

A termodinamika nem-egyensúlyi megalapozása (Etikus-e dolgozni)

Martinás Katalin

ELTE, Atomfizikai Tanszék, Pázmány Péter sétány 1, 1117, Budapest, Hungary.

Kati.martinas@gmail.com

A XIX. században kialakult termodinamika paradigmája szerint a nem-egyensúlyi rendszerek, jelenségek megértéséhez is az egyensúlyi állapot leírásán keresztül vezet az út. A valóság nem-egyensúlyi, ezért nehéz a termodinamika alkalmazása, különösen, ha olyan jelenségek is szerepet játszanak, melyek időskálája rövidebb, mint a nem-egyensúlyi körülmények relaxációs ideje. Az előadásban egy nem-egyensúlyi megalapozást mutatunk be. Olyan új fogalmak jelennek meg az elméletben alapfogalomként, amelyek az egyensúlyi tárgyalásban már értelmezettek, kiszámolhatóak, de nem kaptak még önálló nevet, ezért nem termodinamikai fogalmak. A termodinamika hajnalán, 1852-ben Kelvin (William Thomson) az energia disszipációjának törvényeként fogalmazta meg a II. főtételt. Azonban az energia fogalma akkor volt kialakulóban, ezért akkor még nem születhetett meg a pontos definíció, és most már mást jelent az energia. A kelvini energia a termodinamikai rendszer saját, belső munkavégző képességének feleltethető meg, ezért ezt aktív energiának nevezzük el. A statisztikus értelmezés alapján az aktív energia a rendezett mozgások energiája, a rendezetlen mikroszkopikus mozgások energiáját passzív energiának nevezzük el. Egyensúlyi állapotban a passzív energia megegyezik a belsőenergiával, nem-egyensúlyi állapotban a belsőenergia és a passzív energia különbsége az aktív energia. A II. főtétel új megfogalmazása: Izolált rendszerben az aktív energia nem vész el, csak átalakul hőenergiává. Az entrópia értelmezése egyszerűvé válik. Az entrópia csak a hőenergiától függ, nem függ az aktív energiától. Megmutatjuk, hogy lassú folyamatokban az entrópiikus leírás elegendő, azaz ilyen esetekben az egyensúlyi termodinamika kielégítő leírást ad. A klasszikus termodinamika paradigmája az abszolút entrópia létezése. Az entrópia csak azért tűnik kitüntetettnek, mint a II. főtételt tükröző mennyiség, mert önkényesen kimondtuk, hogy adiabatikus reverzibilis folyamatban legyen állandó. Ezt a feltevést sem a fizika, sem a matematika nem követeli meg. A lehetséges függvények között már vannak olyanok, amelyek a nem-egyensúlyt jellemzik. A földi folyamatok jellemzésére az extrópia különösen alkalmas, és egyben lehetőséget ad arra, hogy a gazdasági folyamatokat jellemezzük és az etikus munka kérdését elemezzük.

Keywords: termodinamika, entrópia, extrópia

1 Bevezetés

Egyetemista korom óta kerestem a választ arra a kérdésre, hogy miért nem értjük a termodinamikát. A főtételek tartalma annyira hétköznapi tapasztalat, hogy már kisgyermek korban megtanuljuk. Pontosabban meg kell tanulnunk, hisz a természet robusztus törvényei, amelyek megsérthetetlenek. A válasz egyszerű. A törvények tapasztalatiak, de a megfogalmazás absztrakt. Az absztrakt elmélet megtanulása előismereteket és nagy munka befektetést igényel.

A klasszikus termodinamika egy gyönyörű axiomatikus elmélet. A definíciói és axiómái egy zárt elméletet adnak. A fogalmai leírják az egyensúlyi állapotot. Az egyensúlyi rendszerek kölcsönhatásaival a nem-egyensúlyi rendszerek is tárgyalhatóak. Az irreverzibilis termodinamika lenyűgöző eredményei mutatják, hogy sikeresen. Azonban nehezen alkalmazható a való világban. A fenntartható fejlődés problémája tükröződik abban a kérdésben, hogy etikusan-e dolgozni. Pontosabban a kérdés, amelyre a fizikának is válaszolnia kell, hogy milyen legyen és milyen lehet a jövő generációk igényeit is figyelembe vevő emberi munkavégzés módja, hogyan lehet etikusan dolgozni. A kérdésre a modern termodinamika nem ad használható választ.

A termodinamika azon a tapasztalaton alapszik, hogy a körülöttünk lévő világ elemeit, rendszereit modellezhetjük (leírhatjuk) a megfigyelhető, mérhető mennyiségekkel, és ezek változásainak leírásához nincs szükség a mélyebb szerkezetek ismeretére. A termodinamika ezért ismert tapasztalatokat foglal össze, de ehhez egy saját nyelvet alakított ki. Kelvin 1876-ban a Nature-ben írta: "Lényege a tudománynak, hogy a dolgokra oly szavakat használjunk, amilyenek azok valójában." [1] Ha a termodinamika fejlődését nézzük, akkor új szavak, fogalmak megjelenése kísérte az útját. A szavak (fogalmak) jelentős része már átment a köznyelvbe, és el is felejtődött, hogy a tudományból erednek. Ilyen szavaink a térfogat, nyomás, energia, hőmérséklet.

A köznyelvi energia nem egyezik meg a fizikában használt energia fogalmával. A fizikában az energia alapvető megmaradó mennyiség. A természet alaptörvénye az energia megmaradása. Az I. főtételt Clausius úgy mondta ki, hogy az Univerzum energiája állandó. A köznyelvi energia viszont egy nagyon komplex fogalom, jelentése kontextus függő. Így a köznyelvi energia megmarad, de elfogy és termelhetjük is. A tudomány azonban adós maradt az elfogyó illetőleg a termelhető energia egzakt definíciójával.

A probléma lényegére már Schrödinger rámutatott az 1943-ban Dublinban tartott előadásában, amely a "What is life?" című könyvben jelent meg [2]. A kérdése az volt, hogy miért eszünk? A köznyelvben energiát fogyasztunk, de ez az energia nem a fizikai, megmaradó energia. A táplálkozás anyagcsere, és egy felnőtt ember lényegében állandósult állapotban van. A tömege, atomi összetétele, energiája és entrópiája – azaz a termodinamikai jellemzői nem változnak, pontosabban a változás sokkal kisebb, mint az anyagcsereben manifesztálódó anyag, energia és

entrópia változás. Az anyag és energia áramoknál a bejövő és kimenő áramok lényegében megegyeznek. Az entrópiánál azonban más a helyzet, az élőlényben lezajló folyamatok entrópiát termelnek. De nem fogyasztjuk, hanem termeljük az entrópiát. Schrödinger a lényeket jól kifejező megoldást javasolt. Az élőlények "negatív entrópiát (negentrópiát)" vesznek fel a táplálékkal. Metaforikus szinten a lényeket fogalmazta meg, de a modern termodinamika keretein belül a negentrópia értelmezhetetlen. Nem mérhető, nem kiszámolható, nem számszerűsíthető, azaz nem fizikai fogalom.

A XIX. században kialakult termodinamika paradigmája szerint a nem-egyensúlyi rendszerek, jelenségek megértéséhez is az egyensúlyi állapot leírásán keresztül vezet az út. A valóság nem-egyensúlyi, ezért nehéz a termodinamika alkalmazása, különösen, ha olyan jelenségek is szerepet játszanak, melyek időskálája rövidebb, mint a nem-egyensúlyi körülmények relaxációs ideje. Az előadásban egy nem-egyensúlyi megalapozást mutatunk be. Olyan új fogalmak jelennek meg az elméletben alapfogalomként, amelyek az egyensúlyi tárgyalásban már értelmezettek, kiszámolhatóak, de nem kaptak még önálló nevet, ezért nem termodinamikai fogalmak.

A nem-egyensúlyi megalapozása a termodinamikának lehetőséget ad arra, hogy új fogalmakat vezessünk be. Az aktív energia és az extrópia két olyan mennyiség, amelyek az egyensúlyi megközelítésben nem jelennek meg, de mérhetőek és kiszámolhatóak, azaz legális termodinamikai mennyiségek. Az extrópia a Schrödinger-féle negentrópia fizikai megfogalmazásának tekinthető, míg az aktív energia a köznyelvi elfogyó energiának.

Jogos kérdés, hogy eddig miért nem találták meg. A válasz egyszerű, megtalálták. Arisztotelész, Leibniz, Lazare Carnot, Lord Kelvin munkái nem-egyensúlyi megalapozású termodinamika irányába tett lépésekként interpretálhatóak. Azonban az egyensúlyi termodinamika paradigmájából nézve ezek nem elődök. Ezért a modern tudománytörténet, mint rossz, ellentmondásos mechanikát interpretálja őket, és a termodinamika történetben nem jelennek meg.

Először a nem-egyensúlyi rendszer leírást ismertetjük, majd az aktív energiát definiáljuk. A belsőenergia az aktív és a passzív energia összege lesz. A Carnot tétel segítségével bevezetjük az entrópiát, ami csak a passzív energiától függ. Az aktív energiától, azaz a nem-egyensúlyiságtól is függő entrópiikus mennyiség az extrópia. Az extrópia a Schrödinger-féle negentrópia termodinamika megfogalmazása. A II. főtétel válasza a címben felvett kérdésre: Azért vagyunk a Földön, hogy dolgozzunk.

2 A nem-egyensúlyi rendszer

Az 1950-es években a termodinamikában elterjedt a lokális egyensúlyi hipotézis használata, és ezzel lehetővé vált a nem-egyensúlyi rendszerek leírása. A hipotézis lényege, hogy a valódi rendszert olyan kicsiny részekre bontjuk, amelyek már egyensúlyinak tekinthetők, és így a teljes rendszer az elemi egyensúlyi részek kölcsönhatásain keresztül leírható. Az egyes cellák egyensúlyiak, azaz a cellák hőmérséklete és nyomása is meghatározott. A T hőmérséklet ideális gáz esetén:

$$T = 2/3 (U / NR)$$

ahol U a belsőenergia, V a térfogat, N a részecskeszám.

A p nyomás ideális gáz esetén:

$$p = 2/3 U / V$$

A statisztikus értelmezés szerint a nem-egyensúlyi állapotokban is értelmezett a belsőenergia, azaz a belsőenergia a tömegközépponti rendszer energiája. Mi is a továbbiakban ezt az értelmezést használjuk., azaz

A belsőenergia változása

$$dU = dQ + dL$$

ahol dQ a hőközlés és dL a munkavégzés.

Irreverzibilis folyamatban a entalpiaváltozása az egyensúlyi termodinamikában csak a kezdő és a végső egyensúlyi között értelmezett:

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta L$$

A Δ szimbólum jelzi, hogy valódi (irreverzibilis) folyamatokban a termodinamikai belsőenergia csak az egyensúlyi, azaz a kezdő és a végállapotra értelmezett. Reverzibilis folyamatban

$$dU = dQ_r - p dV$$

A statisztikus értelmezésnél a belsőenergia a nem-egyensúlyi változások energiáját is tartalmazza, függ a nem-egyensúlyi jellemzőktől, de

$$dU = dQ + dL$$

Az egyensúlyi állapotban az ideális gáz entrópiája

$$S = NR \ln (U^{3/2} V / N^{5/2})$$

A nem-egyensúlyi rendszer entrópiája a cellák entrópiájának összege.

Nem-egyensúlyi megközelítésben a teljes rendszert egy rendszernek tekintjük. Az egyszerűség kedvéért most egy olyan nem-egyensúlyi rendszert vizsgálunk, amelyik két egyensúlyi alrendszerből áll. A kiszámolhatóság érdekében két ideális gáz tartályt veszünk, amelyekben a hőmérsékletek megegyeznek, de a nyomások különbözőek.

Ez a rendszer minőségileg különbözik az egyensúlyi rendszertől. Míg az egyensúlyi rendszer tehetetlen, csak a kölcsönhatások készítenek változásra, addig a nem-egyensúlyi tartalmazza a változás lehetőségét. Jellemzője a változtatás képessége, és ez elvileg mérhető is. A rendszer munkát tud végezni anélkül, hogy a környezetét változtatná. Természetesen a környezetbe kivitt munka változtatja a környezetet, hisz a munkavégzés változást okoz, de a munkavégzés forrása belső, környezetfüggetlen, a nem-egyensúlyi rendszeren belüli kölcsönhatásokból származik.

Gondolatkísérletben elképzelhetjük, hogy a belső munkavégzéssel egy súlyt emelünk fel, vagyis egy fordított Joule mérést hajtunk végre. Joule a hő munka egyenértékét úgy mérte, hogy egy súly lesüllyedésekor keletkező munkával megforgatta a vízben lévő forgókart, és megmérte a hőmérséklet emelkedését. Most fordított üzemmódban vizsgáljuk. A belső munkavégzés megforgatja a forgókart és ennek hatására a súly felemelkedik, és így mérhetővé válik a munka.

A maximális kinyerhető munkavégzés ki is számítható. Az egyszerűség kedvéért legyen a két nyomás különbsége kicsiny, ekkor

$$L_{max} = 1/2 K V (p_1 - p_2)^2$$

Ahol K a kompresszibilitás és V a térfogat. A formulából leolvasható, hogy a maximális kinyerhető munka a nem-egyensúlyi rendszer állapotjelzőitől függ, így maga is állapotjelző. Az új állapotjelzőt aktív energiának nevezzük, jele legyen U_A . Az aktív energia a rendszer belső munkavégző képessége.

3 Az aktív energia

Az aktív energia a nem-egyensúlyiságból származik. Minden nem-egyensúly hozzájárulhat. A fenti példában a nyomás különbséget mutattuk be, de származhat hőmérséklet különbségből is, és valójában minden intenzív paraméter különbsége a forrása lehet. A rendezett mozgások kinetikus energiája is az aktív energia részét képezi, így például a hőáram, az elektromos áram mozgási energiája is.

Az aktív energia a belsőenergia része. A belsőenergia egy termodinamikai rendszerben az elraktározott energiamennyiséget jelenti. A belsőenergia számértékét az I. főtétel nem határozza meg, az csak a változásokat írja le. Egy referencia pontot kell választani. Széles körben használatos definíció, amely a statisztikus értelmezésnek is megfelel az, hogy a belsőenergia legyen zérus

abszolút nulla fokon. A továbbiakban ezt az értelmezést használjuk, és így a belsőenergia nem lehet negatív. Az aktív energia nem lehet több, mint a belsőenergia.

A belsőenergia és az aktív energia különbségét passzív energiának nevezzük el.

$$U_p = U - U_A$$

U_p annak az egyensúlyi állapotnak az energiája, amelyet a maximális munkavégző-képesség kinyerése után érünk el. Az aktív energia a rendezett mozgások energiája, a rendezetlen mozgások energiáját a passzív energia tartalmazza. A statisztikus értelmezés alapján a nem-egyensúlyi állapot hőmérséklete a passzív energiától függ. Ideális gáz esetén a nem-egyensúlyi rendszer hőmérséklete

$$T = 2/3 U_p / NR$$

A Joule mérésnél, amikor megforgatjuk a vizet, akkor aktív energiát közlünk, de a hőmérséklet nem változik, csak akkor, amikor a forgó mozgás energiája eldisszipálódik. A hőmérséklet nem függ az aktív energiától.

Az aktív energia disszipálódik. A termodinamika hajnalán, 1852-ben Kelvin (William Thomson) az energia disszipációjának törvényeként fogalmazta meg a II. főtételt. [3] Azonban az energia fogalma akkor volt kialakulóban, ezért akkor még nem születhetett meg a pontos definíció, és most már mást jelent az energia. A kelvini energia a termodinamikai rendszer saját, belső munkavégző képességének feleltethető meg, ezért az aktív energiát kelvini energiának is nevezhetjük. Jelöljük D -vel az aktív energia disszipációját (egy időegység alatt). A II. főtétel általános megfogalmazása Kelvint követve: Ha $U_A > 0$ akkor $D > 0$.

Nem-egyensúlyi rendszerek esetén a termodinamikai belsőenergia szerepét a passzív energia veszi át. Reverzibilis folyamatban $dU_p = dU$. Nem reverzibilis folyamatban aktív energia is keletkezik és disszipálódik, ez növeli a passzív energiát.

$$dU_p = dQ_r - p dV + D$$

Ez az összefüggés a hő munka egyenértékűségének megfogalmazása lokális egyensúlyi rendszerekre. A hő két formában érkezik: vagy hő, vagy nem-egyensúlyi munka, amelyik eldisszipálódik.

az aktív energia változása:

$$dU_A = dU - dU_p = dQ - dQ_r + dL + p$$

Egy példán mutatjuk be a különbséget a klasszikus és az új leírás között. 300 kPa nyomással összenyomjuk a 100 kPa nyomású gázt, $dV=0,01 \text{ m}^3$ -rel változik a térfogat. A klasszikus leírásban $dQ = 0$, $dL = 3 \text{ kJ}$, de a munka irreverzibilis:

A belsőenergia megváltozása $U(2)-U(1) = dQ+dL = 3 \text{ kJ}$, a folyamatot nem írjuk le, hanem a kiinduló és a végső egyensúlyi állapotokat hasonlítjuk össze.

A passzív energia változása a munkavégzés során 1 kJ. Az aktív energia változása

$$\int dA = \int (dL + p dV - D) = 2 \text{ kJ} - \int L$$

A disszipáció során $dU_p = D$. Az egyensúlyi állapotban, amikor $U_A = 0$, akkor $U_p = 3 \text{ kJ}$. A II. főtétel erős megfogalmazása, ha van aktív energia, akkor az disszipálódik, és átalakul passzív energiává. Az egyensúly beálltakor a passzív energia növekedése 3 kJ lesz, amely megegyezik a belsőenergia változásával.

A schrödingeri kérdésre is választ kaptunk. Az ember azért eszik mert nem-egyensúlyi rendszer. Az aktív energia disszipálódik. Pótolni kell a felhasznált, disszipálódott aktív energiát.

Az aktív energia számításokra nehezen alkalmazható. A mérése csak elvileg lehetséges, a gyakorlatban nehéz. A nehézséget az okozza, hogy két rendszer együtteséből képzett nem-egyensúlyi rendszer aktív energiája nem a részek aktív energiáinak összege, hanem általában nagyobb lesz, mivel a két rendszer különbözősége az aktív energia forrása lehet. Hasonlóan a passzív energia lecsökken.

Egy entrópia jellegű mennyiség bevezetésével orvosolható a probléma. Ehhez bebizonyítjuk a Carnot-tételt, az ideális körfolyamat hatásfoka csak a hőmérsékletektől függ. A klasszikus termodinamika nehézkes eljárása helyett Lazare Carnot gondolatmenetével végezzük a bizonyítást.

4 Carnot

Sadi Carnot eredménye az a felismerés, hogy az optimális (vesztésmentes) körfolyamat hatásfoka csak a hőmérsékletektől függ. Az eredmény a tudományban ritkaságnak számító családi vállalkozásnak tekinthető. Sadi Carnot apja, Lazare Carnot hadmérnök eredményei alapján vezette be.

Lazare Carnot mechanikája Leibniz munkásságának folytatása. [4] A newtoni fizika XIX. századi uralma is közrejátszott abban, hogy ez a munka napjainkban csak a tudománytörténészek számára ismert. [5] A munka megértését megnehezíti, hogy a főáramlatú fizikában a Lazare Carnot által bevezetett fogalmak csak 30-50 év múlva jelentek meg, és természetesen más elnevezést

kaptak. A következőkben Lazare Carnot mechanikáját úgy ismertetem, hogy a munka és a potenciális energia neveket használjuk, de nem használjuk a newtoni erőt és a munka mechanikai definícióját. Így a munka és a potenciális energia Carnot-féle értelmezését adjuk meg. A perpetuum mobile lehetetlensége adja meg a potenciális energia fizikai értelmezését.

Lazare Carnot a gépek működésének hatékonyságát vizsgálta, elsősorban a vízi-erőgépeket. A vízimalom kifejezés alatt az erőforrásként vízi-energiát felhasználó gépi berendezést értjük. A magyarban elsősorban a gabona őrlésére szolgáló rendszert hívják annak, de most, amint azt Lazare Carnot tette, általánosan használjuk. A vízi-erőgépek jóságának (mérnöki szempontból) jellemzésére javasolta a vízimalom és a szivattyú együtteséből álló rendszer hatásfokának, jóságának mértékét. Ez könnyen megadható azzal, hogy a szivattyú milyen magasra tudja emelni a vizet, azzal a munkával, amelyet a vízimalomtól kap. Könnyen belátható, hogy ez a két vízoszlop magasságának a hányadosa, azaz

$$jóság = H_2 / H_1$$

Ha $H_2 > H_1$, akkor egy perpetuum mobilét kapunk. A természet ezt megtiltja, nem létezik perpetuum mobile. Ideális, veszteségmentes gépek esetén a jóság éppen 1. A vízimalom a víz potenciális energiáját alakítja át munkává. Ez ma közismert fizikai állítás, de Lazare Carnot idejében ez a potenciális energia verbális bevezetése. Vezessük be a vízimalom hatásfokát, mint a munka (L) és a potenciális energia (EV) hányadosát. Mi már tudjuk a végeredményt, de a gondolatmenet reprodukálása érdekében az L és az EV alakját ismeretlennek tekintjük.

$$f = L / EV$$

Hasonlóan, a szivattyú hatásfoka, a potenciális energia és a munka hányadosa

$$g = EV / L$$

A jóság a hatásfokokkal kifejezhető, $jóság = fg$. Ideális gép esetén $fg = 1$. Ez trivialis, de nagyon fontos következménye van. Ideális gép esetén a hatásfok csak a magasságoktól függhet. Könnyű belátni. Ha feltesszük, hogy mástól is függ, például a hőmérséklettől, akkor készíthetünk perpetuum mobilét. Például az egyik hőmérsékleten működtetve a vízimalmot és a másikon a szivattyút, az ideális gépnél vagy az $f_1 g_2$ vagy az $f_2 g_1$ nagyobb lesz, mint 1. A hatásfok csak a magasságoktól függhet. Legyen h_1 a kezdeti víz magasság, és h_2 a végső. (Azaz $H_1 = h_1 - h_2$). A legegyszerűbb alak a hatásfokra

$$f = 1 - h_2 / h_1$$

Legyen Mg az átáramló víz súlya, ekkor

$$f = Mg (h_1 - h_2) / Mgh_1 = L / EV$$

Ez azt sugallja, hogy

$$EV=Mgh_1, L=Mg(h_1 - h_2)$$

Lazare Carnot munkásságának ismertetését most befejezzük, nem végezzük el az általánosítást a potenciáltrekekre. Fia, Sadi Carnot 1821-ben meglátogatta őt Magdeburgban, ahol már 1819 óta működött gőzmozdony. Sadi Carnot azt a kérdést tette fel, hogy milyen a legjobb hőerőgép – milyen anyagból, munka közegből érdemes előállítani. [6] Könyvének címe is erre utalt: “Gondolatok a tűz mozgató erejéről és annak kinyerésére alkalmas gépekről”, amelyben Sadi Carnot a mai szakkifejezéseket használva a következő tételt fogalmazta meg: A hőnek mechanikai munkává alakítható része független az átalakítást végző anyagtól és berendezéstől, az csak a két hőtartály hőmérsékletétől függ, amelyek között a berendezés a hőtranszportot megvalósítja.

Az alábbiakban Lazare Carnot eredményei alapján adunk egy rekonstrukciót Sadi Carnot problémájához. A hőerőgép hőt vesz fel és munkát végez. A legegyszerűbb realizáció egy tartály gáz. Tágulásnál a gáz munkát végez és lehűl. Állandó hőmérsékletű munkavégzéshez hőt kell közölni. A gáztartályból akkor lesz gép, ha a munkavégzés huzamos ideig fennmarad. Ehhez biztosítani kell, hogy visszanyerje kezdeti térfogatát, és újból tágulhasson. Azaz a gázt össze kell nyomni, de ehhez munkát kell befektetni. Minél alacsonyabb a hőmérséklet, annál kevesebb kell az összenyomáshoz. A hőszivattyú a fordított folyamatot végzi, munka felhasználásával hőt visz fel a magasabb hőmérsékletű helyre.

A gépek (hőerőgép és hőszivattyú) együttes jóságát a Q_2/Q_1 arány jellemzi, ahol Q_1 a hőerőgép által felvett hő és Q_2 a hőszivattyú által felvitt hő. A perpetuum mobile lehetetlensége előírja, hogy ez az arány nem lehet nagyobb, mint 1. Ideális (teljesen veszteségmentes) gépek esetén pontosan 1. A hőerőgép hatásfokának számlálójába a munkát írjuk. A nevező Lazare Carnot ciklusa alapján valamilyen „hő-potenciális energia”, “ HE ”. Mi már tudjuk, hogy a felvett hőmennyiséget kell a nevezőbe írni, és a munka a felvett és a leadott hőmennyiségek különbsége ($L=Q_1 - Q_2$). Ezzel a hőerőgép hatásfoka $f=L/HE$. A hőszivattyú hatásfoka $g=HE/L$. Ideális gép esetén $fg=1$. A hatásfok függ a hőmérsékletektől, konstans hőmérsékleten nincs eredő munkavégzése a körfolyamatnak. Ugyanazzal a gondolatmenettel, mint a vízímalomnál, belátható, hogy az ideális gép hatásfoka csak a hőmérsékletektől függhet.

A maximális (vagy Carnot ciklus) hatásfok csak a hőmérsékletektől függ, és az alábbi tulajdonságokkal rendelkezik:

$f=0$ ha a két hőmérséklet megegyezik.

$f \leq 1$, a perpetuum mobile lehetetlensége miatt

f a magasabb hőmérsékletnek monoton növekvő függvénye.

Nagyon sok olyan függvényt fel lehet írni, amely kielégíti a fenti feltételeket. Az $f=1-T_2/T_1$ is kielégíti. Kelvin 1848 októberében ezen az elven vezette be a Kelvin skálát, mutatta meg, hogy ez a termodinamikai hőmérséklet megegyezik az ideális gáz hőmérséklettel[7]. Legyen az a termodinamikai hőmérséklet, amelynél a hatások a fentiek szerint alakul. A hőmérséklet kiegyenlítődik, ezért definiálhatunk egy univerzális hőmérséklet skálát.

Az energia megmaradás törvényét felhasználva a hatások a hőmennyiségekkel is kifejezhető, $f = 1 - Q_2/Q_1$, azaz

$$Q_1/T_1 + Q_2/T_2 = 0$$

Ebből egy fontos univerzális szabály következik. Az I. és a II. főtétel megköveteli, hogy ideális körfolyamatban a dQ/T kifejezéseket felösszegezve zérust kapunk.

A passzív energiára vonatkozó egyenletet a termodinamikai hőmérséklettel osztva és egy körfolyamatra integrálva, azt kapjuk, hogy ez az integrál mindig zérus

$$\int \frac{dU_p + pdV}{T} = \int \frac{dQ_r + D}{T} = \int \frac{dQ_{rev}}{T} = 0$$

A fenti összefüggésben dQ_r a hőközlés reverzibilis része, az irreverzibilis rész aktív energiát eredményez, ami a disszipáció során a D-ben jelenik meg. dQ_{rev} a $D=0$, reverzibilis folyamat során fellépő hőközlés.

Az összefüggés a hőközlés és az aktív energia disszipációjának az ekvivalenciáját mondja ki. Az egyenlőség fennáll az irreverzibilis folyamatokra ($D>0$) és a reverzibilis folyamatokra ($D=0$) is, ahol a körintegrál értéke zérus a Carnot-tétel alapján. Ebből következik, hogy az első integrálban szereplő kifejezés egy függvény megváltozása, azaz

$$dS = \frac{dU_p + pdV}{T}$$

ahol S az entrópia. Az entrópia additív, két rendszer egyesítése esetén az eredő rendszer entrópiája a részek entrópiájának összege. Természetesen a klasszikus értelmezést is megkapjuk

$$dS = \frac{dQ + D}{T} \geq \frac{dQ}{T}$$

Az entrópia az egyensúlyiság mértéke, csak a passzív energiától függ, nem függ az aktív energiától, a nem-egyensúlyiságtól. A rendszer lényeges jellemzője, hogy mennyire nem-egyensúlyi, de erről az entrópia közvetve ad csak felvilágosítást. Nem-egyensúlyi izolált rendszerben az entrópia növekszik. A nem-egyensúlyiság az entrópia hiánnyal, az entrópia növekedési lehetőséggel jellemezhető.

Azonban nem az entrópia az egyetlen megoldás. Poór Veronika rámutatott [8], az entrópia csak azért tűnik kitüntetettnek, mint a II. főtétele tükröző mennyiség, mert önkényesen kimondtuk, hogy adiabatikus reverzibilis folyamatban legyen állandó. Ezt a feltevést sem a fizika, sem a matematika nem követeli meg. A körintegrál nem változik, ha egy tetszőleges olyan függvényt adunk hozzá, amelynek körintegrálja zérus. A lehetséges függvények között már van olyan is, amely a nem-egyensúlyt jellemzi, azaz függ az aktív energiától.

Extrópiának nevezzük el a következő formulával jellemzett állapotjelzőt9:

$$P = U/T_0 + p_0/T_0 V - S$$

ahol a 0 index állandókat jelez. A transzformáció az intenzív paraméterek zérus pontját módosítja. A negatív előjelet azért tettük bele, mert így lesz pozitív mennyiségünk. Az extrópia a Schrödinger negentrópia egy módosított alakja.

Az extrópia értelmezéséhez bevezetünk egy új hőmérséklet skálát, a könnyebb érthetőség kedvéért: $t^* = 1/T_0 - 1/T$.

Ez a formális kifejezés azért rendkívül hasznos, mert ha a földi körülményekre alkalmazzuk, ahol az átlagos hőmérséklet $17\text{ }^\circ\text{C}$, akkor $T_0 = 290\text{ K}$ választással a természetes hőmérséklet skálát kapjuk. Ha $t^* > 0$, a földön meleg van, ha t^* negatív, akkor hideg van, és $t^* dU \leq 0$. A változás törvénye: $dU = -k t^*$. A természet törvényei szerint k nem lehet negatív. A fizikában ez a hővezetés egyenlete, vagy Fourier törvény. A negatív k azt jelentené, hogy a hő a hidegebb helyről megy a melegebbre.

Hasonló következtetésre jutunk a nyomással kapcsolatban is: ha csak nyomás különbség van, akkor a térfogatváltozásra egy analóg egyenlőtlenség igaz. A nagyobb nyomású rendszer térfogata növekszik, azaz ha a test nyomása nagyobb, mint a környezeté- akkor a test csak kitágulhat (Természetesen ceteris paribus!)

5 Ektrópia

Ektrópiának nevezzük azt az extrópiát, amelynél az intenzívek zérus pontját a földi átlag értékekhez rögzítjük, így $T_0 = 290\text{ K}$, $p_0 = 1\text{ atm}$. (A kémiai potenciálók zérus pontját a földi minimális energiájú állapothoz rögzítjük.)

A földi folyamatok jellemzésére az ektrópia különösen alkalmas, és egyben lehetőséget ad arra, hogy a gazdasági folyamatokat jellemezzük és az etikus munka kérdését elemezzük.

Ektrópia jelentése

- Távolság az egyensúlytól.
- Jövőbeli változások mértéke•
- Fizikai rendezettség•

Entrópia hiány•

A maximális kinyerhető munka (exergia)

$$B = T_0 P$$

A Föld nyílt rendszer, a Nap sugárzása a legfontosabb bejövő áram, és a Föld a világűrbe sugározza ki a Naptól felvett energiát. Az ektrópia változásában domináns tag a Naptól érkező energia exergiája.

A Naptól ténylegesen átlagosan 342 Ws energia jön négyzetméterenként, de a sugárzás egy részét a Föld reflektálja (102 W/m^2 -t), így a ténylegesen bejövő energiaáram 240 W/m^2 . A Nap sugárzási hőmérséklete 5704 K , így a felszínre bejövő exergiaáram: $J_{be} = (1 - 290/5700) = 234 \text{ W/m}^2$

A bejövő ektrópiaáram: $J = 0,8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Állandósult állapot akkor lesz a Földön, ha a bejövő ektrópiaáram eldisszipálódik. A munkavégzésünkkel az ektrópiát fogyasztjuk. A II. főtétel megköveteli, hogy dolgozzunk.

A termodinamika törvényei az élőlények alaptörvényét megadják. Csak az az élőlény maradhat fenn, amelyik biztosítja az ektrópiájának mennyiségét. Az élőlények munkát végeznek a tápanyag megszerzésért. A munkavégző képesség előállítása extra ektrópia felhasználást jelent. A fennmaradás feltétele, hogy a megszerzett tápanyag ektrópiája nagyobb legyen, mint a munka előállítására fordított ektrópia. Ez az összehasonlítás azonban nem történhet meg a szokásos összehasonlítással. Nem érzékeljük közvetlenül, és nem is számítjuk ki az ektrópiákat, hanem a tapasztalataink alapján, a tanulási folyamat eredményeként értékeljük a lehetőségeket. Ez a folyamat – az értékelés folyamata – az, amely lehetővé teszi azt, hogy az elgondolt javak realizációja és a tényleges realizáció közötti idő intervallumot áthidalja. Nélküle, ezeket a gondolatbeli összehasonlításokat aligha lennének képesek megtenni. Az étel megszerzésénél a megszerzéshez szükséges ektrópiát és az ételből nyerhető ektrópiát kell összehasonlítani az értékelés segítségével, hiszen a tényleges realizációban a kezdőpontban nem lehetünk biztosak. Amennyiben sikerült realizálni az étel ektrópiáját, akkor az ételt alakítjuk át a saját szervezetünk nem-egyensúlyiságává, amely feltétele a létezésünknek. Az értékelés tehát szubjektív, de a természet szigorú tanítómester. Ha rossz az értékelés, akkor az eredmény a szegényedés és a romlás irányába mutat.

Csak a természet által felkínált ektrópiával gazdálkodhatunk. A természet által felkínált ektrópia felhasználása minden élőlényre vonatkozik és szorosan kapcsolódik az evolúcióhoz. Termodinamikai szempontból az élőszervezetek alkalmazkodása az hogy az ektrópia készleteket/forrásokat biztosítják saját maguk számára. Az ehhez szükséges tudásnak több összetevője van. Megismerés – fel kell ismerni, hogy használható. Megszerzés- fel kell ismerni, hogy hogyan lehet megszerezni, és a felhasználás – a természeti formát át kell alakítani. Az evolúció

során a három tudás növekszik. A sikeres stratégiát követők extrópia többlethez jutnak, míg a sikertelenek eltűnnek.

Az emberi lét feltétele, hogy egy (az életformára jellemző) minimális csomagnál nagyobb legyen az általa birtokolt extrópia mennyisége, azaz a birtokolt javak mennyisége a gazdasági tevékenységen keresztül ne csökkenjen. A II. főtétel alapján az extrópia az igazi szűkös erőforrás, ezzel kell gazdálkodni.

Az ésszerű gazdálkodás alapelve, hogy minimális extrópia felhasználásával a lehető legnagyobb gazdagságot állítsuk elő. A mostani hatékonyság fogalmunk még a XIX. század maradványa, amikor a természet kimeríthetetlennek tűnt. Most már a klímaváltozás lehetősége mutatja, hogy tényleg szűkösek a természeti javak. Az emberiség extrópia felhasználásának jó közelítése a teljes primér energia felhasználás – az extrópia felhasználást meg kell szorozni a hőmérséklettel, és megkapjuk az energia felhasználást..

Ma az ember primér (teljes) energia felhasználása 40 mW/m^2 nagyságrendben van (A Föld felületre vonatkoztatva).. Ez az emberi energia-felhasználás végül is a felszín melegíti. A számítások azt mutatják, hogy ez $0,025 \text{ K}$ globális hőmérséklet növekedést okozott. Lehet, hogy még nem túl nagy, de már észrevehető, és az energia fogyasztás nő. Az elmúlt 30 év energiatakarékossága mellett a 50%-os volt a növekedés. . Fel kell tennünk a kérdést, hogy milyen törvény írja elő, hogy a gazdaság növekedése növekvő extrópia-felhasználást jelent. Ha így folytatjuk, akkor valóra válik a XIX. században jóslott hőhalál elmélet. Annyira felmelegítjük a bolygónkat, hogy megszűnik az élet lehetősége. A másik lehetőség, hogy a gazdasági hatékonyság értelmezésünket újragondoljuk.

6 Konklúzió

A nem-egyensúlyi alapokon nyugvó termodinamikában új állapotjelzők értelmezhetőek, amelyek egyensúlyi rendszerek esetén zérus értéket vesznek fel. A belsőenergia két részre osztható, az aktív energiára, amely a nem-egyensúlyi rendszer belső munkavégzőképessége, és a passzív energiára. Az aktív energia a köznyelvi elfogyó energia termodinamikai definíciója. A passzív energia a köznyelvi, illetőleg a statisztikus értelmezésű hőenergia. Az entrópia csak a passzív energiától függ, azaz csak az egyensúlyiságtól, a nemegyensúlyt jellemző aktív energia az extrópiában jelenik meg.

- 1 Idézi: Kovács László, Mikola sándor a kísérleti fizikatanítás úttörője és mestere, Fizikai Szemle 1977/3. 120.o.
- 2 Erwin Schrödinger What Is Life, Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- 3 W. Thomson On the universal tendency in nature to the dissipation of mechanical energy, Philosophical Magazine, Ser. 4, p. 304 (1852).
- 4 (<http://www.historyofscience.it/oldsite/historyofscience/StoriaDellaMeccanica001.htm>).
- 5 Dino de Paoli: Carnot's theory of technology: the basis for the science of physical economy, EIR, 26, 65-70, 1999.
- 6 S. Carnot. (1824). Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres a développer cette puissance, Ann l'École Normale Supérieure, 2esérie, tome 1, pp. 393–457.1872 .
- 7 Lord Kelvin (William Thomson), On an Absolute Thermometric Scale Founded on Carnot's Theory of the Motive Power of Heat , and calculated from Regnault's Observations , Philosophical Magazine October 1848 [from Sir William Thomson, Mathematical and Physical Papers, vol. 1 (Cambridge University Press, 1882), pp. 100-106.
- 8 Veronika Poor, A Concise Introduction of the Extropy, Interdisciplinary Description of Complex Systems - scientific journal, 2005, vol. 3, issue 2, pages 72-76.
- 9 Martinás Katalin: A fenntartható fejlődés termodinamikája -- avagy etikus-e takarítani?; Fizikai Szemle 1995 május p.86-92.
B. Gaveau, K. Martinás, M. Moreau, J. Tóth, Entropy, extropy and information potential in stochastic systems far from equilibrium, Physica A, 305, 2002, pp. 445–466.