

11. Energia olomuodon muutoksissa

Harjoittele

Tehtävä 11.1.

a) B

b) C

c) C

d) D

e) D

f) B

Tehtävä 11.2.

Jään massa $m = 240 \text{ g} = 0,240 \text{ kg}$

Jään ominaissulamislämpö $s = 333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Jään sulattamiseen tarvittava energia

$$Q = sm = 333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,240 \text{ kg} = 79,92 \text{ kJ} \approx 80 \text{ kJ}.$$

Tehtävä 11.3.

- a) Löylynheitossa syntyy vesihöyryä, joka iholle osuessaan tiivistyy. Vesi tiivistyy iholle, koska ihon lämpötila on paljon vesihöyryn lämpötilaa matalampi. Tiivistymisessä vapautuu energiaa, jonka iho vastaanottaa.
- b) veden massa $m = 1,0 \text{ g} = 0,0010 \text{ kg}$

$$\text{veden ominaishöyrystymislämpö } r = 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Energiaa vapautuu veden tiivistyessä ja sen jälkeen jäähtyessä kymmeniä asteita ihon lämpötilaan.

Veden tiivistymisessä vapautuva energia

$$Q = rm = 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,0010 \text{ kg} = 2,260 \text{ kJ} \approx 2,3 \text{ kJ}.$$

Kun vesi jäähtyy kymmenellä asteella, $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C} = 10 \text{ K}$, ja energiaa vapautuu

$$Q = cm\Delta T = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 0,0010 \text{ kg} \cdot 10 \text{ K} = 0,0419 \text{ kJ} \approx 0,042 \text{ kJ}.$$

Vaikka vesi jäähtyisi tiivistymisen jälkeen useita kymmeniä asteita, on veden jäähtymisessä luovuttama energia merkityksetön tiivistymisessä vapautuvaan energiaan verrattuna. Kun yksi gramma vettä tiivistyy iholle, vapautuu energiaa 2,3 kJ.

Tehtävä 11.4.

a) jään ominaislämpökapasiteetti $c_1 = 2,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$

jään massa $m = 0,150 \text{ kg}$

jään lämpötilan muutos $\Delta T_1 = 19 \text{ °C} = 19 \text{ K}$

jään lämpenemisessä sitoutuva energia

$$Q_1 = c_1 m \Delta T_1 = 2,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 0,150 \text{ kg} \cdot 19 \text{ K} = 5,9565 \text{ kJ} \approx 6,0 \text{ kJ}$$

b) Jään ominaissulamislämpö $s = 333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Jään massa $m = 0,150 \text{ kg}$

Olomuodon muutoksessa sitoutuva energia

$$Q_2 = sm = 333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,150 \text{ kg} = 49,95 \text{ kJ} \approx 50 \text{ kJ}$$

c) Nestemäisen veden ominaislämpökapasiteetti

$$c_2 = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

Veden massa $m = 0,150 \text{ kg}$

Veden lämpötilan muutos $\Delta T_2 = 21 \text{ °C} = 21 \text{ K}$

Veden lämpenemisessä sitoutuva energia

$$\begin{aligned} Q_3 &= c_2 m \Delta T_2 \\ &= 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 0,150 \text{ kg} \cdot 21 \text{ K} \\ &= 13,1985 \text{ kJ} \approx 13 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Tehtävä 11.5.

- a) Kun veden lämpötila kasvaa 50 °C:sta 100 °C:een nestemäinen vesi lämpenee, ja sen sisäenergia kasvaa kuvaajan perusteella noin

$$U_1 = 1\,000\text{ kJ} - 800\text{ kJ} = 200\text{ kJ}.$$

Tämän jälkeen vesi höyrystyy, ja olomuodon muutoksessa veden sisäenergia kasvaa kuvaajalta luettuna noin $U_2 = 3\,260\text{ kJ} - 1\,000\text{ kJ} = 2\,260\text{ kJ}$.

Lopuksi vesihöyry lämpenee 100 °C:sta 150 °C:een, jolloin sisäenergia kasvaa

$$U_3 = 3\,350\text{ kJ} - 3\,260\text{ kJ} = 90\text{ kJ}.$$

Sisäenergian muutos kuvaajan perusteella on yhteensä

$$\Delta U = U_1 + U_2 + U_3 = 200\text{ kJ} + 2\,260\text{ kJ} + 90\text{ kJ} = 2\,550\text{ kJ}.$$

- b) Veden sisäenergian muutos nesteenä voidaan lukea kuvaajan nousevalta osalta 0 °C:een ja +100 °C:een väliltä. Kun lämpötila kohoaa 100 °C:lla, kuvaaja siirtyy oikealle energia-akselilla noin 400 kJ. Kun veden lämpötilaa nostetaan 100 °C:lla, veden sisäenergia kasvaa noin 400 kJ.

c) Veden sisäenergian muutos jäinä voidaan lukea kuvaajalta kohdasta, jossa lämpötilat ovat matalimmillaan. Kun jään lämpötila muuttuu -100 °C :sta 0 °C :een, kuvaaja siirtyy oikealle energia-akselilla noin 200 kJ . Kun kiinteän veden eli jään lämpötilaa nostetaan 100 °C :lla, kasvaa veden sisäenergia noin 200 kJ .

Veden kyky sitoa energiaa kiinteänä on vain noin puolet nestemäisen veden kyvystä sitoa energiaa. Nestemäisen

veden ominaislämpökapasiteetti on $c_{\text{vesi}} = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$ ja

kiinteän veden eli jään ominaislämpökapasiteetti

$$c_{\text{jää}} = 2,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}.$$

Tehtävä 11.6.

Lämpimän veden massa $m_1 = 0,320 \text{ kg}$

Lämpimän veden lämpötila alussa $T_1 = 95 \text{ °C}$.

Lämpimän veden lämpötila lopussa $T_2 = 0 \text{ °C}$.

Lämpimän veden lämpötilan muutos $\Delta T = 95 \text{ °C} = 95 \text{ K}$.

Nestemäisen veden ominaislämpökapasiteetti

$$c_1 = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{°C}}$$

$$\text{Jään ominaissulamislämpö } s = 333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Koska koko systeemin lämpötila on lopussa 0 °C ,
systeemissä on vielä jätää tai kaikki jää on juuri sulanut.
Lämpimän veden luovuttama energia on yhtä suuri kuin
ssa vastaanottama energia

$$Q_{\text{lämmin vesi}} = Q_{\text{jään sulaminen}}$$

$$cm_1\Delta T = sm_2$$

Sulaneen jään massa

$$m_2 = \frac{cm_1\Delta T}{s} = \frac{4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 0,320 \text{ kg} \cdot 95 \text{ K}}{333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,3825 \text{ kg} \approx 380 \text{ g.}$$

Tehtävä 11.7.

Huoneenlämpöinen kupari luovutti energiaa nestetyypelle, jonka sisäenergia kasvoi. Kuparin lähellä oleva nestetyppi alkaa kiehua. Voimakkaan kiehumisen johdosta nestetyypeä roiskuu astian ympäristöön. Kuparin lämpötila laskee.

Sovella

Tehtävä 11.8.

Nestemäisen veden lämpötila alussa $T_1 = 12 \text{ °C}$

Veden massa $m = 0,320 \text{ kg}$

Jään lämpötila lopussa $T_3 = -18 \text{ °C}$

Nestemäisen veden ominaislämpökapasiteetti

$$c_1 = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{°C}}$$

$$\text{Jään ominaissulamislämpö } s = 333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{Jään ominaislämpökapasiteetti } c_3 = 2,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{°C}}$$

Aluksi vesi jäähtyy.

Nestemäinen vesi jäähdytetään 0 °C :een. Tällöin veden lämpötilan muutos $\Delta T_1 = 12 \text{ °C}$. Veden jäähtymisessä vapautuu energiaa $Q_1 = c_1 m \Delta T_1$.

Olomuodon muutoksessa vapautuva energia on $Q_2 = sm$.

Syntyneen jään lämpötila laskee, jolloin energiaa vapautuu vielä $Q_3 = c_2 m \Delta T_3$. Jään lämpötilan muutos on $\Delta T_3 = -18 \text{ °C}$.

Koko prosessissa vapautuva energia on

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$= c_1 m \Delta T_1 + sm + c_2 m \Delta T_3$$

$$= 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 0,320 \text{ kg} \cdot 12 \text{ }^\circ\text{C} + 333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,320 \text{ kg} + 2,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 0,320 \text{ kg} \cdot 18 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$= 134,688 \text{ kJ}$$

$$\approx 130 \text{ kJ}$$

Tehtävä 11.9.

- a) Marjarasian pinnalle voi härmistyä ilmassa olevasta vesihöyrystä kuuraa.
- b) Kun pyyhkeestä haihtuu vettä, siihen tarvitaan energiaa. Olomuodon muutoksessa sitoutuu energiaa, jota siirtyy lämpimästä juomasta märkään pyyhkeeseen. Samalla juoma jäähtyy.
- c) Pullossa vallitsee nesteen ja kaasun tasapaino. Kun kaasua päästetään ulos, paine laskee ja pullossa olevaa nestettä höyrystyy. Höyrystyminen sitoo energiaa pullosta ja nesteestä. Tällöin pullo jäähtyy.
- d) Mansikantaimien päälle ruiskutettu vesi jäähtyy ennen jäätymistään. Jäähtyessään vesi luovuttaa energiaa ympäristöön, mikä lämmittää mansikantaimien ympärillä olevaa ilmaa. Kun vesi jähmettyy, energiaa vapautuu mansikantaimelle ja ympäristölle. Siksi mansikantaimen lämpötila ei laske pakkasen puolelle eikä taimessa oleva vesi jäädy. Lisäksi taimen pinnalle jäänyt vesi muodostaa eristekerroksen, jolloin ilmaa lämpimämpi mansikantaimi luovuttaa energiaa ympäristöönsä pienemmällä teholla.

Tehtävä 11.10.

a) Nestemäinen vesi vastaanottaa liedeltä energiaa, jolloin veden sisäenergia kasvaa. Aluksi veden sisäenergian muutos ilmenee veden lämpötilan kasvuna. Vaikka veden lämpötila ei muutu höyrystymisen aikana, sen sisäenergia kasvaa edelleen.

b) Veden tilavuus $V = 1,4 \text{ l}$

$$\text{Veden tiheys } \rho = 1,0 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$\text{Veden alkulämpötila } T_1 = 19 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Lieden teho } P = 850 \text{ W}$$

$$\text{Nestemäisen veden ominaislämpökapasiteetti } c_1 = 4,19$$

$$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} = 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

$$\text{Veden ominaishöyrystymislämpö } r = 2260$$

$$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2\,260\,000 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Veden lämpötilan muutos

$$\Delta T = 100 \text{ }^\circ\text{C} - 19 \text{ }^\circ\text{C} = 81 \text{ }^\circ\text{C} = 81 \text{ K}$$

Lieden luovuttama energia on yhtä suuri kuin nestemäisen veden lämpenemisessä ja höyrystymisessä sitoutuva energia

$$Q = Q_1 + Q_2$$

$$Pt = cm\Delta T + rm.$$

Aika, joka kuluu kaiken veden höyrystämiseen pois kattilasta, on

$$t = \frac{c\rho V\Delta T + r\rho V}{P}$$

$$= \frac{4190 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 1,4 \text{ l} \cdot 1,0 \frac{\text{kg}}{\text{l}} \cdot 81 \text{ K} + 2260000 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \cdot 1,4 \text{ l} \cdot 1,0 \frac{\text{kg}}{\text{l}}}{850 \text{ W}}$$

$$= 4281,3 \text{ s} \approx 71 \text{ min.}$$

Tehtävä 11.11.

a) Hiki on nestettä, joka höyrystyy ihon pinnalta.

Höyrystyminen vaatii energiaa, jonka hiki vastaanottaa iholta. Kun iho luovuttaa energiaa hielle, ihon pintalämpötila alenee. Elimistö siirtää energiaa ihon pinnalle, mikä pienentää kehon lämpötilaa.

b) Ihmisen massa $m_1 = 65 \text{ kg}$

Ihmisen kehon lämpötilan muutos $\Delta T = 1,0 \text{ }^\circ\text{C} = 1,0 \text{ K}$

Ihmisen ominaislämpökapasiteetti on $c = 3480 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$.

Kyseisen ihmisen hikoilussa vapautuu energiaa

$$h = 2,42 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Ihmisen kehon luovuttama energia on yhtä suuri kuin hikoilussa vapautunut energia

$$Q_{\text{ihminen}} = E$$

$$cm_1\Delta T = hm$$

Hikoillun veden massa

$$m = \frac{cm_1\Delta T}{h} = \frac{3480 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 65 \text{ kg} \cdot 1,0 \text{ K}}{2,42 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}} = 0,09347 \text{ kg} \approx 9,3 \text{ g.}$$

Tehtävä 11.12.

Lämpenevä aine vastaanottaa energian $Q = cm\Delta T$. Jos aineen massa olisi suurempi, tarvittaisiin aineen lämpötilan nousuun enemmän energiaa, jolloin lämpötilakäyrä nousisi loivemmin. Lämpötila nousisi kuitenkin lopulta yhtä korkeaksi kuin kuvassa. Olomuodon muutoksessa lämpötila ei muutu. Tarvittava energiamäärä riippuu kuitenkin massasta, joten suuremmalla massalla myös käyrän vaakasuora osa pitenisi.

Tehtävä 11.13.

Mehun alkulämpötila $T_1 = 21,2 \text{ °C}$

Mehun loppulämpötila $T_2 = 6,8 \text{ °C}$

Jään alkulämpötila $T_3 = -18 \text{ °C}$

Nestemäisen veden lämpötilan muutos

$$\Delta T_1 = T_1 - T_2 = 21,2 \text{ °C} - 6,8 \text{ °C} = 14,4 \text{ °C} = 14,4 \text{ K.}$$

Jään lämpötilan muutos

$$\Delta T_2 = 0 \text{ °C} - (-18 \text{ °C}) = 18 \text{ °C} = 18 \text{ K.}$$

Jäästä sulaneen veden lämpötilan muutos

$$\Delta T_3 = 6,8 \text{ °C} = 6,8 \text{ K.}$$

Mehun massa $m_1 = ?$

Jään massa $m_2 = 0,280 \text{ kg}$

Nestemäisen veden ominaislämpökapasiteetti $c_1 = 4,19$

$$\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

Jään ominaissulamislämpö $s = 333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Jään ominaislämpökapasiteetti $c_j = 2,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$

Lämpimän mehun luovuttama energia on yhtä suuri kuin jään lämpenemisen, jään sulamisen ja jäästä sulaneen nestemäisen veden lämpenemisen vastaanottama energia.

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4$$

$$c_1 m_1 \Delta T_1 = c_j m_2 \Delta T_2 + sm_2 + cm_2 \Delta T_3$$

Mehun massaksi saadaan

$$m_1 = \frac{c_j m_2 \Delta T_2 + sm_2 + cm_2 \Delta T_3}{c \Delta T_1}$$

$$c_1 = \frac{2,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 0,280 \text{ kg} \cdot 18 \text{ K} + 333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,280 \text{ kg} + 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 0,280 \text{ kg} \cdot 6,8 \text{ K}}{4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 14,4 \text{ K}}$$

$$= 1,852 \text{ kg} \approx 1,9 \text{ kg}.$$

Tehtävä 11.14.

Lämpimän veden tilavuus $V_1 = 0,18 \text{ l}$

Veden tiheys $\rho_1 = 1,0 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$

Veden lämpötila alussa $T_1 = 20,0 \text{ °C}$

Veden ja mukin lämpötila lopussa $T_2 = 6,5 \text{ °C}$

Jään alkulämpötila $T_3 = -18 \text{ °C}$

Mukin lämpökapasiteetti $C = 0,170 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$

Nestemäisen veden ominaislämpökapasiteetti $c_1 = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$

Jään ominaissulamislämpö $s = 333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Jään ominaislämpökapasiteetti $c_j = 2,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$

Jäähtyvän veden ja mukin lämpötilan muutos
 $\Delta T_1 = 20,0 \text{ °C} - 6,5 \text{ °C} = 13,5 \text{ °C} = 13,5 \text{ K}$.

Jään lämpötilan muutos $\Delta T_2 = 18 \text{ °C} = 18 \text{ K}$.

Jäästä syntyneen veden lämpötilan muutos

$$\Delta T_3 = 6,5 \text{ °C} = 6,5 \text{ K}.$$

Tarkastellaan energian siirtymisiä.

Lämmin vesi ja muki luovuttavat energiaa $Q_1 + Q_2$, jonka jään lämpeneminen, jään sulaminen ja veden lämpeneminen

$Q_3 + Q_4 + Q_5$ ottavat vastaan eli

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 + Q_5$$

$$cm_1\Delta T_1 + C\Delta T_1 = c_j m_2 \Delta T_2 + sm_2 + cm_2 \Delta T_3.$$

Tarvittavan jään massa

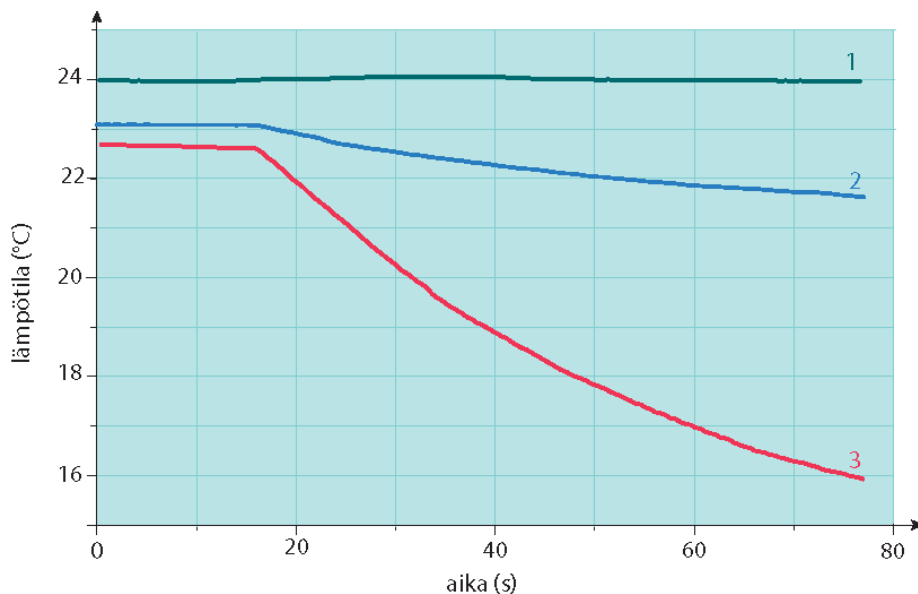
$$\begin{aligned} m_2 &= \frac{c\rho_1 V_1 \Delta T_1 + C\Delta T_1}{c_j \Delta T_2 + s + c\Delta T_3} \\ &= \frac{4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 1,0 \frac{\text{kg}}{1} \cdot 0,18 \cdot 13,5 \text{ K} + 0,170 \frac{\text{kJ}}{\text{K}} \cdot 13,5 \text{ K}}{2,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 18 \text{ K} + 333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 6,5 \text{ K}} \\ &= 0,03135 \text{ kg} \approx 31 \text{ g} \end{aligned}$$

Tehtävä 11.15.

- a) Rakenneosat liikkuvat eri nopeuksilla eri olomuodoissa. Liike on hitainta, kun aine on kiinteässä olomuodossa ja nopeinta kun aine on kaasumaista. Rakenneosasten väliset etäisyydet kasvavat, kun nopeudet kasvavat. Tällöin rakenneosasten välinen vuorovaikutus vähenee.
- b) Kun lämpötila nousee, rakenneosasten lämpöliike lisääntyy. Tämän seurauksena kiinteästä aineesta alkaa irrota yhä enemmän rakenneosasia nestemäiseen olomuotoon.

Tehtävä 11.16.

a)



b) Huoneilman lämpötila ei juurikaan muutu, joten käyrä 1 kuvaa huoneen lämpötilan mittausta.

Kun mittari nostetaan pois nesteestä, mittarin pinnalla oleva neste alkaa höyrystyä. Lämpömittari luovuttaa sisäenergiaansa nesteen höyrystymiseen, jolloin lämpömittarin lämpötila laskee. Mitä nopeammin aine höyrystyy mittarin pinnalta, sitä nopeammin lämpötila laskee.

Etanoli höyrystyy herkemmin kuin vesi. Käyrän 3 mittauksessa lämpötila laskee kaikkein nopeimmin, joten mittari on ollut etanolia sisältävässä keitinlasissa. Käyrä 2 on saatu, kun mittari on ollut vettä sisältävässä keitinlasissa.

c) Kun mittarit nostetaan pois nesteistä, jää mittarin pinnalle nestettä. Mittarin pinnalla oleva neste höyrystyy, jolloin se sitoo energiaa lämpömittarilta. Kun lämpömittari luovuttaa sisäenergiaansa nesteen höyrystymiseen, alenee lämpömittarin lämpötila.

Tehtävä 11.17.

- a) Käsidesillä kastellussa kädessä tuntemus on viileämpi kuin vedellä kastellussa kädessä.

- b) Jos neste on ihoa viileämpää, ihosta siirtyy energiaa ihon pinnalla olevaan nesteeseen. Neste alkaa höyrystyä ihon pinnalta ja käsi tuntuu viileältä, koska ihon pintalämpötila laskee. Mitä suuremmalla teholla energiaa siirtyy, sitä viileämpi tuntemus on. Etanoli höyrystyy huoneenlämmössä vettä helpommin, joten etanolin tapauksessa käsi tuntuu viileämmältä.

Tehtävä 11.18.

a) Höyrystyneen veden massa saadaan vähentämällä alussa olevasta massasta kunkin taulukoidun massan arvo. Arvot ovat esimerkiksi:

m (kg)	t (s)	mhöyry (kg)
0,254	0	0,000
0,2528	11,56	0,001
0,2509	22,54	0,003
0,2486	36,57	0,005
0,2465	53,94	0,008
0,2442	71,13	0,010
0,2429	82,46	0,011
0,2411	93,01	0,013
0,2389	112,81	0,015
0,2369	128,56	0,017

Vedenkeittimen vedenlämmitysteho $P = 300 \text{ W}$.

Energian säilymisperiaatteen mukaan vedenkeittimen vedelle luovuttama energia on yhtä suuri kuin höyrystyneen veden vastaanottama energia, sillä vesi on mittauksen alussa kiehumispisteessä.

$$E_{\text{keitin}} = E_{\text{höyrystyminen}}$$

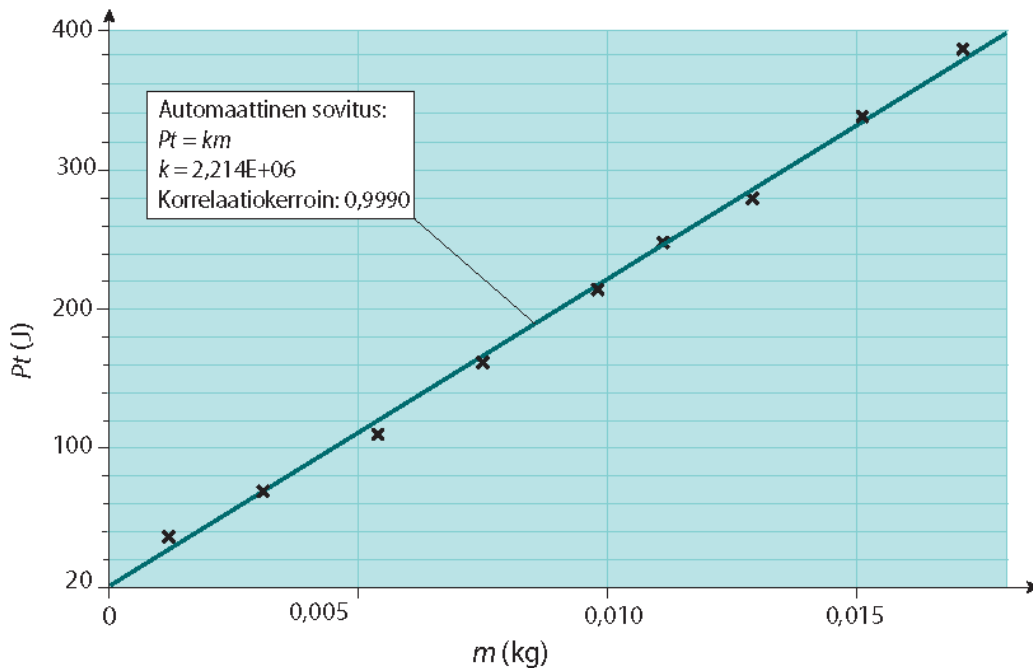
$$Pt = rm$$

$$(y = kx)$$

Veden ominaishöyrystymislämpö saadaan

(m, Pt) -koordinaatiston fysikaalisesta kulmakertoimesta.

Lasketaan uusi sarake Pt ja tehdään koordinaatistoon kuvaaja, jonka mittapisteisiin sovitetaan suora.



Kuvaajan fysikaaliseksi kulmakertoimeksi eli veden ominaishöyrystyslämmöksi saadaan

$$r = 2,214 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 2214 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}.$$

b) Kirjallisuudesta $r_{\text{kirj}} = 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$.

Verrataan saatua ominaishöyrystyslämmön arvia kirjallisuudessa esiintyvään arvoon

$$\frac{r_{\text{kirj}} - r}{r_{\text{kirj}}} = \frac{2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2214 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,02035 \approx 2,0 \%$$

Saatu tulos on 2,0 % kirjallisuusarvoa pienempi.

Määrittäessä $Pt = rm$, joten virhettä voi tulla tehon P , ajan t ja massan m määrittäessä. Tehoa ei mitattu, vaan se oli annettu. Tehon mittauksessa voi tulla virhettä. Jos todellinen teho on suurempi kuin annettu teho, kasvaa kuvaajan kulmakerroin ja ominaishöyrystyslämmön arvo.

Videolta näemme, kun vesi kiehuu, termosastiasta lentää pieniä vesipisaroita ympäristöön. Tällöin poistuneen veden massa kasvaa, mikä pienentää kuvaajan kulmakerrointa ja määritetyn ominaishöyrystyslämmön arvoa.

Ajanmäärittäksen virhe on todella pieni, sillä kellon mittaustarkkuus on sekunnin sadasosa. Virhettä aiheutuu massan ja ajan määrittäessä, kun vaa'an lukema ei välillä muuttunut. Arvot kannattaa ottaa hetkellä, jolloin arvo on välittömästi muuttunut. Mittaus

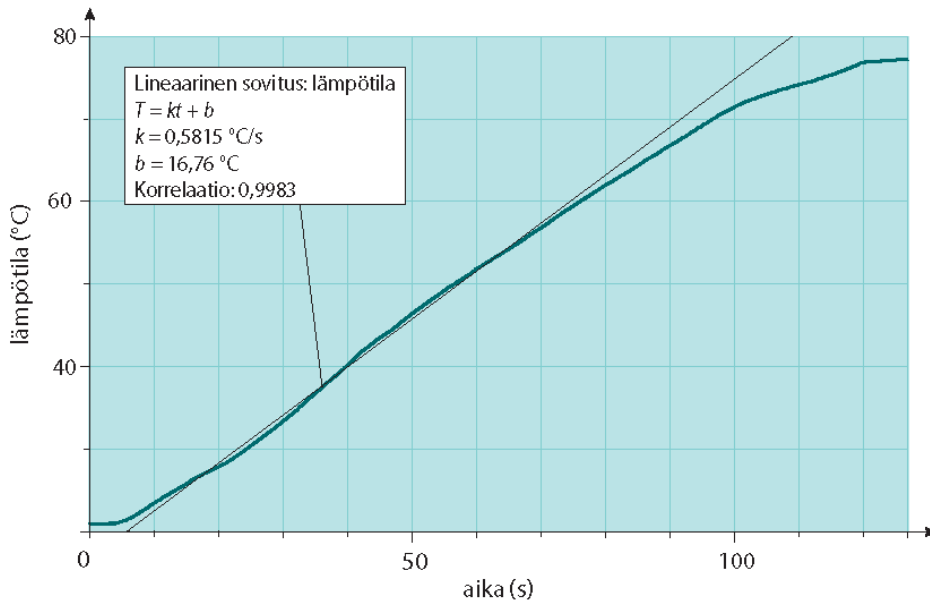
tehtiin termosastiassa, jolla on lämpökapasiteetti.
Termosastia sitoo energiaa, mikä pienentää
ominaishöyrystyslämmön arvoa.

Tehtävä 11.19.

- a) Kryokirurgiassa sairas kudos, kuten syylä, tuhotaan jäähdyttämällä se. Jäähdyttäminen voidaan tehdä esimerkiksi nestetyypen avulla. Nestetyypen lämpötila on sen kiehumispisteen lämpötila eli $-195,8\text{ °C}$.
- b) Kylmägeeliä levittää iholle vammakohtaan. Kun geelistä haihtuu ainesosia, olomuodon muutokseen tarvitaan energiaa. Energiaa siirtyy iholta geeliin, jolloin ihon lämpötila laskee.

Tehtävä 11.20.

a) Laaditaan mittausaineistosta kuvaaja.



Lämpötilan muutosnopeus näkyy kuvaajan jyrkkyydessä. Luetaan aineistoon sovitetun suoran fysikaalisen

kulmakertoimen arvo: $\frac{\Delta T}{\Delta t} = 0,5815 \frac{\text{°C}}{\text{s}} \approx 0,58 \frac{\text{°C}}{\text{s}}$.

Jos astiassa olisi ollut vettä, se olisi lämmennyt paljon hitaammin, sillä vesi sitoo energiaa enemmän kuin etanoli. Taulukkokirjasta saadaan veden ja

etanolinominaislämpökapasiteetit:

$$c_{\text{vesi}} = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \text{ ja } c_{\text{etanoli}} = 2,43 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}.$$

Jos astian vaikutusta mittauksessa ei huomioida, voidaan aineiden ominaislämpökapasiteettien suhteen

avulla arvioida lämpötilan muutosta. $\frac{c_{\text{vesi}}}{c_{\text{etanoli}}} \approx 1,7$ eli

veden lämpötilan muutos olisi ollut vain

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{0,5815 \frac{\text{°C}}{\text{s}}}{1,7} \approx 0,34 \frac{\text{°C}}{\text{s}}.$$

- b) Mitä korkeammaksi systeemin lämpötila kasvaa, sitä enemmän systeemistä siirtyy energiaa myös ympäristöön.

Etanolin kiehumispiste on 78,5 °C. Mittauksen lopussa etanolin lämpötila ei enää nouse, sillä siihen tuotu energia menee etanolin höyrystymiseen.

Tehtävä 11.21.

- a) Jääpuikkoja syntyy yleensä kevättalvella, kun auringon säteilyenergia sulattaa lunta ja jäätä. Esimerkiksi auringon lämmittämällä katolla vesi sulaa räystään reunalle, johon jääpuikko alkaa muodostua. Sulanutta vettä ympäröivän ilman lämpötila on alle 0 °C. Jääpuikko muodostuu, kun vesipisara jää paikoilleen räystään reunalle (pintajännityksen vuoksi) ja jähmettyy eli arkikielessä jäätyy. Seuraava pisara valuu pitkin muodostunutta jäätä. Pisara luovuttaa samalla sisäenergiaansa ja jäähtyy.
- b) Jääpuikon kartiomainen muoto selittyy sillä, että vesipisaran valuessa painovoiman vaikutuksesta pitkin jääpuikkoa, osa pisaran vedestä jää ohueksi kerrokseksi jään pinnalle, ja jäätyy nopeasti. Useiden pisaroiden valuessa pitkin jääpuikkoa suurin määrä jäätä kertyy puikon yläosaan. Osa pisaroista valuu aina jääpuikon päähän asti, johon pisara lopulta jähmettyy. Siksi jääpuikon pituus kasvaa. Jääpuikko katkeaa, kun se ei kestä enää omaa painoaan.

Syvennä

Tehtävä 11.22.

a) Jäiden lisäämisen jälkeen koko systeemin yhteinen loppulämpötila on 0 °C .

Merkitään sulaneen jään massaa m_x .

Veden ominaislämpökapasiteetti on $c_{\text{vesi}} = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$,

massa $m_{\text{vesi}} = 0,60\text{ kg}$ ja lämpötilan muutos

$$\Delta T_{\text{vesi}} = 25\text{ °C} = 25\text{ K}.$$

Termospullon lämpötila muuttuu saman verran.

Jään ominaislämpökapasiteettia on $c_{\text{jää}} = 2,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$,

sen massa on $m_{\text{jää}} = 0,41\text{ kg}$, ja

lämpötilan muutos $\Delta T_{\text{jää}} = 8\text{ °C} = 8\text{ K}$.

Veden ominaissulamislämpö on $s = 333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$.

Termospullon lämpökapasiteetti on $C = 0,15 \frac{\text{kJ}}{\text{°C}} = 0,15 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$.

Oletetaan, että kaikki veden ja termospullon luovuttama energia käytetään jään lämmittämiseen sulamispisteen lämpötilaan ja osan jäästä sulattamiseen:

$$Q_{\text{vesi}} + Q_{\text{termos}} = Q_{\text{jää}} + Q_{\text{sulamainen}}$$

$$c_{\text{vesi}} m_{\text{vesi}} \Delta T_{\text{vesi}} + C \Delta T_{\text{vesi}} = c_{\text{jää}} m_{\text{jää}} \Delta T_{\text{jää}} + s m_x$$

$$m_x = \frac{c_{\text{vesi}} m_{\text{vesi}} \Delta T_{\text{vesi}} + C \Delta T_{\text{vesi}} - c_{\text{jää}} m_{\text{jää}} \Delta T_{\text{jää}}}{s}$$

$$= \frac{4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 0,60 \text{ kg} \cdot 25 \text{ K} + 0,15 \frac{\text{kJ}}{\text{K}} \cdot 25 \text{ K} - 2,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 0,41 \text{ kg} \cdot 8,0 \text{ K}}{333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}$$

$$= 0,17941 \text{ kg}$$

Jäätä jäi sulamatta

$$0,41 \text{ kg} - 0,17941 \text{ kg} = 0,23059 \text{ kg} \approx 230 \text{ g}.$$

b) Merkitään sulamattoman jään massaa tunnuksella m_y .

Jäljelle jääneen jään sulattaminen sitoo energiaa

$$Q = sm_y = 333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,23059 \text{ kg} = 76,7852 \text{ kJ}$$

Lämpövirta eli jään sulamisteho on $P = 11 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$.

Teho on $P = \frac{Q}{t}$, joten jään sulamiseen kuluva aika

$$t = \frac{Q}{P} = \frac{sm_x}{P} = \frac{333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,23058 \text{ kg}}{11 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}} = 6,980 \text{ h} \approx 7,0 \text{ h}.$$

Eli jäätä jää sulamatta 230 g ja kaikki jää on sulanut 7,0 h kuluttua.

Tehtävä 11.23.

- a) Olomuodon muutoksen aikana lämpötila pysyy vakiona, joten kuvaajien vaakasuorien osuuksien aikana olomuoto muuttuu. Se vaakasuora osa, joka on matalammassa lämpötilassa, liittyy sulamiseen. Siten alhaisin sulamispiste on näytteellä 3.
- b) Höyrystymistä kuvaa korkeammassa lämpötilassa oleva vaakasuora osuus kuvaajassa. Jos näytettä lämmitetään vakioteholla, on näytteeseen siirtynyt energia $Q = Pt$. Mitä pidempi aika näytettä lämmitetään, sitä suurempi on siihen siirtynyt energia. Näytteellä 1 höyrystyminen kestää pisimmän ajan, joten sen höyrystymisessä sitoma energia on suurin. Ominaishöyrystymislämpö ilmaisee aineen höyrystymiseksi tarvittavan energian massayksikköä kohden, eli $r = \frac{Q}{m}$.

Koska eri näytteillä oli sama massa, täytyy näytteen 1 ominaishöyrystymislämmön olla suurin.

- c) Kuvaajan keskimäinen vino osuus esittää näytteen käyttäytymistä nesteenä. Ominaislämpökapasiteetti kuvaa aineen kykyä sitoa energiaa lämpötilan kohotessa. Näytteen 3 kuvaajan kulmakerroin on tuossa kohdassa suurin eli näytteen 3 lämpötila kohoaa helpoiten, kun siihen tuodaan energiaa. Se tarkoittaa, että näytteen 3 ominaislämpökapasiteetti nesteenä on pienin.

Tehtävä 11.24.

- a) Pommikalorimetrillä määritetään suurin palamisessa vapautuva energia, esimerkiksi ruuan, räjähdeaineiden ja polttoaineiden palamisessa vapautuvaa energiaa.
- b) Tutkittava näyte asetetaan pommikalorimetrin polttokammioon. Kun näyte poltetaan täydellisesti, palamisessa vapautunut energia johtuu polttokammion ympärillä olevaan vesihauteeseen. Tällöin veden sisäenergia kasvaa. Sisäenergian muutos voidaan määrittää veden lämpötilan muutoksen avulla, kun tiedetään veden tarkka massa.

Sisäenergian muutos on $Q = cm\Delta T$, jossa c = veden ominaislämpökapasiteetti m = vesihauteen veden massa ja ΔT = vesihauteen veden lämpötilan muutos.

Näytteissä oleva vesi ei pala vaan se höyrystyy. Höyrystynyt vesi tiivistyy polttokammion seinämiin ja luovuttaa yhtä suuren energian näytekammiolle kuin vesi höyrystyessään on tarvinnut. Polttokammioista energia johtuu vesihauteen veteen.

Mittauksessa on useita mahdollisia virhelähteitä. Kun näyte on palanut polttokammiossa, vesihauteen lämpötilan pitää antaa tasoittua riittävän kauan ja veden pitää olla kauttaaltaan saman lämpöistä, jotta tarkka lämpötilan muutos saadaan määritettyä. Jotta lämpötila olisi vesihauteessa kauttaaltaan sama,

haudetta pitää sekoittaa. Sekoittimen vedelle tekemä työ saattaa nostaa veden lämpötilaa.

Koska veden ominaislämpökapasiteetti on suuri, se sitoo paljon energiaa, joten veden lämpötilan muutokset ovat mikrokelvinien luokkaa. Koska syntyvät lämpötilaerot ovat hyvin pieniä, mittaustapahtuma täytyy suunnitella ja toteuttaa erittäin huolellisesti, jotta vältetään mittaajasta tai mittauslaitteiston asetuksista aiheutuvat virheet.

Lämpötilaerojen tasoittumiseen varataan pitkät ajat, jotta virheet lämpötilan mittauksen virheet olisi mahdollisimman pieniä. Kalorimetri ei ole täysin ympäristöstä eristetty, joten kalometrissa tapahtuu aina lämpövuotoja ympäristöön, mikä aiheuttaa virhettä mitattuun arvoon. Vuotojen takia mittauksissa saadut palamislämmöt saattavat olla pienempiä kuin todelliset arvot.

c) Banaanin massa $m_1 = 2,96 \text{ g} = 0,00296 \text{ kg}$

Kalorimetrin vesihauteen veden massa $m_2 = 4,42 \text{ kg}$

Veden lämpötilan muutos $\Delta T = 0,686 \text{ K}$

Banaanin palamisessa vapautunut energia siirtyy vesihauteeseen.

$$Q_{\text{banaani}} = Q_{\text{vesi}}$$

$$Hm_1 = cm_2\Delta T$$

Banaanin palamislämpö

$$H = \frac{cm_2\Delta T}{m_1} = \frac{4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 4,42 \text{ kg} \cdot 0,686 \text{ K}}{0,00296 \text{ kg}} = 4292,088 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Banaanin ravintoarvosta 85 % saadaan hyödyksi.

Ravintoarvo 100 g:aa kohden

$$\text{Banaanin ravintoarvo} = 0,85 \cdot 4292,088$$

$$\text{kJ/kg} = 3648,275466 \text{ kJ/kg} \approx 360 \text{ kJ/100 g.}$$

Tehtävä 11.25.

a) Jää vastaanottaa energiaa kaasupolttimelta, jolloin sen sisäenergia kasvaa jään lämmitessä, jään sulassa ja jäästä syntyneen nestemäisen veden lämmitessä. (2 p). Sisäenergian kasvu ilmenee jään lämpötilan kasvuna, jään sulamisena ja jäästä muodostuneen nestemäisen veden lämpötilan kasvuna. (3 p.)

b) Jään massa ja jäästä syntyneen nestemäisen veden massa $m = 0,260 \text{ kg}$

Jään lämpötilan muutos

$$\Delta T_j = 0 \text{ °C} - (-18,0 \text{ °C}) = 18,0 \text{ °C} = 18 \text{ K.}$$

Nestemäisen veden lämpötilan muutos

$$\Delta T_j = 12,3 \text{ °C} - 0 \text{ °C} = 12,3 \text{ °C} = 12,3 \text{ K.}$$

Jään ominaislämpökapasiteetti $c_j = 2,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$

Nestemäisen veden ominaislämpökapasiteetti $c_v = 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$

Jään ominaissulamislämpö $s = 333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

Jään vastaanottama energia saadaan jään lämpenemiseen Q_1 , jään sulamiseen Q_2 ja sulaneen veden lämpenemiseen Q_3 tarvittavasta energiasta. (1 p.)

Jään vastaan ottama energia on

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \text{ (1 p.)}$$

$$Q = c_j m \Delta T_j + sm + c_v m \Delta T_v \text{ (3 p.)}$$

$$Q = 2,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 0,260 \text{ kg} \cdot 18 \text{ }^\circ\text{C} + 333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,260 \text{ kg} + 4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \cdot 0,260 \text{ kg} \cdot 12,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Q = 109,76081 \text{ kJ} \approx 110 \text{ kJ. (1 p.)}$$

c) Nestekaasun lämpöarvo $H = 42 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$

Kaasupolttimen hyötysuhde $\eta = 0,52$

b)-kohdan mukaan jään ja jäästä syntyneen veden kaasupolttimelta vastaanottama energia

$$Q = 109\,760,81 \text{ J.}$$

Kaasupolttimen hyötysuhteesta

$$\eta = \frac{E_{\text{anto}}}{E_{\text{otto}}} = \frac{Q}{Q_{\text{palaminen}}} = \frac{Q}{Hm} \cdot (2 \text{ p.})$$

Kaasupolttimessa käytetyn nestekaasun massaksi saadaan

$$m = \frac{Q}{H\eta} = \frac{109\,760,81 \text{ J}}{42 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \cdot 0,52} = 0,005025 \text{ kg} \approx 5,0 \text{ g.}$$

(kaavan oikea muoto 1 p. ja oikea vastaus 1 p.)