleg hőtartályba vinni.

Felső becslés a hatásfokra és a jósági tényezőre

A termodinamika második főtételét sokféleképpen lehet megfogalmazni, a diákok számára talán az a kvalitatív, *Rudolf Clausius* által kimondott megfogalmazás a legkézenfekvőbb, vagy tapasztalataik alapján a legkönnyebben megérthető, amely szerint hő magától nem megy át a hidegebb helyről a melegebbre. Bár középiskolában a hőerőgépek tanításakor általá-

ban úgy is megfogalmazzuk, hogy nincs olyan hőerőgép, ami az összes felvett hőt munkává tudja alakítani, ennél pontosabb, kvantitatív formában – általában – már nem szoktuk megemlíteni a második főtételt. (Az entrópia bevezetése még emelt szinten sem követhető.)

Rudolf Clausius 1855-ben matematikai egyenlőtlenség formájában is megfogalmazta a második főtételt [3] (s ennek alapján bevezette az entrópia fogalmát is). Az egyenlőtlenség segítségével mind a hőerőgépek hatásfokára, mind pedig a hőpumpák jóságai tényezőjére felső becslést adhatunk.

A Clausius egyenlőtlenség szerint tetszőleges termodinamikai körfolyamatra igaz, hogy a körfolyamatra számított redukált hőösszeg nem lehet pozitív. (Redukált hő az adott T_i hőmérsékletű hőtartályból felvett vagy leadott Q_i hőmennyiség és a hőtartály hőmérsékletének hányadosa.) Azaz

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} \leq 0, \quad (4)$$

ahol a rendszer n hőtartállyal áll kapcsolatban, és Q_i az i -edik hőtartályból felvett (vagy annak leadott hő), és T_i az i -edik hőtartály hőmérséklete. Fontos hangsúlyozni, hogy Q_i előjeles mennyiség, ha a rendszer hőt vesz fel, akkor pozitív, és ha lead, akkor negatív. Egyenlőség csak akkor áll fenn, ha a körfolyamat reverzibilisen működik.

Tekintsünk a T_1 és T_2 ($T_1 < T_2$) hőtartályokkal kapcsolatban levő irreverzibilis Carnot-hőerőgépet. A Clausius-egyenlőtlenség alapján

$$\frac{Q_{\text{meleg}}}{T_2} - \frac{Q_{\text{hideg}}}{T_1} < 0, \quad (5)$$

ahol Q_{meleg} a T_2 hőmérsékletű, meleg hőtartályból felvett hő és Q_{hideg} a T_1 hőmérsékletű, hideg hőtartálynak leadott hő *abszolút* értéke. (A leadott hő negatív előjelű, ezért az abszolút értékét ki kell vonni.)

Az egyenlőtlenséget átrendezve kapjuk, hogy

$$\frac{T_1}{T_2} < \frac{Q_{\text{hideg}}}{Q_{\text{meleg}}}. \quad (6)$$

Az irreverzibilis Carnot-hőerőgép hatásfoka a definíció alapján:

$$\eta_{\text{Carnot, irrev}} = \frac{Q_{\text{meleg}} - Q_{\text{hideg}}}{Q_{\text{meleg}}} = 1 - \frac{Q_{\text{hideg}}}{Q_{\text{meleg}}}. \quad (7)$$

A (6) egyenlőtlenség alapján – hőmérséklet-hányadosokat írva a hőmennyiségek hányadosa helyett – a kivonandót csökkentjük, így a különbség nő:

$$\eta_{\text{Carnot, irrev}} < 1 - \frac{T_1}{T_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}. \quad (8)$$

Amennyiben a fenti Carnot-körfolyamat reverzibilis, akkor az egyenlőtlenséggel helyett egyenlőség szerepel

pel a fenti egyenletben, s így a reverzibilis Carnot-körfolyamat hatásfoka:

$$\eta_{\text{Carnot, rev}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}. \quad (9)$$

Az eredmény nagyon egyszerű és szépen látszik, hogy a reverzibilis Carnot-hőerőgép hatásfoka annál nagyobb, minél nagyobb a két hőtartály között a hőmérséklet-különbség.

Nézzük, mit mondhatunk a fűtőgép jósági tényezőjéről. A fűtőgép jósági tényezője éppen az ugyanolyan körülmények között visszafelé járatott hőerőgép hatásfokának reciproka, ezért – ha ideális Carnot-fűtőgépünk volna – ennek jósági tényezője:

$$COP_{\text{f, rev, Carnot}} = \frac{T_2}{T_2 - T_1} = 1 + \frac{T_1}{T_2 - T_1} \quad (10)$$

lenne. A fenti képlet átrendezett alakjából jól látható, hogy a jósági tényezőt úgy tudjuk növelni, ha a két hőtartály közötti hőmérséklet-különbséget csökkentjük, és (vagy) a hideg hőtartály hőmérsékletét növeljük.

Sok termodinamika-könyvben csak annyi olvasható, hogy a Carnot-körfolyamattal működtetett ideális fűtőgép jósági tényezője az adott hőmérsékletű hőtartályok között *maximálisan* elérhető jósági tényező. Azonban, ha csak azt nézzük, hogy a hatásfok és a fűtőgép jósági tényezője egymás reciprokai, akkor – a hatásfokra adódó maximális érték miatt – a jósági tényezőnek minimálisnak kellene lennie.

Az ellentmondás feloldását a Clausius-egyenlőtlenség pontos alkalmazása adja. Nem elég ugyanis egyszerűen a (8) egyenlőtlenség reciprokát képezni, figyelembe kell vennünk azt is, hogy a redukált hőösszeg nem lehet pozitív, és hogy a felvett hő mindig pozitív, a leadottat pedig negatív előjellel kell venni. Így tehát a hőpumpaként működő irreverzibilis Carnot-körfolyamatra a következőt írhatjuk fel:

$$\frac{Q_{\text{hideg}}}{T_1} - \frac{Q_{\text{meleg}}}{T_2} < 0, \quad (11)$$

ahol Q_{hideg} a T_1 hőmérsékletű, hideg hőtartályból felvett hő és Q_{meleg} a T_2 hőmérsékletű, meleg hőtartálynak leadott hő abszolút értéke. (A „-” jel ismét azt fejezi ki, hogy a redukált hőösszegben a rendszer szempontjából leadott hőt kell negatívnak tekinteni.) Az egyenlőtlenséget átrendezve kapjuk, hogy

$$\frac{T_1}{T_2} > \frac{Q_{\text{hideg}}}{Q_{\text{meleg}}}, \quad (12)$$

ami éppen a (6) egyenlőtlenség „fordítottja”.

A (2) definíció alapján írjuk fel az irreverzibilisen működő Carnot-fűtőgép jósági tényezőjének reciprokát:

$$\frac{1}{COP_{\text{f, irrev, Carnot}}} = \frac{Q_{\text{meleg}} - Q_{\text{hideg}}}{Q_{\text{meleg}}} = 1 - \frac{Q_{\text{hideg}}}{Q_{\text{meleg}}}. \quad (13)$$

Fűtőgép esetében – a (12) egyenlőtlenség alapján – a hőmennyiségek hányadosánál nagyobb a megfelelő hőmérséklet-hányados, így a jósági tényező reciprokát alulról becsüljük, ha a hőmérsékletek hányadosát a (13) egyenletbe helyettesítjük:

$$\frac{1}{COP_{f, \text{irrev, Carnot}}} = 1 - \frac{Q_{\text{hideg}}}{Q_{\text{meleg}}} > > 1 - \frac{T_1}{T_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}. \quad (14)$$

Így – az egyenlőtlenség reciprokát véve – a hőtartályok hőmérsékleteinek segítségével tudjuk meghatározni az irreverzibilisen működő Carnot-fűtőgép jósági tényezőjének maximumát, azaz:

$$COP_{f, \text{irrev, Carnot}} < \frac{T_2}{T_2 - T_1}. \quad (15)$$

A reverzibilisen működő Carnot-fűtőgép jósági tényezője pedig a következő lenne:

$$COP_{f, \text{rev, Carnot}} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}. \quad (16)$$

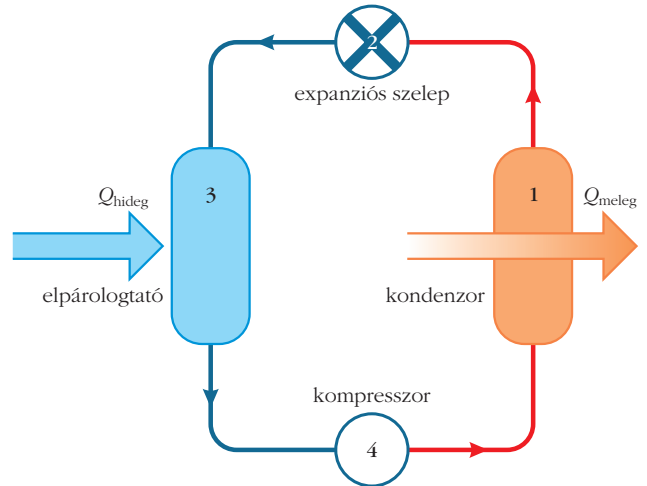
(Ilyen persze nem létezik, mert akkor az izoterm szakaszokon a hőtadásoknak végtelenül lassan kellene bekövetkezniük.)

A hőtartályok hőmérsékleteiből kapott becslésből jól látható, hogy a hőpumpa jósági tényezője annál magasabb, minél kisebb a két hőtartály hőmérséklete közötti különbség. (Vagy minél magasabb a hideg hőtartály hőmérséklete.) Így tehát – ha hőpumpával fűtünk – nem mindegy, hogy a téli hideg levegőből kell-e elvonnai a hőt és a szobát melegíteni, vagy őszszel és tavasszal enyhe időben fűtünk vele.

Hűtés, fűtés hőpumpával

A gyakorlatban használt hőpumpák működése természetesen nem ennyire egyszerű, a legtöbb gyakorlatban használt hőszivattyú (a hűtésre, illetve a fűtésre használt is) gőzkompressziós elven működik. Az ilyen hőpumpáknál a körfolyamatot végző munkaközeg nem csak több hőtartállyal van kapcsolatban, és nem csupán irreverzibilis folyamatok zajlanak, de a munkaközeg még fázisátalakuláson is átmegy, s így a körfolyamat matematikai leírása nagyon bonyolulttá válik.

A gőzkompressziós hűtőgép elve az, hogy a munkaközeg gyors kitágulása és párolgása során annyira lehűl, hogy hidegebb lesz, mint a hideg hőtartály, s ezáltal tud onnan hőt elvonnai, illetve, hogy a szintén gyors kompresszió során a munkaközeg a meleg hőtartály hőmérsékleténél magasabb hőmérsékletre melegszik fel és lecsapódik, s így hőt tud leadni a meleg hőtartálynak. Az elv, bár bonyolultnak tűnik, a diákokkal viszonylag könnyen megértethető. A gőzkompressziós



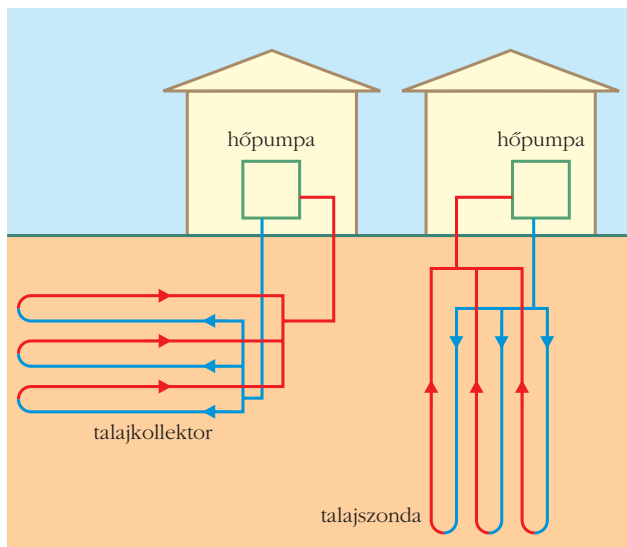
2. ábra. A gőzkompressziós hőszivattyú sematikus rajza.

hőszivattyú sematikus rajza a 2. ábrán látható. Két dologra fontos rámutatni: az egyik – bár valóban úgy tűnik, hogy összességében hőt áramoltatunk át a hidegebb helyről a melegebbre –, hogy a valójában lejátszódó spontán folyamatokban mindig a melegebb helyről áramlik hő a hidegebbre. (A hideg hőtartály a még hidegebb munkaközegnek ad le hőt, illetve a gyors összenyomáskor a – külső munka árán felmelegített – munkaközeg ad le hőt az ekkor a munkaközegnél már hidegebb meleg hőtartálynak.) A másik a fázisátalakulások szerepe, a párolgás hőelvonó hatása, illetve, hogy lecsapódáskor az anyag hőt ad le. Az interneten, bár többségük angol nyelvű, rengeteg jól használható videót találhatunk, amelyek érthetően mutatják be a hűtőgép modelljét.

Tulajdonképpen mind a klímaberendezés, mind a házak fűtésére használt hőpumpa ugyanazon az elven működik, mint a hűtőgép, csak sokkal nagyobb tér hűtésére, illetve fűtésére használjuk, illetve nem mindegy, hogy a szoba levegőjét hűteni vagy fűteni szeretnénk. (A mai korszerű klímákat, illetve hőpumpákat már eleve fűtésre és hűtésre is használható modulokként gyártják.)

Az épületek fűtésére vagy hűtésére használt hőpumpákat többféle szempontrendszer szerint is osztályozhatjuk. Az egyik, hogy honnan vonjuk el a fűtéshez használt hőt, azaz a hőforrás szerinti osztályozás. A hőforrás lehet a ház kívüli levegő, vagy valamilyen közeli folyó, tó vize, illetve a talajvíz vagy pedig a talaj. E szerint a hőszivattyút levegő, víz, talajvíz vagy föld alapú hőszivattyúnak nevezhetjük [4].

A másik a hőcserélő közeg szempontjából történő osztályozás, ez lehet levegő-levegő, víz-levegő, levegő-víz vagy víz-víz. A legtöbb ház falára felszerelt klímaberendezés levegő-levegő rendszerű, hiszen a hőpumpa a levegőből vonja el a hőt és a levegőnek adja le. De például a talajszondás vagy talajkollektoros hőszivattyú már víz-víz rendszerű. A talajba süllyesztett csövekben vizet cirkuláltatnak, s ez veszi fel a talajból a hőt. Az épület belső terében fal- vagy padlófűtés esetén szintén vizet cirkuláltatnak, s ez a hőleadó közeg.



3. ábra. A talajkollektoros (balra) és a talajszondás (jobbra) hőszivattyú vázlatos rajza.

Levegő hőforrású hőpumpák

A leggyakoribb, legolcsóbb és legkönnyebben telepíthető hőpumpák levegő hőforrásúak. Az eredetileg házak hűtését szolgáló légkondicionáló berendezések e hőpumpák legrégebbi típusai. A modern változatok már nemcsak a hűtésre, hanem – a hideg és a meleg hőtartály felcserélésével – fűtésre is alkalmasak. (Hűtés esetén a külső levegő a meleg és a szoba levegője a hideg hőtartály, míg fűtéskor megfordul: a szoba a meleg hőtartály és a külső levegő a hideg.) Az egyszerűbb típusok levegő-levegő rendszerűek, de léteznek levegő-víz rendszerűek is ahol (fűtés üzemmódban) a külső levegőből elvont hőt víz melegítésére fordítják, s ezt a meleg vizet cirkuláltatják a falba vagy a padlóba fektetett csövekben.

Ezen eszközök előnye, hogy viszonylag olcsók és könnyen telepíthetők, hátrányuk pedig, hogy jóságai tényezőjük a külső levegő hőmérsékletével változik. A téli hidegekben ezek a hőpumpák sokkal kisebb jóságai tényezővel fűtenek, mint egy enyhe tavaszi vagy őszi napon. Forró kánikulai napokon szintén kisebb jóságai tényezővel hűtenek, mint egy átlagos meleg napon.

Hátrányt jelent a hangszennyezés is. A levegő-levegő típusú berendezéseknél mind a kültéri, mind a beltéri egységben a munkaközeg levegőből történő hőfelvételét, illetve a hőleadását ventilátorok segítik, amelyek hangereje akár 50-60 dB is lehet.

Arra a tényre is érdemes figyelni, hogy bár ezek a hőpumpák akár még a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os téli hidegben is képesek fűteni (bár kisebb hatékonysággal), azonban „téliésíteni” kell őket, ugyanis működésük során a hideg hőtartály oldalán mindig van páralecsapódás. (Ezért „csurognak” a légkondicionáló berendezések.) Ez a téli hidegekben könnyen ráfagyhat a kültéri egységben

levő ventilátorra, s ennek elkerülése érdekében elektromos melegítést kell alkalmazni. (Ez természetesen plusz költségként jelenik meg a villanszámlában.)

Föld hőforrású hőszivattyúk

A talaj melegét felhasználó hőszivattyúk két fő típusba sorolhatók: a talajkollektorosba és a talajszondásba. A talaj hőjét mindkét esetben a földre süllyesztett hosszú csövezetekben cirkuláltatott sós víz (vagy fagyálló) veszi fel, s ez melegíti fel a hőpumpa munkaközegét, ami majd a ház padlójába vagy falába épített csőrendszerben cirkuláltatott vizet melegíti fel. A talajszondás típusnál a földre süllyesztett csövek 60-100 m mély furatokban helyezkednek el, míg a talajkollektoros típusnál a csöveket 1-2 m mélyre ássák a talajba viszonylag nagy területen. A 3. ábrán a két típus vázlatos rajza látható. A geotermikus hőszivattyúk előnye, hogy – mivel a talaj hőmérséklete általában egész évben állandó – jóságai tényezőjük független az időjárástól, s így télen is elég magas. Bár elképzelhető – különösen a talajkollektoros hőszivattyú esetében –, hogy hosszú, hideg telek végére a talaj a kollektor környékén lehűl, s így csökken a hőszivattyú COP-értéke. Az ilyenkor elvesztett hőt a nyári hűtés során kell visszatáplálni a talajba. Hátrányuk, hogy a telepítésük jóval drágább, mint a levegő hőforrású hőszivattyúké. A talajkollektoros hőszivattyúnak nagy földterületre van szüksége, amelynek árnyékoltsága is befolyásolhatja a működést. Talajszondás esetben a fúrás költség nagyon magas, és engedélyeztetni kell. (A szondafuratok kiépítésekor nagyon elővigyázatosnak kell lenni, s pontosan kell tudni mi van az adott talajrétegben. Egy balul végződött talajszondás hőszivattyú telepítésére példa a Staufen (Németország) városának városházájába tervezett geotermikus hőpumpa. A fúrások összeköttetést hoztak létre a felszín alatt addig elválasztva húzódó, talajvíz és anhidrit réteg között. Az anhidrit (vízmentes szulfát) víz felvételével gipszszé alakul, miközben térfogata 60%-kal megnő. A fúrások hatására a városháza környékén a talaj megemelkedett, megrepesztve ezzel az óváros sok épületének falát (4. ábra).

4. ábra. Balul végződött talajszondás hőszivattyú-telepítés Staufenben: a városháza környékén megemelkedett talaj megrepesztette az óváros sok épületének falát.



A talaj hőjét felhasználó földhőszivattyúkat nagyon gyakran geotermikus hőszivattyúnak nevezik, helytelenül használva a geotermikus szót. Geotermikus energiának ugyanis a földkéreg belső energiáját nevezzük, amely energetikai céllal hasznosítható. A geotermikus energia a legalább +30 °C hőmérsékletű folyékony vagy gáz halmazállapotú anyagok (azaz a geotermikus energiahordozók) közvetítésével, ezek közvetlen földkéregből való kitermelésével vagy recirkulálásával nyert energia [5]. A geotermikus energia a Föld belsejében található hosszú felezési idejű radioaktív izotópok bomlásából származó energia. A Föld belseje felé haladva a hőmérséklet növekszik – 100 méterenként átlagosan nagyjából 3 °C-kal –, de ez a hőmérséklet-gradiens a földrajzi helytől is függ. A talaj hőmérséklete 1-2 m mélyen egész évben nagyjából állandó, körülbelül 10-12 °C. Így még a 100 m mélyre lefúrt talajszondás hőszivattyúk sem tekintendők geotermikusnak.

Víz, talajvíz hőforrású hőszivattyúk

Ezek a hőszivattyúk nyitott vagy zárt vízkörök lehetnek, attól függően, hogy a hőforrásul használt vizet közvetlenül átáramoltatják a hőpumpán vagy nem. A zárt vízkörös esetben a vízbe helyezett csövekben keringő folyadék nincs közvetlen összeköttetésben a tó, a folyó vagy a kút vizével, míg a nyílt vízkörös rendszerekben a természetben található vizet keringetik. Ez utóbbi esetben nagyobb a korrózió veszélye. A zárt vízkörös víz hőforrású hőpumpák tulajdonképpen ugyanúgy működnek, mint a föld hőforrásúak, csak nem a talajból, hanem valamilyen természetes vízből vonnak el hőt. E típus jósági tényezője is viszonylag magas és nagyjából állandó. Hátránya, hogy csak oda telepíthető, ahol van víz és bekerülési költsége ennek is magasabb, mint a levegő hőforrásúé.

Környezeti megfontolások

Vajon mennyire „zöld” a hőszivattyú?

Vajon mennyire tekinthető gazdaságosnak és környezetbarátnak a hőpumpával való fűtés? Azaz kevesebb energiát használunk-e, ha hőpumpával fűtünk, mintha kondenzációs gázkazánnal fűtenénk? Valóban megújuló energiát használunk-e és valóban kevesebb káros anyagot (szén-dioxidot és szálló port) bocsátunk ki, ha hőszivattyút használunk? A válasz nem is olyan egyszerű, s röviden csupán annyit lehet mondani, hogy „attól függ”. Maga a hőpumpa – függetlenül a hőforrástól – általában gőzkompressziós elven működik, s a kompresszor működtetését a leggyakrabban elektromos árammal biztosítják. Így nemcsak a hőszivattyú jósági tényezőjét, hanem az elektromos áram előállításának módját és annak hatásfokát is figyelembe kell vennünk. Ha például az elektromos áramot vízerőmű állítja elő, aminek hatásfoka körülbelül 90%, a téli hidegben, amikor a fűtés COP értéke leesik 2-re, még mindig több energiát nyerünk, mint amit befektetünk. (Összehason-

lításul, a nagyon jó kondenzációs gázkazának hatásfokát – az égés során keletkező vízgőz kondenzációja miatt – 100%-nak is vehetjük.) De, ha az elektromos áramot például egy 35% hatásfokkal működő atomerőmű állítja elő és csak 2 jósági tényezővel működik a hőszivattyúnk, akkor már több energiát használ fel a hőszivattyús fűtés, mintha kondenzációs kazánnal fűtenénk. Igaz ugyan, hogy nem keletkezett szén-dioxid és szálló por, tehát e szempontból még mindig környezetbarát a fűtésünk. Még rosszabb a helyzet, ha az elektromos áramot gáz- vagy széntüzelésű erőmű állítja elő, amelyek hatásfoka 35–55%. A hideg téli napon a 2 jósági tényezővel működő fűtés ismét gazdaságatlanabb – vagy csak kicsit gazdaságosabb – lesz, mint a kondenzációs kazánnal történő fűtés, és még szén-dioxidot is kibocsátott az erőmű – ahogyan a gázkazán is. Fontos megemlíteni azt is, hogy széntüzelés esetén a kibocsátott szálló por is súlyos levegőszennyezést okoz az erőmű környezetében, s a környezetkárosító hatást is szem előtt tartva, összességében már jobban járunk a kondenzációs kazánnal. Ezeket a megfontolásokat figyelembe véve mindenképp energiatakarékosabb megoldás a föld- vagy víz hőforrású hőszivattyú, mint az olcsón telepíthető levegő-levegő rendszerű klímaberendezés, hiszen nagy valószínűséggel annak télen sem csökken a jósági tényezője. A talajszondás geotermikus hőszivattyú telepítése azonban a magasabb költségeken túl különösen nagy odafigyelést és tervezést igényel. (A fent leírt staufeni eset, bár nem gyakori, de nem is egyedi. Arra is figyelni kell, hogy a fúrások ne juttassanak szennyező anyagokat a talajba, talajvízbe, ne változtassák meg a talajvíz szintjét.)

A munkaközeg

A hőszivattyú „lelke” a hűtőközeg vagy más néven munkaközeg. Sokféle munkaközeg létezik, s a megfelelő termodinamikai tulajdonságok mellett az is fontos, hogy ne legyen mérgező, gyúlékony vagy korrozív. A hűtőtechnika fejlődése és a hűtőgépek széles körű elterjedése a 20. századra tehető, amikor kifejlesztették a munkaközegnek használt – gyűjtőnéven csak freonnak nevezett – gázokat. Ezek a gázok a CFC (chlorofluorocarbon) és a HCFC (hydrochlorofluorocarbon) gázok csoportjába tartoznak. (Az első klór-, fluor- és szénatomot; a második hidrogén-, klór-, fluor- és szénatomot tartalmazó vegyületeket jelöli.) Bevezetésük után néhány évtizeddel azonban bebizonyosodott, hogy e gázok káros hatással vannak az ózonrétegre, ezért használatukat 1987-ben betiltották.

A mai hűtőgépek, hőpumpák munkaközége általában valamilyen HFC (hydrofluorocarbon) vagy különböző HFC-gázok keveréke. A HFC hidrogén-, fluor- és szénatomokat tartalmazó vegyületek rövidítése. Klór hiányában nem károsítja az ózonréteget. Sajnos, azonban ezen vegyületek többsége nagyon erős üvegházgáz. Bár a munkaközeg a rendeltetésszerűen működő hőszivattyúból nem jut ki, a kompresszor meghibásodása, szivárgása nem kizárható, ezért törekedni kell a minél kevésbé káros gázok használatára.

Az üvegházgázok légkörmelegítő hatását a GWP (global warming potential) értékkel jellemezhetjük. A szén-dioxid GWP-értékét 1-nek definiálták. Az adott gázra jellemző GWP-érték azt jelenti, hogy e gáz hányszor annyi energiát nyel el adott idő alatt, mint az ugyanakkora tömegű szén-dioxid ugyanannyi idő alatt [6]. A GWP-értékek az időtartamtól is függenek, általában a 20 vagy a 100 évre vonatkozó értékeket használják. (Az időfüggés oka, hogy a különböző gázok légköri koncentrációja az idő múlásával nem ugyanolyan mértékben csökken.) A legtöbb CFC-, HCFC- és HFC-vegyület GWP-értéke általában több ezer. A legújabb, „környezetbarát” klímaberendezésekben az R32 (difluormetán, CH_2F_2) klímagáz található, aminek GWP-értéke csak 675. (Ez még mindig elég magas érték, de nagy a fejlődés a korábbi, gyakran használt, 2088 GWP-értékű R410a nevű hűtőközeghez képest [7].)

Az épületek fűtésére használt hőszivattyúk fajtáit és a környezeti hatásokat még a kevésbé matematikus hajlamú diákcsoportokkal is érdemes megbeszélni. Tapasztalataim szerint a diákokat érdeklik az új megoldások, kis irányítással önálló vagy csoportos „kutatómunkára” is alkalmas a témakör.

Összegzés

A hőpumpákról – bár mindennapjainkban egyre nagyobb szerepet kapnak és kiváló alkalmazásai lehetnének a termodinamikának – szinte semmit sem tanítunk a középiskolákban. A cikk középiskolás szinten ad rövid leírást a hőszivattyú elvéről, a hatékonyságára jellemző jósági tényezőről, továbbá bemutatja a hőpumpák gyakorlati megvalósításainak főbb típusait, a hőpumpák használatának néhány előnyét, illetve hátrányát, és a hőszivattyúkkal kapcsolatosan felmerülő környezeti megfontolásokat.

Irodalom

1. D. A. Reay, D. B. A. Macmichael: *Heat Pumps*. Pergamon Press, Oxford (1988) 3–12.
2. Budó Á., Pócza J.: *Kísérleti fizika I.* Tankönyvkiadó, Budapest (1965) 400–401.
3. Litz J.: *Hőtan*. Dialóg Campus Kiadó, Pécs–Budapest (2001) 421.
4. J. Cantor: *Heat Pumps for the Home*. The Crowood Press, Ramsbury, Marlborough (2011).
5. Bartholy J., Brauer H., Pieczka I., Pongrácz R., Radics K.: *Megújuló energiaforrások*. ELTE, Budapest (2013).
6. https://en.wikipedia.org/wiki/Global_warming_potential
7. https://www.linde-gas.com/en/images/Refrigerants%20environmental%20GWPs_tcm17-111483