

Soojuslevi (KAT0026)

Soojuslevi on inseneriteaduse valdkond, mis tegeleb energia muundumise uurimisega/kirjeldamisega (termodünaamika) ja energia ülekandumise mehhanismide uurimisega/kirjeldamisega.

Termodünaamika on teadusharu, milles kehtivad seadused on tõenäosuslikud. Kuna termodünaamikas vaadeldaks suuri ainehulkasid, siis on vastavad seaduspärasused tõesed (tõenäosus ≈ 1).

Matemaatiline statistika ütleb, et juhusliku suuruse N -kordsel realiseerimisel on keskvärtuse standardhälve $\sqrt{N}$ korda väiksem, kui juhusliku suuruse enese standardhälve. Näiteks ühe molekuli ruutkeskmise kiiruse $\bar{v}$ ja selle kiiruse standardhälve δv on ligikaudu võrdsed $\bar{v} \approx \delta v$. N molekuli ruutkeskmise kiiruse $\overline{v_N}$ standardhälve δv_N on $\sqrt{N}$ korda väiksem, kui üksiku molekuli kiiruse ruutkeskmise hälve. Seega $\delta v / \bar{v} \approx 1/\sqrt{N}$. See tähendab, et näiteks 1 mm^3 gaasis (nt õhk), mis on temperatuuril 0°C ja atmosfäärirõhul, ehk milles on $N = n * N_A = 2,7 * 10^{19}$ molekuli, on suuruste statistilised vead umbes $\frac{1}{\sqrt{2,7*10^{19}}} = 1,9 * 10^{-10} (\approx 0)$.

Põhimõisted

Süsteem – on mingite (mõtteliste või reaalsete) piiridega piiratud ruum.

Soojus – iseloomustab süsteemi energiat. On süsteemi soojusliikumise energia.

Temperatuur – on osakeste kineetilise energia mõõt. $E = 3/2 kT = (mv^2)/2$. Kahe süsteemi temperatuurid on võrdsed, kui nende süsteemide kontaktil ei toimu soojuse ülekannet (soojuslevi) nende süsteemide vahel.

Töö – on jõud, mida tuleb rakendada, et liigutada süsteemi algolekust lõppolekusse: $W = \int F ds$. NB! Integraali mõiste

Soojusvoog: q [W/m^2]

Soojusvool: Q [W]

(Mitte-)statsionaarne soojuslevi

Suletud süsteem – ei vaheta massi, soojust võib vahetada, võib teha tööd, temperatuur võib muutuda.

Avatud süsteem – võib vahetada massi, soojust, võib teha tööd ja temperatuur võib muutuda.

Adiabaatiline protsess/süsteem – võib vahetada massi, soojust ei vaheta (st, et süsteemis ei eraldu ja süsteemis ei neeldu soojust), võib teha tööd, temperatuur muutub. Entroopia ei muutu.

Entroopia – $\Delta S = \Delta Q/T$, kus ΔQ on süsteemila antav soojushulk ja T on süsteemi temperatuur. Suletud süsteemi entroopia ei saa kunagi kahaneda ehk $\Delta S > 0$ või $\Delta S = 0$ (TD II seadus).

Isotermne protsess/süsteem – võib vahetada massi, võib vahetada energiat, võib teha tööd, temperatuur ei muutu.

Isoleeritud protsess/süsteem – ei vaheta massi, energiat ega tööd, temperatuur võib muutuda.

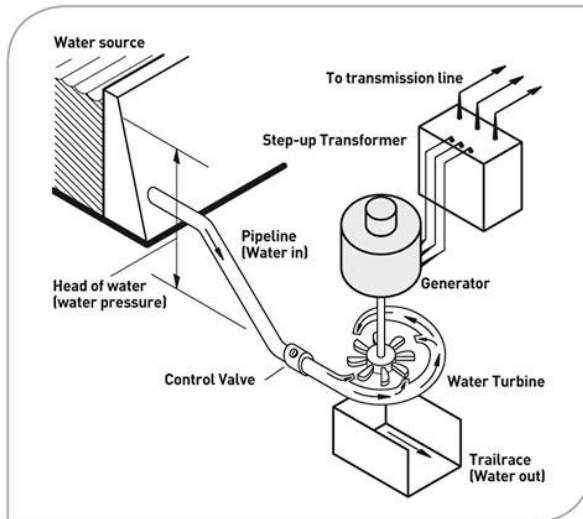
Faasimuutus

Soojusmahtuvus – näitab kui kiiresti kasvab kehas (materjalis) olev soojushulk temperatuuri muutumisel: $c = dQ/dT$

Erisoojusmahtuvus – näitab kui kiiresti kasvab kehas (materjalis) olev soojushulk temperatuuri muutumisel: $c = \frac{dQ}{m dT}$; näitab kui palju peab andma 1 massiühiku raskusele või 1 ainehulga suurusele kehale (materjalile) soojust/energiat, et muuta tema temperatuuri 1 K võrra.

Intensiivne suurus/omadus – nt: keemiline potentsiaal, temperatuur, kontsentratsioon, rõhk, tihedus jne – ei sõltu süsteemi suurusest

Ekstensiivne suurus/omadus – nt: mass, maht, entalpia, ainehulk, siseenergia, soojusmahtuvus jne.



Joonis 1. Hüdrolektrijaama skeem

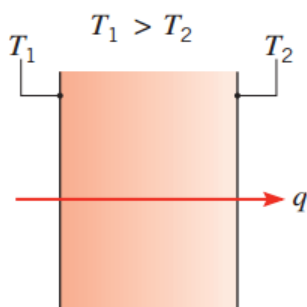
1.1. Sissejuhatus

Soojuslevi (soojus) on energia, mis kandub ühelt kehalt teisele nende kehade temperatuurierinevuste tõttu. → Kui esineb temperatuuride erinevus, toimub soojuslevi.

Soojuslevi saab jagada kolmeks:

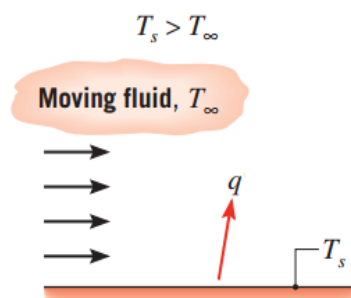
Konduktsioon

Läbi tahke keha või liikumatu fluidumi



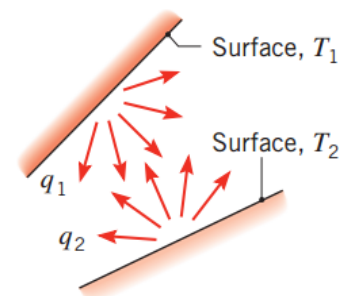
Konvektsioon

Pinnalt liikuvasse fluidumisse või vastupidi



Radiatsioon

Kahe keha vahel ilma kehade kontaktita



1.2. Füüsikaline tagapõhi

Soojuslevi mõistmiseks on vaja teada seda põhjustavaid füüsikalisi mehhanisme. Insenerina on vaja tihti vastata peamisele küsimusele: Kui palju energiat tuleb anda või võtta süsteemist ühes ajaühikus?

1.2.1. Konduktsioon

Konduktsiooni võib mõista kui osakeste vaheliste interaktsioonide tulemusena toimuvat energia ülekannet suurema energiaga osakestelt väiksema energiaga osakestele.

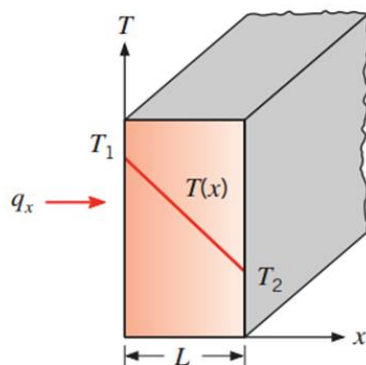
- Liikumatu gaas kahe seina vahel, kusjuures seinad on erineval temperatuuril. Temperatuuri igas ruumpunktis võib mõista kui gaasimolekulide energiat selles punktis. See energia on seotud molekulide kaootilise liikumisega (kiirus) aga ka molekulisestest liikumistega (võnkumised). Suurem energia vastab kõrgemale temperatuurile. Kui molekulid põrkuvad, toimub energia ülekanne kõrgema energiaga molekulidelt madalama energiaga molekulidele. Seega temperatuurigradiendi olemasolu korral toimub energia ülekanne kõrgema temperatuuriga piirkonnast madalama temperatuuriga piirkonda ehk soojusvoog on temperatuuri vähenemise suunaline. Järelikult võib molekulide kaootilise liikumise tulemusena toimuvat soojusülekannet vaadelda kui energia difusiooni.

Analoogselt gaasidega toimub konduktsioon ka vedelikes, kuid kuna seal on molekulide vahelised kaugused väiksemad, on molekulide vahelised interaktsioonid tugevamad ja põrked sagedasemad.

Tahkistes on konduktsioon seotud aatomite liikumisest (vibratsioon) tingitud võre võnkumistega (elektrit juhtivad ja mittejuhtivad tahkised) ning vabade elektronide liikumisega (elektrit juhtivad tahkised).

Soojuslevi saab kirjeldada kineetikavõrranditega, mis võimaldavad arvutada energiahulka, mis tuleb/viiakse ühes ajaühikus. Konduktsiooni korral on see kineetikavõrrand tuntud kui **Fourier' seadus**. Ühedimensionaalse seina jaoks (Joonis 2), kus temperatuurijaotus on $T(x)$, on kineetikavõrrand järgmine:

$$q_x = -k \frac{dT}{dx}$$



Joonis 2. Ühedimensionaalne soojusjuhtivus

Soojusvoog (q_x) on alati pinna normaali suunaline ning ta on proportsionaalne temperatuurigradiendiga $\frac{dT}{dx}$. Proportsionaalsuskoeffitsient k on soojusjuhtivustegur [W/(m·K)]. Joonis 2 kujutatud statsionaarses režiimis toimuva soojusjuhtivuse korral on temperatuurigradient avaldatav:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L}$$

Soojusvoog on sellisel juhul avaldatav:

$$q_x = k \frac{T_1 - T_2}{L}$$

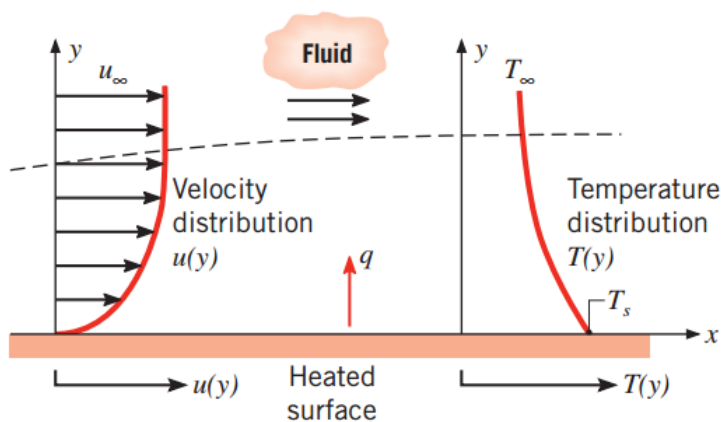
Soojusvool on:

$$Q_x = q_x \cdot A$$

1.2.2. Konvektsioon

Konvektiivne soojuslevi toimub kahe mehhanismi teel. Esiteks, difusiivne soojuslevi ehk konduktsioon ja teiseks suurte ainehulkade omavahelise segunemise teel. Konvektiivse soojuslevi korral esineb tihti olukord, kus fluidum (ehk voolis) liigub üle pinna, kusjuures mõlemad on erinevatel temperatuuridel (Joonis 3). Voolamise tulemusena tekib kiirusgradient: $u(y) = 0$ ($y = 0$) ja $u(y) = u_\infty$ ($y = y_b$), kus alaindeks b tähistab voo keskmist väärtust. Seda piirkonda tuntakse kui hüdrodünaamiline aluskiht. Kui pinna ja fluidumi temperatuurid erinevad, esineb temperatuurigradient: $T(y) = T_s$ ($y = 0$) ja $T(y) = T_\infty$ ($y = y_b$). Seda piirkonda tuntakse kui termiline aluskiht, mis võib olla hüdrodünaamilise aluskihiga võrdse paksusega.

NB! Pinna lähedal ($y \approx 0$), kus $u(y) \approx 0$, on soojuslevi määratud konduktsiooniga.



Joonis 3. Aluskihi teke konvektiivse soojuslevi korral

Konvektsiooni saab jagada:

Loomulik/vaba konvektsioon	Sundkonvektsioon
Toimub üleslükkejõudude tulemusena, mis on tingitud tiheduste erinevustest, mis omakorda on tingitud temperatuuride erinevustest.	Fluidumi liikumine on tekitatud väliste seadmetega – ventilaatorid, puhurid, pumbad.

Konvektiivset soojusülekannet mõjutab ka see kuidas soojus üle kantakse:

Faasimuutuseta toimuv konvektsioon	Faasimuutusega toimuv konvektsioon
Soojendamine, jahutamine	Keemine, kondenseerumine

Sõltumata konvektsiooni viisist saab seda kirjeldada järgmise võrrandiga, mis on tuntud kui **Newtoni jahtumise seadus**:

$$q = h(T_s - T_\infty)$$

Suurus h on soojusülekandeegur [$W/(m^2 \cdot K)$], mille väärtus sõltub piirkihil olevatest tingimustest, mida mõjutavad pinna geomeetria, fluidumi liikumise iseloom, ning fluidumi termodünaamilised ja transpordiomadused.

1.2.3. Radiatsioon ehk soojuskiirgus

Soojuskiirgus on energia, mida kiirgab/emiteerib keha, mille temperatuur on kõrgem kui 0 K. Soojuskiirgust emiteerivad nii tahkised, vedelikud kui ka gaasid (viimased on kokkuvõtlikult voolised ehk fluidum). Soojuskiirguse korral toimub energia ülekanne ehk soojuslevi elektromagnetlainete või footonite abil. Radiatsiooni toimumiseks, erinevalt konduktsioonist ja konveksioonist, ei ole vaja füüsilist keskkonad ning radiatsioon toimub kõige efektiivsemalt absoluutses vaakumis.

Keha kiirgab temasse salvestunud energiat. Kiirus, millega keha emiteerib ühe ruutmeetri suuruselt pinnalt temasse salvestunud energiat, nimetatakse kiirgusintensiivsuseks või ka võimsustiheduseks (E). Selle maksimaalne väärtus on määratud **Stefan-Boltzmanni seadusega**:

$$E_b = \sigma T_s^4$$

Siin σ on Stefan-Boltzmanni konstant ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$), T_s on pinna absoluutne temperatuur. Sellist pinda nimetatakse absoluutselt mustaks kehaks.

Reaalse keha poolt radiatsiooni teel emiteeritud soojusvoog on väiksem kui samal temperatuuril absoluutselt musta keha poolt samal temperatuuril emiteeritud soojusvoog:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4$$

Siin ε on materjalist ja pinnaviimistlusest sõltuv suurus, mille väärtus on vahemikus 0 kuni 1.

Kui kehale langeb teiselt kehalt kiirgunud soojuskiirguse voog, siis kiirus, millega keha seda neelab (G_{abs}), sõltub tema neelduvusest α ($0 \leq \alpha \leq 1$), mis omakorda sõltub nii pinnast kui ka temale langevast kiirgusest.

$$G_{abs} = \alpha G$$

Kui $\alpha < 1$ ja keha on läbipaistmatu, siis osaliselt pealelängenud kiirgus peegeldub, Kui keha on poolläbilaskev, siis osaliselt läheb kiirgus temast läbi. Kehas sisalduvat energiat (temperatuuri) mõjutavad ainult emiteeritud ja neeldunud soojuskiirgus, peegeldunud ja läbinud kiirgus keha temperatuuri ei mõjuta.

Paljud inseneriprobleemid: vedelikud, tahkised – kiirgusele läbipaistmatud või poolläbipaistvad; gaasid – kiirgusele läbipaistvad.

Paljudel juhtudel saab radiatsiooni kirjeldada võrrandiga:

$$Q_{rad} = h_r A (T_s - T_{sur})$$

kus soojuskiirgusega leviv soojusvoog on kirjeldatud analoogselt konveksiooniga. Ehk kiirgusega leviv soojusvoog on proportsionaalne temperatuuride vahega. Siin proportsionaalsustegur h_r on avaldatav järgmiselt:

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s + T_{sur})(T_s^2 + T_{sur}^2)$$

1.2.4. Soojuslik takistus

Soojusvoog ja soojusvool on omavahel seotud soojusvoo normaali suunalise soojusvahetuspinna A kaudu. Soojusvoolu saab avaldada ka järgmiselt:

$$Q = qA = \frac{\Delta T}{R}$$

Siin ΔT on vastav temperatuuride erinevus ja suurus R on termiline takistus, mille kuju oleneb soojuslevi mehhanismist. Nt konduktsiooni korral $R = L/kA$ [K/W].

1.3. Termodünaamika (TD) ja soojuslevi seosed

Soojuslevi ja termodünaamika (I ja II seadus) on omavahel tihedalt seotud. Soojuslevi probleemide lahendamisel on tihti heaks alguspunktiks termodünaamika I seadusest lähtumine.

1.3.1. TD I seadus – energia jäävuse seadus

Määrab, et süsteemi summaarne energia on jääv suurus ja saab muutuda ainult siis, kui energia liigub üle süsteemi piiride. Suletud süsteemi korral saab energia liikuda kas soojusena või tööna. Seega kogueenergia muutus on:

$$\Delta E = \Delta Q + \Delta W$$

$\Delta Q > 0$ kui

$\Delta W > 0$ kui

Avatud süsteemi korral liigub energia üle süsteemi piiride ka massiga/ainega. Sellisel juhul saab ainega siseneva (või väljuva) kogueenergia jagada kolmeks peamiseks energialiigiks: kineetiline ja potentsiaalne energia (mehhaaniline energia) ning siseenergia (soojusenergia, keemiline energia, tuumaenergia).

$$E = E_{kin} + E_{pot} + U = \frac{1}{2}mw^2 + mgz + U$$

Ehk aine energia muutus on:

$$\Delta E = \Delta E_{kin} + \Delta E_{pot} + \Delta U$$

Süsteemis võib toimuda ka energia konversioon.

TD I seadus ajavahemikus dt: Süsteemi kogueenergia muutus on võrdne süsteemi sisenev energia miinus süsteemist väljuv energia. Need suurused on sõltuvad süsteemi pinna suuruselt ja on mõõdetavad energia ühikuga [J].

$$\Delta E = E_{in} - E_{out}$$

Termilise ja mehaanilise energia võrrand ajavahemikus dt: Süsteemi termilise ja mehaanilise energia muutus on võrdne süsteemi siseneva termilise ja mehaanilise energiaga miinus süsteemist väljuv termiline ja mehaaniline energia pluss süsteemis genereeritud termiline ja mehaaniline energia. Süsteemis genereeritud energia on seotud süsteemi mahuga.

$$\Delta E = E_{in} - E_{out} + E_{gen}$$

Sama võrrandi võib defineerida ühe ajaühiku kohta:

$$\dot{E} = \frac{dE}{dt} = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_{gen}$$

kus $\dot{E}$ on süsteemi energia muutumise kiirus [J/s ehk W].

Kui $\Delta E = 0$, siis

1.3.1.1. Siseenergia ja entalpia

Soojuslevis tihti on kineetilise ja potentsiaalse energia muutused väga väikesed ja neid võib ignoreerida. Sellisel juhul $\Delta E = \Delta U$.

Siseenergia saab omakorda jagada: faasisisese liikumisega, pöörlemisega ja/või vibreerimisega seotud komponent (soojusmahtuvus, temperatuuri muutus), molekulide vaheliste jõududega seotud komponent (faasiüleminek), aatomite vahelistes keemilistes sidemetes seotud komponent (reaktsioonisoojus) ning tuumaenergia. Soojusmahtuvusega ja faasiüleminekuga seondavaid soojusefekte loetakse soojusenergiaks – need pakuvad meile huvi käesolevas kursuses.

Suletud süsteemis $\Delta E = \Delta U = \Delta Q + \Delta W$, kui E_{kin} ja E_{pot} on marginaalsed. Tihti kirjutatakse see võrrand ka kujul $\Delta U = \Delta Q - \Delta W$. Konstantse rõhuga protsessis: $\Delta W = p\Delta V$.

Entalpia – on defineeritud kui süsteemi siseenergia ning süsteemi rõhu ja mahu korrutise summa:

$$H = U + pV \text{ ehk } \Delta H = \Delta U + p\Delta V.$$

H, U ja V on olekuparameetrid.

Seega saame, et konstantse rõhuga protsessis $\Delta Q = \Delta H$ ehk konstantse rõhu korral on entalpia muutus võrdne pööratava protsessi soojusefektiga kui süsteem teeb ainult pV tööd. Tavaliselt on konstantse rõhu tingimused määratud väliskeskkonna poolt ja muutused süsteemis toimuvad nii kiiresti, et neid ei ole võimalik korralikult mõõta. Tööd aga saab siiski hinnata väliskeskkonna mahu muutuse kaudu.

Ideaalgaasi korral sõltuvad entalpia ja siseenergia ainult temperatuurist. Reaalgaaside korral on entalpia ja siseenergia sõltuvus rõhust suhteliselt väike nagu ka vedelikele ja tahkistele. Juhul kui süsteemis ei toimu temperatuuri, koostise või faasimuutust, siis enamasti eeldatakse, et entalpia ja siseenergia muutust ei toimu.

NB! Tuleb vahet teha erinevatel tähistustel: U, H – vastavalt siseenergia ja entalpia [J]; u, h – vastavalt erisiseenergia ja erientalpia [J/kg või J/mol].

1.3.1.2. Entalpia (muutus)

Soojusvahetites võivad toimuvad erinevad protsessid, millega kaasneb entalpia muutus: temperatuuri muutus, aurustumine, keemine, kondenseerumine, sulamine, tahkumine. Neid muutuseid saab graafiliselt kujutada p-v-T diagrammidel (Joonis 4) või esitada tabelites (Tabel 1). Tabel 1 või termodünaamiliste seoste kaudu (nt $dh = c_p dT + \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \right] dP$). Rõhk, erimaht ja temperatuur on termodünaamilised, omavahel seotud muutujad, kusjuures vastavalt ideaalgaasi seadusele saab alati neist ühe leida teiste kaudu – P-v diagramm, T-P diagramm. Faasimuutusega kaasnevad entalpia muutused on leitavad käsiraamatutest.

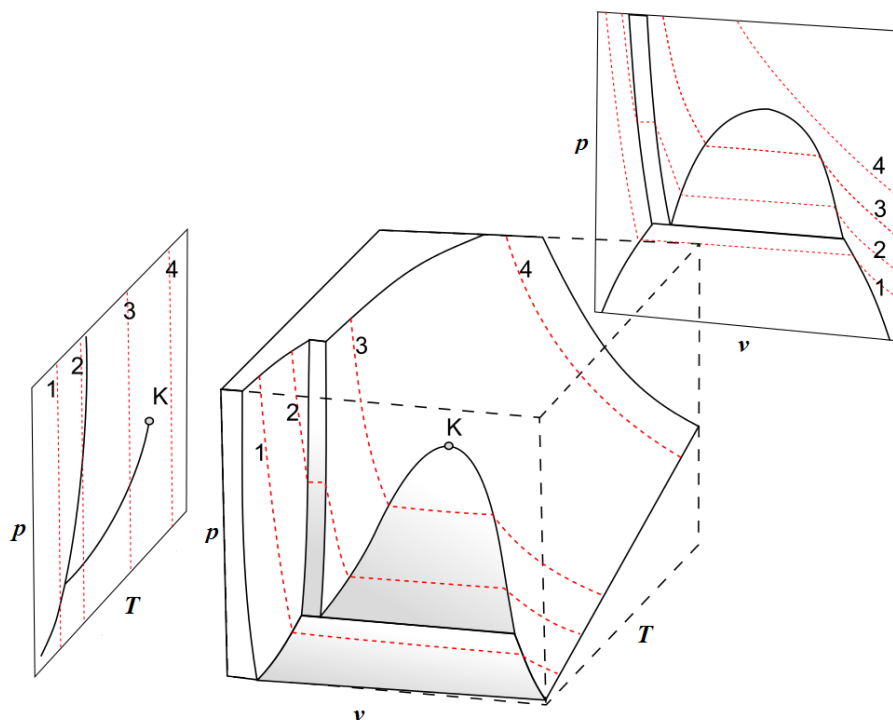
Tabel 1. Vee entalpia küllastunud piirkonnas (vesi ↔ aur).

T, °C	P, atm	h _{vesi}	Δh _{aurustumine}	h _{aur}
55	0.01576	230.26	2369.8	2600.1
150	0.4762	632.18	2113.7	2745.9
260	4.6923	1135.00	1661.6	2796.6

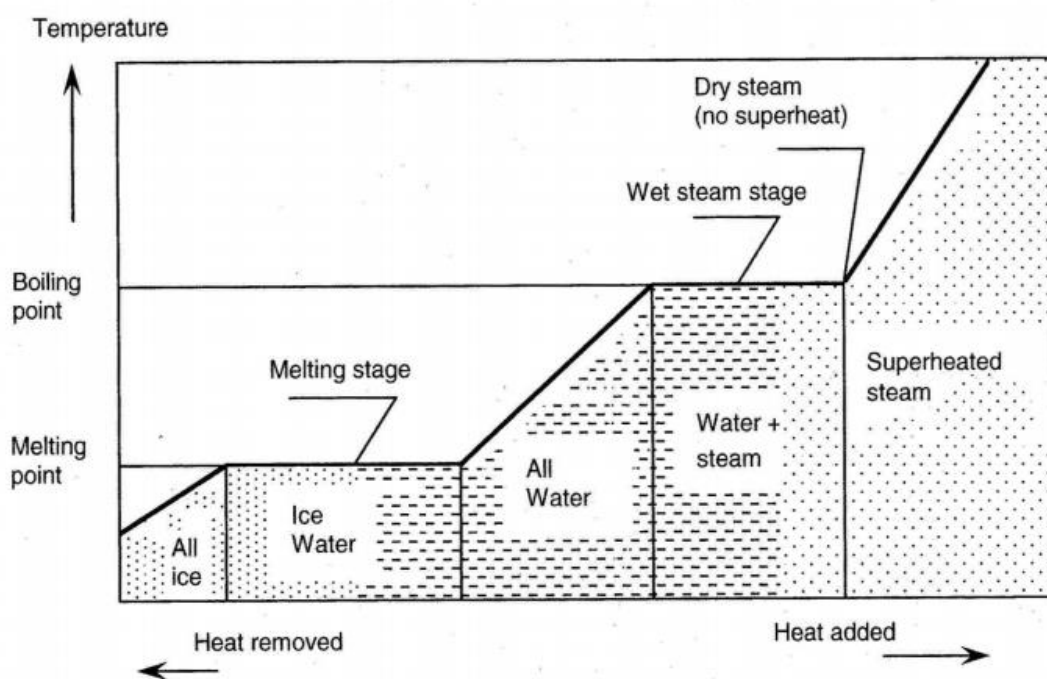
NB! Entalpia absoluutväärtus antakse „kokkulepitud“ referatiivse oleku entalpia suhtes.

Faasimuutused:

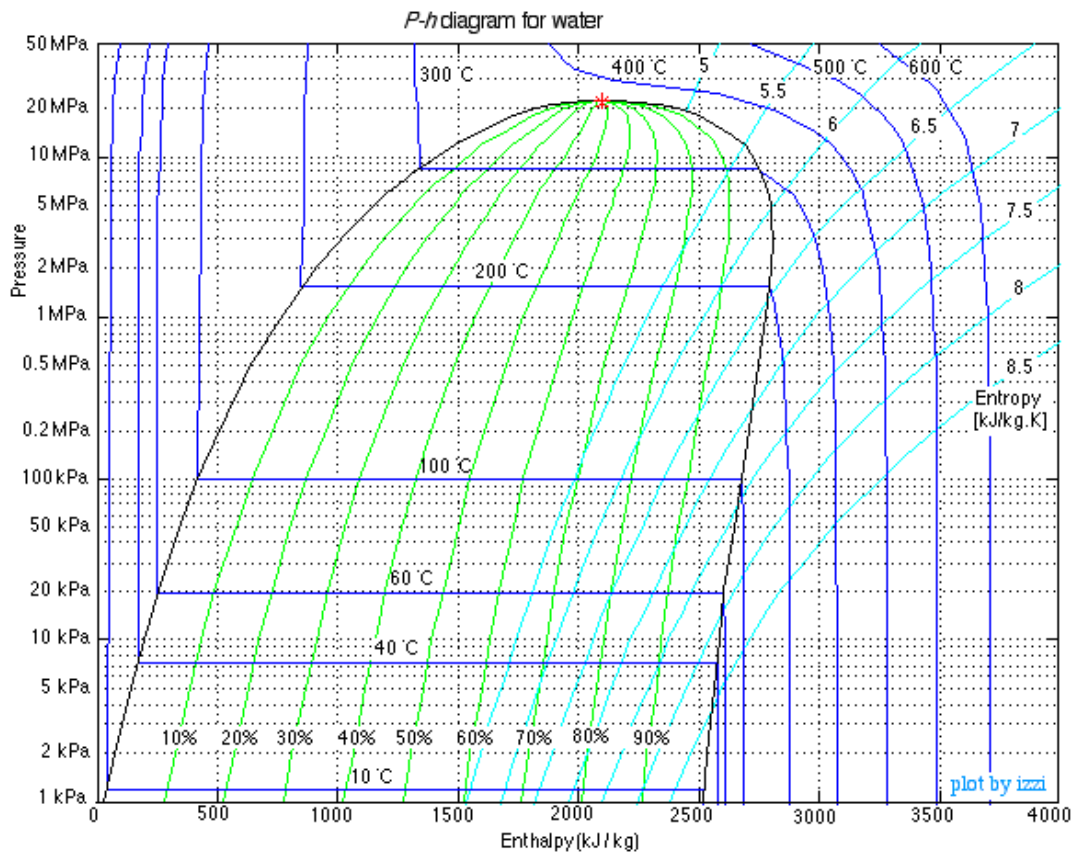
Vedelik ↔ aur	aurustumisentalpia (-soojus)
Tahke ↔ aur	sublimatsioonientalpia (-soojus)
Vedelik ↔ tahke	sulamisentalpia (-soojus)



Joonis 4. Ainete p - v - T käitumine.



Joonis 5. Aine entalpia muutuse sõltuvus aine temperatuurist



Joonis 6. Vee p-H diagramm

Vesi: omadused ja faaside kirjeldus

Keemistemperatuuril olev vesi võib olla nii täielikult vedelik, täielikult aur kui ka vedeliku ja auru segu. Aurufaasi massosa aur-vedelik segus iseloomustatakse veeauru kvaliteediga:

$$x = \frac{m_{aur}}{m}$$

0 kui küllastunud vedelik (saturated liquid)

1 kui küllastunud aur (saturated vapor)

Teades x saab määrata kahefaasilises segus erisuurusi: erientalpia, eriruumala, erientroopia, eriseenergia. Näiteks:

$$H = H_{vedelik} + H_{aur}$$

$$\frac{H}{m} = h = \frac{H_{vedelik}}{m} + \frac{H_{aur}}{m} = \frac{m_{vedelik}}{m} \frac{H_{vedelik}}{m_{vedelik}} + \frac{m_{aur}}{m} \frac{H_{aur}}{m_{aur}}$$

$$h = (1 - x)h_{vedelik} + xh_{aur}$$

Vastavad omadused (antud juhul erientalpia [kJ/kg]) saab nt veeauru tabelitest (täpsem, nt Tabel 1) või ka vastavate diagrammidelt (nt Joonis 6).

1.3.1.3. Entalpia ja (eri)soojusmahtuvus

Soojusmahtuvus – soojushulk [J], mis on vajalik mingi temperatuurimuutuse [K] tekitamiseks süsteemis:

$$c \equiv \left(\frac{dQ}{dT} \right)$$

Konstantse mahu korral $C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_V$ – isohooriline ehk püsimahuline erisoojus on soojushulk, mis on vajalik ühe ainehulga ühiku temperatuuri tõstmiseks 1 °C võrra püsiruumalal.

Konstantse rõhu korral $C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p$ – isobaarne ehk püsirõhuline erisoojus on soojushulk, mis on vajalik ühe ainehulga ühiku temperatuuri tõstmiseks 1 °C võrra püsirõhul.

Erisoojusmahtuvused on vastavalt: $c_V = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_V$ ja $c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p$. Määramine: c_p – eksperimentaalselt adiabaatilise kalorimeetriga, c_V – arvutatakse nt c_p väärtusest termodünaamiliste seoste kaudu.

NB! (Eri)soojusmahtuvus on absoluutne suurus, samas nt (eri)entalpia ja (eri)siseenergia on suhtelised suurused, mille väärtus sõltub referentspunktist.

Soojusmahtuvuste seosed

Kaks ideaalgaasiga täidetud anumad:

1. Anum A – fikseeritud mahuga
2. Anum B – muutuva mahuga

TD I seadus:

1. Anum A: $dU_A = dQ + dW$, kuna maht ei muutu, siis $dW = 0$ ja $dU_A = dQ$
Konstantse mahu korral $dQ = c_V dT$
2. Anum B: $dU_B = dQ + dW$, kuna maht muutub, teeb gaas tööd $dW = -Vdp$ ja $dU_B = dQ - Vdp$
Konstantse rõhu korral $dQ = c_p dT$

Kuna ideaalgaasi korral sõltub siseenergia ainult temperatuurist, siis võrdse temperatuuri korral peab mõlemas anumal oleva ideaalgaasi siseenergia olema võrdne:

$$c_V dT = c_p dT - Vdp$$

Ideaalgaasi olekuvõrrandist: $Vdp = RdT$

Seega: $c_V dT = dT(c_p - R)$

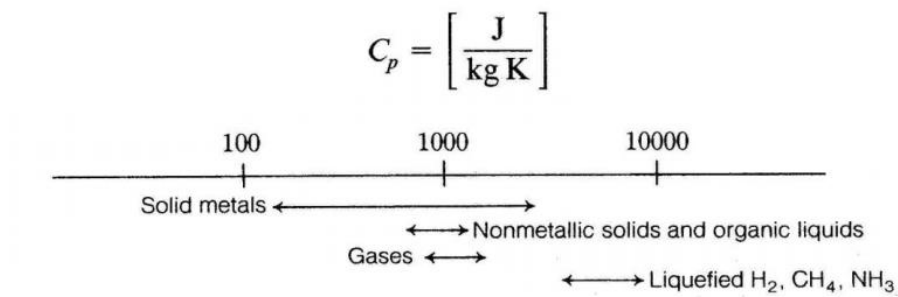
$$c_V = c_p - R \text{ või } c_p = c_V + R$$

Erisoojusmahtuvus

Püsirõhul erisoojus $c_p = f(T, p)$

Konstantsel rõhul entalpia muutus kui $c_p = f(T) \rightarrow \Delta h = \int c_p(T) dT$

Konstantsel rõhul entalpia muutus kui $c_p \neq f(T) \rightarrow \Delta h = c_p \Delta T$



Joonis 7. Ainete soojusmahtuvused

Õhk (0 °C) $c_p = 1003,5 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

Vesi (25 °C) $c_p = 4181,3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

Vesi (100 °C) $c_p = 2080 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

Jää (-10 °C) $c_p = 2110 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

c_p andmed antakse referentsrõhkudel (1 atm tavaliselt) kui funktsioon temperatuurist:

$$c_p = a + bT + cT^2 + dT^3 + \dots$$

Aur (gaas)

$c_p = f(T, p) \leftrightarrow$ tugev

temperatuursõltuvus

$$c_p = a + bT + cT^2 + dT^{-2}$$

Vedelik

$c_p = f(p) \leftrightarrow$ nõrk

$c_p = f(T) \leftrightarrow$ arvestatav

tihti kasutatakse keskmist suurust $c_p = \frac{\int_{T_0}^T c_p dT}{T - T_0}$,

kusjuures c_p temperatuursõltuvus on antud polünoomina

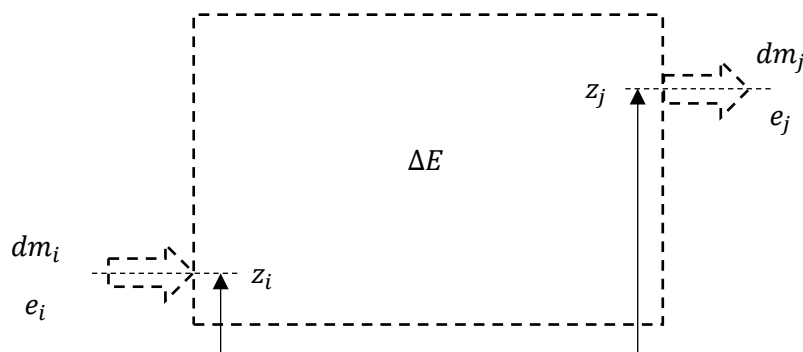
$$c_p = a + bT$$

$$c_p = a + bT + cT^2$$

$$c_p = a + bT + cT^{-2}$$

$$\int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT = a(T_2 - T_1) + \frac{b}{2}(T_2^2 - T_1^2) + \frac{c}{3}(T_2^3 - T_1^3) + \frac{d}{4}(T_2^4 - T_1^4) + \dots$$

1.3.2. TD I seaduse rakendamine avatud süsteemile



Joonis 8. Avatud süsteemi sisenevad ja sealt väljuvad vood

Avatud süsteemi siseneb ja väljub aine/mass. Iga massiühik kannab endas energiat:

$$e = u + gz + \frac{w^2}{2} \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Mittestatsionaarses süsteemis energia muutus:

$$\Delta E = Q + W + \sum_{sisse} \int e_i dm_i - \sum_{välja} \int e_j dm_j \quad [J]$$

Integraale kasutatakse, kuna tingimused võivad selle ajavahemiku jooksul muutuda, millal mass m_i siseneb ja mass m_j väljub süsteemist.

Ajaühikus tehtava töö saab jagada kaheks: seadmete poolt tehtav mehhaaniline töö ja fluidumi poolt tehtav töö:

$$W = W_s + W_f \quad [J]$$

Fluidumi erimahuga v (m^3/kg) ja rõhul p sisenemisel teeb ülesvoolu asuv fluidum tema liigutamiseks pv tööd. Samamoodi teeb süsteemist väljuv fluidum allavoolu asuva vedeliku liigutamiseks tööd. Seega:

$$W_f = \sum_{sisse} \int p_i v_i dm_i - \sum_{välja} \int p_j v_j dm_j \quad [J]$$

Seadmete poolt tehtav töö on kogu töö välja arvatud fluidumi töö. See on töö, mida on vaja protsessi läbiviimiseks või töö, mis saadakse süsteemist – võib olla mehhaaniline töö või ka elektriline töö.

$$\Delta E = Q + W_s + \sum_{sisse} \int (e_i + p_i v_i) dm_i - \sum_{välja} \int (e_j + p_j v_j) dm_j \quad [J]$$

Suuruse $e + pv$ saab kirja panna:

$$u + gz + \frac{w^2}{2} + pv = h + gz + \frac{w^2}{2} \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Seega üldine TD I seadus on kujul:

$$\Delta E = Q + W_s + \sum_{sisse} \int \left(h_i + g_i z_i + \frac{w_i^2}{2} \right) dm_i - \sum_{välja} \int \left(h_j + g_j z_j + \frac{w_j^2}{2} \right) dm_j [J]$$

Statsionaarne süsteem: $\Delta E = 0$ ja integraali all olevad suurused on kõik konstantsed.

$$0 = Q + W_s - \Delta H - \Delta E_p - \Delta E_k [J]$$

kus

$$\Delta H = \sum_{välja} h_j m_j - \sum_{sisse} h_i m_i$$

$$\Delta E_p = \sum_{välja} g z_j m_j - \sum_{sisse} g z_i m_i$$

$$\Delta E_k = \sum_{välja} \frac{w_j^2}{2} m_j - \sum_{sisse} \frac{w_i^2}{2} m_i$$

Erijuht kui $m = m_i = m_j$:

$$\Delta H = m(h_j - h_i) = m\Delta h$$

$$\Delta E_p = mg(z_j - z_i) = mg\Delta z$$

$$\Delta E_k = \frac{m}{2}(w_j^2 - w_i^2) = \frac{m}{2}\Delta w^2$$

Seega ühe sisendi ja väljundiga statsionaarse süsteemi energiabilanss on:

$$m\Delta h + mg\Delta z + m\Delta\left(\frac{w^2}{2}\right) = Q + W_s [J]$$

Kui on tegemist kokkusurutava fluidumiga, siis:

$$m\Delta(u + pv) + mg\Delta z + m\Delta\left(\frac{w^2}{2}\right) = m\Delta u + mg\Delta z + m\Delta\left(\frac{w^2}{2}\right) + m \int \frac{dp}{\rho} = Q + W_s [J]$$

Saadud ühe sisendi ja väljundiga statsionaarse süsteemi energiabilansist kuna $h = u + pv$ ja $v = 1/\rho$ ning $\rho = f(p)$.

$Q = 0$ kui adiabaatiline protsess

$W_s = 0$ kui tööd ei tehta

$\Delta E_{\text{pot}} = 0$ kui kõrgus ei muutu

$\Delta E_{\text{kin}} = 0$ kui kiirus ei muutu

1.3.2.1. Mehaanilise energia bilanss

Bernoulli võrrand nn. korkvoolu jaoks statsionaarse režiimi korral avatud süsteemis reaalsele fluidumile – töö, mida teeb fluidum:

$$\sum F_h + g\Delta z + \Delta\left(\frac{w^2}{2}\right) + \int \frac{dp}{\rho} = W_s \left[\frac{J}{kg} \right]$$

$$\sum F_h = \Delta U - Q$$

$\sum F_h$ on

Ideaalse fluidumi korral $\sum F_h = \dots\dots\dots$

Reaalse fluidumi voolamise korral torustikus $\sum F_h = \left(4f \frac{L}{D} + \sum K_f\right) \frac{w^2}{2} \left[\frac{J}{kg}\right]$

Kui $\rho = \text{const}$ ja võttes arvesse voolu profiili erinevust korkvoolamisest (α), saame:

$$\sum F_h + g\Delta z + \Delta\left(\alpha \frac{w^2}{2}\right) + \frac{\Delta p}{\rho} = w_s \left[\frac{J}{kg}\right]$$

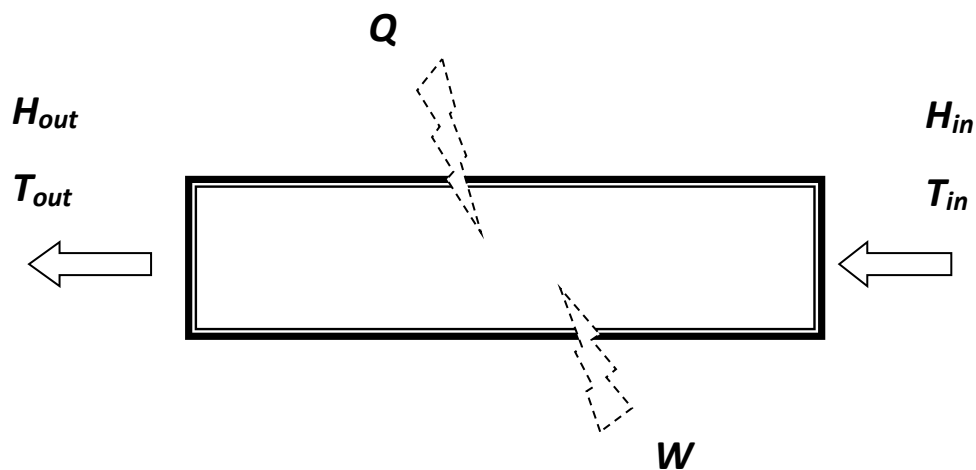
1.3.2.2. Soojusbilanss

Avatud süsteemi energia-/soojusbilanss on järgmine:

$$\Delta h + \Delta E_p + \Delta E_k = Q + W_s \left[\frac{J}{kg}\right]$$

Soojusvahetite puhul potentsiaalne asendienergia muutus ja kineetilise energia muutus sisse- ja väljavoolu vahel ei ole oluline – domineerivad soojuslikud efektid. Samuti võib lugeda süsteemi poolt tehtud töö nulliks. Sellisel juhul soojusbilanss lihtsustub:

$$\Delta h = Q \left[\frac{J}{kg}\right]$$



Joonis 9. Avatud süsteemi sisenevad ja väljuvad vood

Eeldades, et $c_p = \text{const}$, saame:

$$\Delta h = h_{in} - h_{out} = Q = \left[\frac{J}{kg}\right]$$

ehk

$$Q = m(h_{in} - h_{out}) = [J]$$

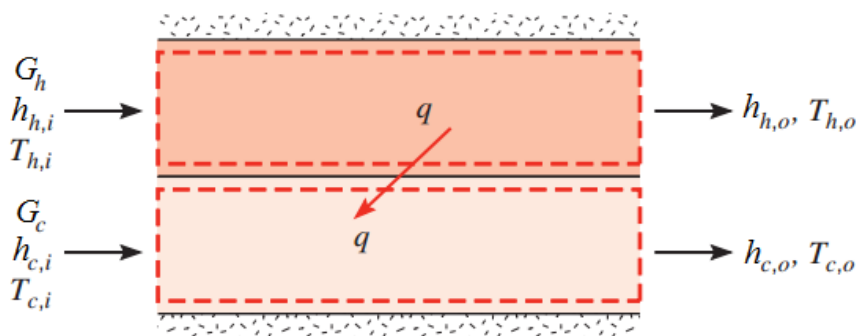
ehk

$$Q = G(h_{in} - h_{out}) = [W]$$

$Q > 0$, kui

1.3.2.3. Soojusbilanss soojusvahetile

Soojusvaheti on seade, milles toimub soojuslevi (läbi seina, segunemisel) fluidumite vahel: ühelt fluidumilt teisele kanduv soojusvoog.



Joonis 10. Üldine energiabilanss soojale ja külmale voole soojusvahetis

Üldine soojusbilanss, kui soojuskadusid ei esine:

$$Q_H + Q_C = 0 [W]$$

Soe voog annab	Külm voog saab
$Q_H = G_H(h_{H,i} - h_{H,o})$	$Q_C = G_C(h_{C,o} - h_{C,i})$

Juhul kui $c_p = \text{const}$:

Soe voog annab	Külm voog saab
$Q_H =$	$Q_C =$

Soojusbilanss võimaldab hinnata soojushulka, mis on vajalik protsessi läbiviimiseks, kus süsteem on viidud ühest tasakaaluolekust teise tasakaaluolekusse ehk lihtsustatult ühelt temperatuurilt teisele temperatuurile. Samas ei võimalda soojusbilanss hinnata soojusvahetuse kiirust.