

Entropia



Nyt tutustutaan suureeseen nimeltä entropia sekä lämpöopin toiseen pääsääntöön. Tämä luku on siinä mielessä teoreettisempi kuin muut luvut, että tässä painotetaan enemmän käsitteellistä ymmärtämistä kuin laskutekniikkaa.

Käymme läpi entropian käsitteen historian hyvin tiivistetysti ja pyrimme ymmärtämään sitä ensisijaisesti ilmiöpohjaisesti sekä näkemään, miten se liittyy muuhun tämän moduulin sisältöön.

Opittava sisältö:

- Entropia
- Lämpöopin II pääsääntö

Tarve uudelle käsitteelle

1800-luvun puolivälissä huomattiin, että tarvittiin uusi lämpöopin käsite. Miksi?

Pysähdytään pohtimaan höyrykoneen toimintaa.

- Høyrykone on *lämpövoimakone*: lämpö siirtyy itsestään lämpökattilasta kylmempään ympäristöön ilman, että sitä tarvitsee mitenkään pakottaa siirtymään. Siirtymisessä lämpö saadaan tekemään työtä.
- Høyrykoneiden *hyötysuhdetta* onnistuttiin pikku hiljaa parantamaan: samalla lämpöäärällä kone saatiin tekemään enemmän hyödyllistä työtä.

Kun höyrykoneiden tehokkuutta pyrittiin jatkuvasti parantamaan, niin 1800-luvun puoliväliin tultaessa oli tehty kaksi tärkeää huomiota:

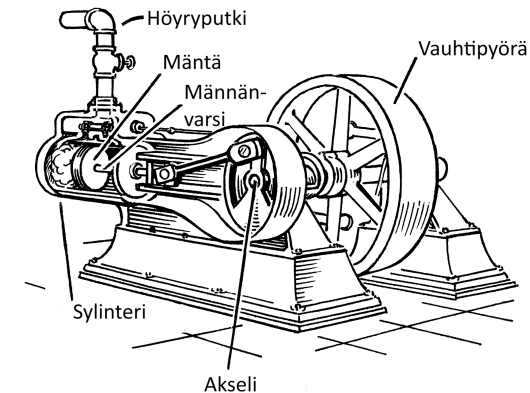
1. Lämpöä ei itsestään siirry kylmemmästä kuumempaan.
2. Lämpövoimakonetta ei ole mahdollista tehdä täydellisen tehokkaaksi: koskaan ei saada aivan kaikkea lämpöä muunnettua hyödylliseksi työksi. Syntyy siis *hukkalämpöä*.

Kiinnitä nyt erityistä huomiota siihen, miten entropian käsite onnistuu selittämään nämä kaksi piirrettä!

Höyrykone

Höyrykoneen perusidea on niin yksinkertainen, että se keksittiin jo 1600-luvun lopulla.

- Lämpökattilassa poltetaan palavaa ainetta.
- Lämpö saa vesihöyryn laajenemaan.
- Laajeneva höyry siirtyy höyryputkea pitkin sylinteriin.
- Sylinterissä laajeneva höyry luo painetta herkkäliikkeiseen mäntään.
- Liikkuva mäntä tekee hyödyllistä työtä, kuten saa veturin liikkumaan tai nostaa kaivoksesta vettä.



Kuva: Höyrykoneen kaaviokuva.

Entropian muutos

- Nämä havainnot piti jotenkin kyetä esittämään teoreettisesti, sillä tuolloin jo tunnettu *lämpöopin I pääsääntö ei sinänsä vaadi hukkalämmön syntyä, eikä estä lämpöä siirtymästä kylmemmästä kappaleesta kuumempaan.*
- Tämän takia Rudolf Clausius 1800-luvun puolivälissä päätyi määrittelemään entropian muutoksen.

Entropian muutos, ΔS

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

Q on siirtyvä lämpömäärä,
 T on säiliön lämpötila.

Entropian (muutoksen) yksikkö on J/K.

- Systeemillä on siis jotain “entropiaa”, joka muuttuu, jos lämpöä poistuu/vastaanotetaan.
- Aina kun systeemi luovuttaa lämpöä, jokin toinen systeemi vastaanottaa sitä → entropian muutos tapahtuu samanaikaisesti siis aina vähintään kahdessa systeemissä.
 - Entropian kokonaismuutos on näiden osamuutosten summa: $\Delta S_{kok} = \Delta S_1 + \Delta S_2$.

Lämpöopin I pääsääntö: $\Delta U = Q + W$, eli energia ei häviä, se vain muuntaa muotoaan.



Kuva: Rudolf Clausius.

Vielä tuossa vaiheessa ei voitu laskea entropian *absoluuttista* arvoa, sillä varsinaisesti entropiaa itsessään ei oltu määritelty, vain sen muutos. Ei edes tiedetty, mitä entropia konkreettisesti oli. Clausius itse piti entropiaa jonkinlaisena kappaleen “muutossisältönä”. Joka tapauksessa formaalisti entropian muutos oli periaatteessa “vain” kahden suureen suhde – laskutoimitus, joka mahdollisti havaittujen ilmiöiden täsmällisen selittämisen.

- Entropian käsite oli ovela (ja kaikessa yksinkertaisuudessaan kerrassaan nerokas) matemaattinen jippo, jonka avulla saatiin täsmällisesti määriteltä alussa mainitut kokeelliset havainnot. Miten niin?
→ Tehdään kaksi esimerkkilaskua, joissa sama määrä lämpöä siirtyy kahden säiliön välillä.

Esimerkki 1a

$$T_1 = 100 \text{ K}$$

$$T_2 = 50 \text{ K}$$

Laske entropian kokonaismuutos, kun lämpöä siirtyy määrän $Q = 1000 \text{ J}$ verran kuvan säiliöiden välillä **kuumemmasta** → **kylmempään**.

Ratkaisu

- Entropian muutos lämpösäiliössä on

$$\Delta S_1 = \frac{Q}{T_1} = \frac{-1000 \text{ J}}{100 \text{ K}} = -10 \text{ J/K.}$$

- Entropian muutos kylmäsäiliössä on

$$\Delta S_2 = \frac{Q}{T_2} = \frac{+1000 \text{ J}}{50 \text{ K}} = +20 \text{ J/K.}$$

Näin ollen entropian kokonaismuutos on

$$\Delta S_{\text{kok}} = \Delta S_1 + \Delta S_2 = -10 \text{ J/K} + 20 \text{ J/K} = +10 \text{ J/K.}$$

Esimerkki 1b

$$T_1 = 100 \text{ K}$$

$$T_2 = 50 \text{ K}$$

Laske entropian kokonaismuutos, kun lämpöä siirtyy määrän $Q = 1000 \text{ J}$ verran kuvan säiliöiden välillä **kylmemmästä** → **kuumempaan**.

Ratkaisu

- Entropian muutos lämpösäiliössä on

$$\Delta S_1 = \frac{Q}{T_1} = \frac{+1000 \text{ J}}{100 \text{ K}} = +10 \text{ J/K.}$$

- Entropian muutos kylmäsäiliössä on

$$\Delta S_2 = \frac{Q}{T_2} = \frac{-1000 \text{ J}}{50 \text{ K}} = -20 \text{ J/K.}$$

Näin ollen entropian kokonaismuutos on

$$\Delta S_{\text{kok}} = \Delta S_1 + \Delta S_2 = +10 \text{ J/K} - 20 \text{ J/K} = -10 \text{ J/K.}$$

Lämpöopin II pääsääntö

- Voidaan tehdä seuraava yleistys:
 - Aina kun lämpöä siirtyy kuumemmasta kylmempään
 $\rightarrow \Delta S_{kok} > 0$
 - Aina kun lämpöä siirtyy kylmemmästä kuumempaan
 $\rightarrow \Delta S_{kok} < 0$
- Koska lämpöä ei havaintojen mukaan koskaan siirry itsestään kylmäsäiliöstä kuumasäiliöön, Clausiuksen oli nyt helppo esittää tämä formaalisti.
 - \rightarrow Entropian kokonaismuutos on aina positiivinen
 - Ja koska entropian *muutos* on aina positiivinen, niin entropia, mitä se sitten onkaan, kasvaa aina.
 - Toisin sanoen **esimerkki 1b** on mahdoton, koska siinä entropian kokonaismuutos on negatiivinen.

Lämpöopin II pääsääntö

Itsestään etenevissä prosesseissa entropia aina kasvaa tai ideaalitalanteessa ei muutu.

Tai:

$$\Delta S_{kok} \geq 0$$

Koska entropian muutoksen kaavassa lämpötila esiintyy vakioarvona, se ei sovellu sellaisenaan kaikkiin tapauksiin. Yleensäkin systeemin lämpötila muuttuu, jos se menettää tai vastaanottaa lämpöä. Kaavaa käytettäessä, kuten esimerkeissä 1 ja 2, täytyy siis olettaa, että kyse on niin suuresta systeemistä, että mikään pieni lämpömäärä ei vielä havaittavasti muuta sen lämpötilaa, tai vaihtoehtoisesti kappaleen lämpötila on juuri sulamis- tai kiehumispisteessä, jolloin sen olomuodon alkaessa muuttua lämpötila ei muutu.

Jos halutaan laskea entropian muutos sellaisessa tilanteessa, jossa lämpötila muuttuu, täytyy käyttää kaavan differentiaalimuotoa (ks. s. 8)

Huomaa:

- Lämpöopin II pääsääntö pätee aina luonnossa riippumatta siitä, onko kyse lämpövoimakoneesta vai jostain muusta systeemistä.
- Vain ideaalitalanteessa entropian muutos on nolla.
- Kaikki sellaiset tapahtumat ovat mahdottomia, joissa *eristetyn systeemin* kokonaisentropia vähenisi.
 - Jos systeemi ei ole eristetty, sen entropia voi aivan hyvin vähentyä, kuten **esimerkki 1a** osoittaa: lämpösäiliön entropian muutos on negatiivinen.
 - **Esimerkin 1a** molemmat säiliöt yhdessä muodostavat eristetyn systeemin, sillä lämpöä siirtyy vain näiden kahden säiliön välillä.

Miten tämä pääsääntö nyt sitten onnistuu selittämään alussa mainitut havainnot?

- Koska entropian pitää aina kasvaa, lämpö ei koskaan voi siirtyä kylmemmästä kuumempaan, sillä kyseisessä prosessissa entropian kokonaismuutos olisi negatiivinen ja entropia pienenesi.
- Mutta entä havainto siitä, että kaikissa prosesseissa syntyy aina hukkalämpöä? → Tehdään taas pari esimerkkitehtävää.

Esimerkki 2a

Onko mahdollista esimerkki 1a:n tilanteessa lämpövoimakoneen tehdä siirtyvän lämmön avulla työtä **400 joulen** verran?

Ratkaisu

Koska osa lämmöstä muuntuu työksi, ei kylmäsäiliöön siirry kaikkea 1000 joulea lämpöä, vaan

$$Q_2 = Q_1 - W = 1000 \text{ J} - 400 \text{ J} = 600 \text{ J}.$$

Lasketaan nyt entropian kokonaismuutos.

- Lämpösäiliön entropian muutos

$$\Delta S_1 = \frac{-Q_1}{T_1} = \frac{-1000 \text{ J}}{100 \text{ K}} = -10 \text{ J/K}.$$

- Kylmäsäiliön entropian muutos

$$\Delta S_2 = \frac{Q_2}{T_2} = \frac{600 \text{ J}}{50 \text{ K}} = 12 \text{ J/K}.$$

- Kokonaisentropian muutos

$$\Delta S_1 + \Delta S_2 = -10 \text{ J/K} + 12 \text{ J/K} = 2 \text{ J/K}.$$

Vastaus: Koska kokonaisentropian muutos on positiivinen, lämpövoimakone voi tehdä 400 joulen työn.

Esimerkki 2b

Onko mahdollista esimerkki 1a:n tilanteessa lämpövoimakoneen tehdä siirtyvän lämmön avulla työtä **600 joulen** verran?

Ratkaisu

Koska osa lämmöstä muuntuu työksi, ei kylmäsäiliöön siirry kaikkea 1000 joulea lämpöä, vaan

$$Q - W = 1000 \text{ J} - 600 \text{ J} = 400 \text{ J}.$$

Lasketaan nyt entropian kokonaismuutos.

- Lämpösäiliön entropian muutos

$$\Delta S_1 = \frac{-Q_1}{T_1} = \frac{-1000 \text{ J}}{100 \text{ K}} = -10 \text{ J/K}.$$

- Kylmäsäiliön entropian muutos

$$\Delta S_2 = \frac{Q_2}{T_2} = \frac{400 \text{ J}}{50 \text{ K}} = 8 \text{ J/K}.$$

- Kokonaisentropian muutos

$$\Delta S_1 + \Delta S_2 = -10 \text{ J/K} + 8 \text{ J/K} = -2 \text{ J/K}.$$

Vastaus: Koska kokonaisentropian muutos on negatiivinen, lämpövoimakone ei voi tehdä 600 joulea työtä.

- Esimerkki 2a:n tilanteessa hukkalämpöä, eli sitä osaa lämmöstä joka ei muutu työksi, syntyisi 600 J.
- Kyseisen esimerkin lämpövoimakonetta ei ole mahdollista tehostaa siten, että hukkalämpöä syntyisi enää vain 400 J, sillä II pääsääntö estää sen.
- Mikä olisi maksimimäärä työtä, joka voidaan missään systeemissä tehdä? → Sen täytyy olla lämpösäiliöstä siirtyvä lämpömäärä kerrottuna ykköstä pienemmällä kertoimella. → Tuntuu luontevalta, että sopiva kerroin tähän olisi Carnot'n hyötysuhde, ja näin itse asiassa onkin.
- Tämä tulos johdetaan lämpöopin II pääsäännöstä viereisessä tekstiruudussa.

Lämpövoimakoneen maksimityö

$$W_{\max} = \eta_{\max} Q_1 = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) Q_1$$

- Lämpöopin II pääsäännön täsmällinen formaali muotoilu siis onnistui selittämään tärkeimmät havainnot ja ongelmat, jotka 1800-luvun termodynamiikassa nousivat esiin:
 - Lämpö ei koskaan voi siirtyä kylmemmästä kuumempaan, sillä kyseisessä prosessissa entropia pienenesi.
 - Kaikkea hukkalämpöä ei saada koskaan katoamaan, sillä tällöin entropia pienenesi.

Carnot'n hyötysuhteen ja lämpövoimakoneen maksimityön johtaminen

- Ideaalitalanteessa $\Delta S_1 + \Delta S_2 = 0$ (todellisissa tilanteissa aina positiivinen)

$$\Rightarrow \frac{-Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$$

$$\Rightarrow \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

- Nyt aikaisemmilta oppitunneilta tiedetään, että

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

- Koska parhaimmillaan $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$, niin

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

→ Saatiin Carnot'n hyötysuhde, eli maksimaalinen hyötysuhde!

Koska $\eta = \frac{W}{Q_1}$, niin $W = \eta Q_1$.

$$\text{Tällöin } W_{\max} = \eta_{\max} Q_1 = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) Q_1.$$

Lisätietoa

Vaikka edellä esitellyssä entropian muutoksen suureyhtälössä lämpötila onkin vakio, entropian muutoksen voi laskea niissäkin tilanteissa, joissa systeemin lämpötila muuttuu. Tällöin tarkastellaan aina differentiaalista (eli äärimmäisen pientä) määrää siirtyvää lämpöä kerrallaan jolloin lämpötila muuttuu äärimmäisen vähän, ja summataan kaikkien näiden “miniprosessien” differentiaalisen pienet entropian muutokset dS yhteen kokonaismuutokseksi. Matemaattisena operaationa kyse on integroimisesta, eikä se fysiikan puolella kuulu enää lukion oppimäärään (vaikka pitkässä matematiikassa sitä tehdäänkin).

Lisäksi täytyy olettaa, että lämpöä siirtyy niin hitaasti, että kun differentiaalinen määrä lämpöä on siirtynyt, lämpötila on tasoittunut koko systeemissä kauttaaltaan samaksi. Jos systeemin eri osat olisivat eri lämpötiloissa, ei olisi mielekästä käyttää jotain yhtä lämpötilan arvoa koko systeemin lämpötilana. Tämän tapaista ideaalista prosessia, jossa prosessi etenee äärimmäisen hitaasti ja systeemi on jatkuvasti tasapainossa, kutsutaan *reversiibeliksi* ja se yleensä merkitään entropian yhteydessä differentiaalisen lämpömäärän lyhenteen alaindeksiin δQ_{rev} .

(Tässä differentiaalinen merkinä käytetään d :n sijaan kreikan δ -kirjainta korostamaan sitä, että – toisin kuin entropia – lämpö ei ole tilasuure, eli sen muutos ei riipu pelkästään alku- ja lopputilasta.)

Näillä lisäoletuksilla voidaan entropian differentiaalinen muutos määritellä $dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T}$, ja kun se integroidaan, saadaan

$$\Delta S = \int \frac{\delta Q_{rev}}{T}. \text{ Reversiibeleille prosesseille tämä on nolla}$$

$$\int \frac{\delta Q_{rev}}{T} = 0.$$

Nyt voidaan lämpöopin II pääsääntö kirjoittaa muodossa

$$\Delta S \geq \int \frac{\delta Q}{T}.$$

Yllä oleva epäyhtälö soveltuu nyt siis myös epäreversiibeleihin prosesseihin. Todelliset luonnossa tapahtuvat prosessit, joissa lämpöä siirtyy lämpimämmästä systeemistä kylmempään, eivät ole reversiibeleitä, eli niissä esiintyy aina sisäisiä lämpövirtauksia tai muita epätasapainotekijöitä, jolloin *niiden entropian muutosta ei voi suoraan laskea todellisesta lämpösiirrosta*. Entropian muutos on niissä kuitenkin täsmälleen sama kuin vastaavassa reversiibelissä prosessissa (jossa siis systeemin alku- ja lopputilat ovat samat kuin epäreversiibelissä)! Tämän vuoksi systeemin entropian muutoksen voi aina laskea reversiibeliä reittiä pitkin. Ja tämän vuoksi yllä esitetty yhtälö pätee sekä kaikkiin luonnossa tapahtuviin että kaikkiin ideaalisiin prosesseihin.

Entropian mikroskooppinen selitys

- Entropian keksiminen synnytti myös uusia kysymyksiä:
 - *Miksi* entropia kasvaa aina?
 - Mitä entropia varsinaisesti *on*?
- Näihin kysymyksiin vastasi ensimmäisenä Ludwig Boltzmann vuonna 1877.
- Siinä missä Clausius tarkasteli systeemiä makroskooppisella tasolla, Boltzmann tarkasteli sitä mikroskooppisella tasolla.
- Jokainen systeemi koostuu pienistä rakenneosista (atomit, molekyylit).
- Se, missä tilassa rakenneosat ovat, selittää koko systeemin tilan.

Makrotila = Koko systeemin tila makroskooppisella tasolla tilanmuuttujien avulla kuvailtuna (tilavuus, paine, sisäenergia, jne.) ilman tietoa systeemin rakenneosien tiloista.

Mikrotila = Systeemin yksittäinen mikroskooppinen konfiguraatio. Mikrotila on siis täsmällinen luettelo jokaisesta systeemin rakenneosan tiloista (paikka, nopeus, kvanttitilat, jne.)



Kuva: Ludwig Boltzmann

Makroskooppinen taso tarkoittaa tarkastelun aluetta monta kertaluokkaa atomien kokoluokkaa suuremmalla alueella.

Mikroskooppinen taso tarkoittaa tarkastelun aluetta rakenneosasten, eli atomien ja molekyylien, kokoluokassa.

- Jokin tietty mikrotila aiheuttaa aina systeemin makrotilan.
- Otetaan tarkoituksellisen kärjistetty esimerkki:

Esimerkiksi mikrotila:

- 1000 kpl typpikaasumolekyylejä
- tasaisesti jakautuneina
- kuutiometrin kokoiseen säiliöön
- kaikilla molekyyleillä nopeus 600 m/s, paitsi yhdellä molekyylillä nopeus 599 m/s

→ Aiheuttaa seuraavan makrotilan kaasusysteemille:

- $V = 1 \text{ m}^3$
- $T = 400 \text{ K}$
- $p = 5,5 \cdot 10^{-18} \text{ Pa}$

- *Jos mikrotila vaihtuu sellaiseksi, että jollain toisella molekyylillä onkin nyt nopeus 599 m/s (ja muilla 600 m/s), niin minkälainen on systeemin makrotila?*
 - Täsmälleen sama!
 - Sama pitää paikkansa, olipa millä tahansa noista tuhannesta molekyylistä nopeus 599 m/s ja muilla 600 m/s.
- Myöskin jos molekyyliden paikat hiukan muuttuvat, mutta ne ovat edelleen tasaisesti levittäytyneinä säiliöön yllä mainituilla nopeuksilla, makrotila on edelleen sama.
- Yllä olevasta käsittelystä voidaan ymmärtää, että yhtä tiettyä makrotilaa vastaa käsittämättömän lukuisa määrä mikrotiloja (tässä esimerkissä mahdollisesti luokkaa 10^{400}).
- Mitä suurempia ovat hiukkasten lukumäärä, hiukkasten liike-energia, valtaama tilavuus jne, sitä enemmän mahdollisia mikrotiloja on yhtä makrotilaa kohti.

- Merkitään kirjaimella Ω niiden mikrotilojen lukumäärää, jotka aiheuttavat juuri jonkin tietyn makrotilan.
- Boltzmann esitti, että systeemin entropian suuruus jossain makrotilassa on suorassa suhteessa Ω :aan.
- Hän kirjoitti yhtälön, jonka Max Planck myöhemmin viimeisteli nykyiseen alla olevaan muotoon.

Entropia, S

$$S = k \ln \Omega,$$

$$k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23} \text{ J/K (Boltzmannin vakio)}$$

Ω on systeemin makrotilaa vastaavien mikrotilojen lukumäärä

- Koska k on vakio ja logaritmi lukumäärästä on periaatteessa vain “skaalattu” lukumäärä, niin tämän yhtälön perusteella voidaan entropian sanoa olevan mikrotilojen lukumäärän mitta!
- Boltzmann siis vihdoinkin onnistui selittämään, mitä entropia on: **Entropian määrä systeemissä kertoo, paljonko erilaisia mikrotiloja systeemillä voi olla niin, että systeemin makrotila pysyy samana.**
→ **Suuri entropia viittaa suurempaan määrään mahdollisia mikrotiloja kuin pieni entropia.**

Omega, (isona kirjaimena Ω , pienenä ω) on kreikkalaisen aakkoston viimeinen kirjain. Se äännetään pitkänä o-kirjaimena.

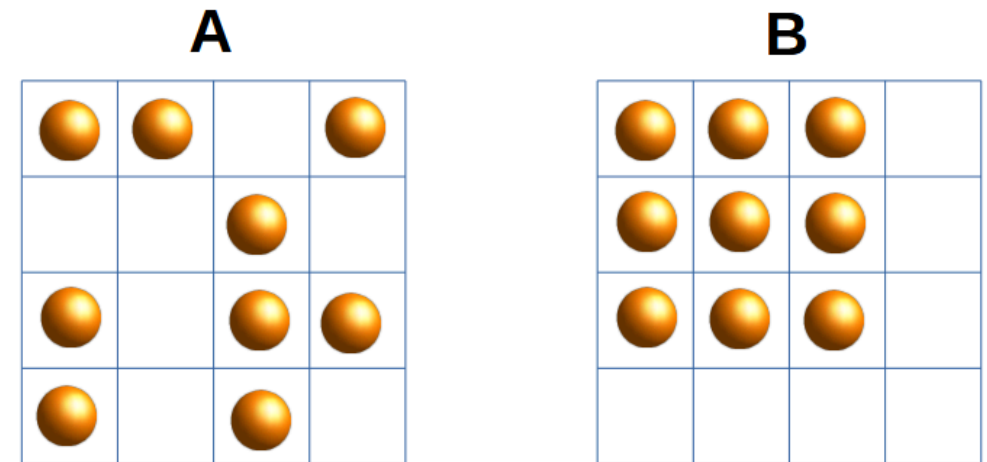
Entropia epäjärjestyksen mittarina

Entropia voidaan nähdä myös systeemin “epäjärjestyksen” mittana. Fysiikassa epäjärjestyksestä ei ole tarkemmin määritelty, vaan kyse on vain tavasta yrittää selittää entropian mikroskooppinen malli sellaisella tavalla, joka olisi helppo intuitiivisesti ymmärtää. Satunnaisesti säiliöön levittäytyneet molekyylit ovat enemmän epäjärjestyksessä kuin yhteen nurkkaan kerääntyneet molekyylit. Yhdessä läjässä olevilla molekyyleillä ei ole niin paljon valinnan vapautta eri tilojen arvojen suhteen kuin hajallaan olevilla molekyyleillä. Systeemi on siis epäjärjestyneempi, jos siinä on enemmän tapoja järjestää molekyylit ilman, että makrotila muuttuu. Vertaa tätä aakkosiin: aakkoset voivat olla järjestyksessä vain yhdellä tavalla, kun taas epäjärjestyksessä lukuisilla eri tavoilla.

- Miten tämä liittyy lämpöön?
- Lämpötila on rakenneosien satunnaisesta liikkeestä johtuva ilmiö, ja lämmön vastaanottaminen lisää tätä liikettä.
- Näin ollen kun systeemiin siirtyy lämpöä, se saa lisää mahdollisuuksia mikrotilojen lukumääriin → rakenneosasten liike-energiat voivat jakaantua entistä useammilla tavoilla osasten kesken.
- Lämmön vastaanottaminen siis lisää rakenneosien epäjärjestystä.
- Näin siis korkeammassa lämpötilassa olevalla systeemillä on enemmän entropiaa kuin matalassa lämpötilassa olevalla.
- Kun lämpötila kasvaa, mikrotilojen määrä kasvaa logaritmisesti.
 - Pienikin lämmön siirtyminen aiheuttaa valtavan paljon suuremman entropian muutoksen kylmässä systeemissä kuin kuumassa systeemissä.
 - Jos siis lämpöä siirtyy kylmästä kuumaan systeemiin, entropian kokonaismuutos on negatiivinen.
 - Jos lämpöä siirtyy kuumasta kylmään systeemiin, entropian kokonaismuutos on positiivinen.

Havainnollistus

- Tilanne A: 9 kaasuhiukkasta sattumanvaraisesti levittäytyneinä laatikkoon → kaasun tilavuus 16 ruutua.
- Samat hiukkaset voisivat sattumalta ryhmittäytyä myös järjestyksellisempään konfiguraatioon B, jolloin koko systeemin tilavuus olisi pienempi, 9 ruutua.
→ A ja B ovat eri makrotiloja.

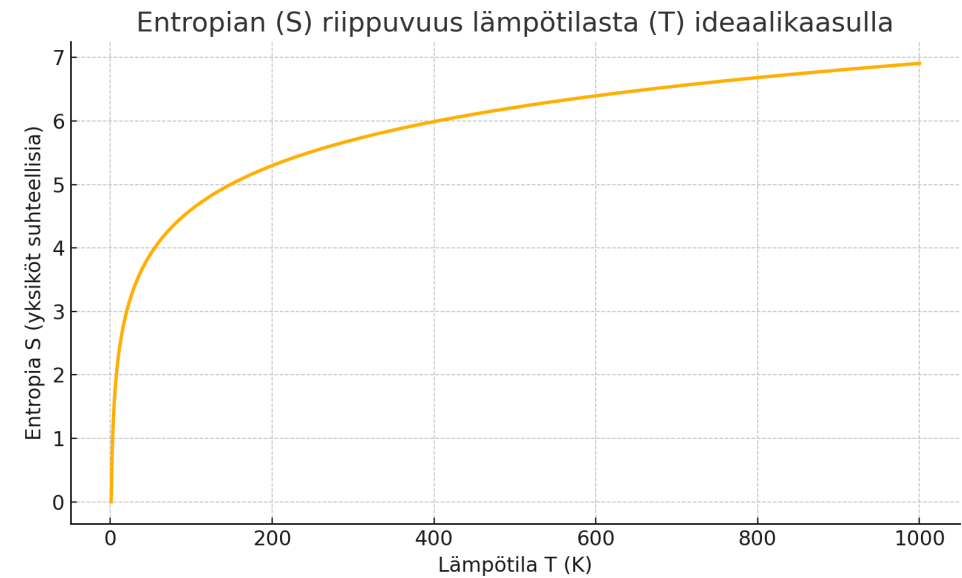


Jos hiukkaset ovat muuten keskenään samanlaisia, niin on vain neljä mahdollista mikrotilaa, joissa kaasun tilavuus olisi 9. On paljon enemmän mikrotiloja, joissa kaasun tilavuus olisi 16. Vaihtoehdolla A on suurempi entropia kuin B:llä.

Jos hiukkaset liikkuvat satunnaisesti laatikossa, on todennäköisempää, että kaasun tilavuus on 16 kuin 9.

- Tätä kautta ymmärrettynä lämpöopin II pääsääntö on oikeastaan enemmänkin tilastollinen seuraus kuin rikkomaton luonnonlaki.
 - Periaatteessa rakenneosasten voisi olla mahdollista järjestyä mikrotilaan, jonka entropia on matalampi kuin jonkin toisen mikrotilan entropia (tai lämmön siirtyä suuntaan, jonka vaikutuksesta entropia pienenesi).
 - Koska korkeampi entropia tarkoittaa suurempaa määrää vaihtoehtoja mikrotiloille, on kuitenkin paljon todennäköisempää löytää systeemi korkeamman entropian tilasta.

Epätodennäköiset tilat eivät käytännössä koskaan toteudu, koska ne ovat yleensä aivan käsittämättömän epätodennäköisiä.



Kuvaaja: Alhaisemmissa lämpötiloissa entropia muuttuu voimakkaammin kuin korkeammissa.

--	--

Luvun kuvat

- Sivu 1. Kansikuva.
 - Lähde: ChatGTP
- Sivu 2. Höyrykoneen kaaviokuva.
 - Lähde: Pearson Scott Foresman, Public domain, via Wikimedia Commons
 - [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Steam_Engine_\(PSF\).png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Steam_Engine_(PSF).png)
- Sivu 3. Rudolf Clausius.
 - Lähde: Public domain, via Wikimedia Commons
 - <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Clausius.jpg>
- Sivu 9. Ludwig Boltzmann.
 - Lähde: Public domain, via Wikimedia Commons
 - <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Boltzmann2.jpg>